



IMPACTS DU REBOISEMENT SUR LES PARAMÈTRES CLIMATIQUES : CAS DE LA GRANDE MURAILLE VERTE DU SENEGAL

Bi Tra Olivier Gore

► To cite this version:

Bi Tra Olivier Gore. IMPACTS DU REBOISEMENT SUR LES PARAMÈTRES CLIMATIQUES : CAS DE LA GRANDE MURAILLE VERTE DU SENEGAL. Physique Atmosphérique et Océanique [physics.ao-ph]. Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody Abidjan Côte d'Ivoire, 2025. Français. ⟨NNT : ⟩. ⟨tel-05361447⟩

HAL Id: tel-05361447

<https://theses.hal.science/tel-05361447v1>

Submitted on 12 Nov 2025

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.

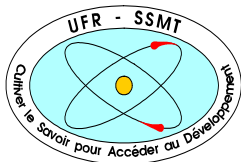
L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC 4.0 - Attribution - Non-commercial use - International License



Université Félix Houphouët-Boigny



Unité de Formation et de Recherche

Sciences des Structures de la Matière et de Technologie

Année : 2024-2025

N° d'ordre : 2914/2025

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE FELIX HOUPHOUËT-BOIGNY

Mention : PHYSIQUE

Spécialité : ENERGIE, CLIMAT ET ENVIRONNEMENT

Présentée par :

GORE Bi Tra Olivier

Sur le thème :

IMPACTS DU REBOISEMENT SUR LES PARAMETRES CLIMATIQUES : CAS DE LA GRANDE MURAILLE VERTE DU SENEGAL

Soutenue le 30 juillet 2025

Devant le jury composé de :

- Président** : M. OCHOU Abé Delfin, Professeur Titulaire, Université Félix Houphouët-Boigny (Abidjan)
- Directeur** : M. AMAN Angora, Professeur Titulaire, Université Félix Houphouët-Boigny (Abidjan)
- Rapporteurs** : M. DIBI N'Da Hyppolite, Maître de Conférences, Université Félix Houphouët-Boigny (Abidjan)
- : M. TCHETCHE Yao, Maître de Conférences, Université Nangui Abrogoua (Abidjan)
- Examineur** : M. YEO Napari Elisée, Maître de Recherche, Université Nangui Abrogoua (Abidjan)
- Membre invité** : M. DUCLOS Ody-Marc, Vice-Président de la Fondation Cœur Vert, (Abidjan)

DEDICACE

À mon père

DJAGONE Bi Goré Eugène

Et

À ma mère

GOUALY Gbaï Isabelle

REMERCIEMENTS

Un travail de recherche conduisant à une thèse est une grande exploration à la fois scientifique et humaine, remplie de découvertes, de bons moments, mais également semée d'épreuves complexes et insoupçonnées. Le parcours du chercheur n'est pas une navigation en solitaire mais bien une aventure partagée et portée par de nombreuses personnes qu'il m'est difficile de rassembler entièrement dans ces quelques lignes. A vous tous, je voudrais vous exprimer toute ma gratitude.

Je voudrais d'abord remercier le Professeur Yves KOUADIO, Directeur du LASMES (*Laboratoire des Sciences de la Matière, de l'Environnement et de l'Energie Solaire*), de m'avoir accueilli dans le laboratoire et pour sa disponibilité, ses conseils sur certains aspects de nos résultats.

Je n'oublie pas les Professeurs Paul ASSAMOI et Arsène KOBEA, ex-Directeurs du LAPA-MF (*Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de Mécanique des Fluides*), d'avoir grandement participé à ma formation dans le domaine de la Physique de l'Atmosphère.

Je remercie mon directeur de thèse, Professeur Angora AMAN, qui m'a guidé depuis le mémoire de Master 2, de m'avoir accepté dans son équipe *Interaction Océan - Atmosphère* et de m'avoir proposé un sujet aux grands enjeux environnementaux. Merci encore pour votre disponibilité pendant ces longues années où j'ai pu vous faire part de mes résultats, poser de nombreuses questions, et pour les directives que vous m'avez données.

Je tiens à gratifier les éminents membres du jury de cette thèse de ma profonde reconnaissance pour le temps qu'ils ont consacré à l'examen de ce manuscrit. Tout d'abord, j'adresse une mention spéciale au Professeur Abé Delfin OCHOU pour sa disponibilité, sa simplicité et pour son accessibilité mais également pour avoir accepté de présider le jury de soutenance de ma thèse. Mes chaleureux remerciements vont également à mes deux rapporteurs de thèse : Docteur DIBI N'Da Hyppolite (Maître de Conférences) et Docteur TCHETCHE Yao (Maître de Conférences) pour leurs apports très positifs sur le document de thèse. Je remercie également le Docteur YEO Napari Elisée (Maître de Conférences), d'avoir accepté de participer à ce jury de thèse, en tant qu'examineur. Merci également à M. DUCLOS Ody-Marc (Vice-Président de la Fondation Cœur Vert) d'avoir trouvé un temps pour participer à ce jury de thèse en tant que membre invité et d'avoir mis à notre disposition les informations sur les sites reboisés (les dates de reboisement, les nombres de plants mis en terre, la localisation géographique des sites...) et d'avoir donné certaines orientations concernant ce sujet de thèse.

C'est un honneur pour moi d'avoir accepté d'être avec nous en tant que membre invité à ce jury.

Je remercie tout le personnel enseignant et le personnel administratif de l'UFR-SSMT (*Unité de Formation et de Recherche Sciences des Structures de la Matière et de Technologie*).

Je voudrais particulièrement remercier tous les enseignants-chercheurs, chercheurs et le personnel administratif qui ont contribué à mon initiation à la recherche scientifique de notre UFR.

Je remercie aussi les amis qui, même à distance, ont toujours les bons mots pour me remonter le moral, apporter leur soutien et communiquer leur bonne humeur. Merci à Kouacou BOSSON de m'avoir accompagné dans la gestion de mes démarches administratives. Merci à Dr Elysée TOUALY, BENOÛ Bi Martial, BEUGRE Jaurès, Dr KONE Daouda, Dr Josée NGBESSO.

Merci également à l'ensemble du personnel de l'ASECNA COTE d'IVOIRE, aux collègues de la Division Météorologie de l'EAMAC. Un merci à Dr ACKHA Jean-Baptiste, AMOUIIN Kouame Bah Joel Anicet, KONE Diakaria pour leurs encouragements.

Les derniers remerciements vont à ma famille GORE toute entière pour son soutien. A mon épouse Tatiana ASSIRY et à mes enfants Kyllan-Maël GORE, Melec-Ethan GORE, Loïc Melechi GORE pour leur patience.

Olivier GORE, vous dit « **Un grand MERCI !** »

RESUME

Le contexte environnemental du Sahel aux cours des années 1970, 1980 et 1990 a été marqué par des épisodes de sécheresse. Ces périodes de sécheresses sévères ont profondément affecté la population ainsi que les économies et les écosystèmes de cette région. Au regard de ce désastre, l'Union Africaine a lancé en 2007 un programme panafricain, l'Initiative de la Grande Muraille Verte pour le Sahara et le Sahel (IGMVSS), pour inverser le processus de la dégradation des terres et de la désertification. Ce programme vise à ériger un mur d'arbres s'étendant de Dakar à Djibouti. Depuis 2006, des campagnes de reboisement continues ont été menées dans le domaine soudano-sahélien du Sénégal et dans d'autres pays de la Grande Muraille Verte (GMV). Quinze ans après le début des campagnes de reboisement conduites dans les régions soudano-sahéliennes du Sénégal, nous avons jugé important de faire le point à travers cette thèse. Cette étude a pour objectif général de contribuer à une meilleure compréhension de l'impact du reboisement sur les paramètres climatiques dans le cas de la Grande Muraille Verte du Sénégal après plus de quinze (15) années d'effort de reboisement.

Cette étude a permis de mettre en évidence un changement de dynamique du climat localisé à la fin de la décennie 1990, quelles que soient les approches et les méthodes statistiques utilisées (calculs d'anomalies, détection de ruptures par les tests de Pettitt, de Buishand et le test bayésien BEAST, transformée en Ondelettes). Ensuite, l'analyse comparée de l'évolution des paramètres climatiques (précipitations CHIRPS, humidité du sol NOAA-CPC, évapotranspirations GLEAM) et des indices de végétation (NDVI, VHI de NOAA-CDR-AVHRR et NOAA-STAR) a été explorée sur les périodes 2000–2008 (avant reboisement) et 2009–2020 (après reboisement). Après reboisement, les analyses montrent des hausses significatives de l'activité végétative (+2 à 8%), des précipitations (+2 à 8%), de l'humidité du sol (+25 à 54%) et de l'évapotranspiration réelle (+2 à 12%). L'analyse spatiotemporelle du NDVI met en évidence une évolution positive et significative du couvert végétal sur l'ensemble des sites reboisés et une régression de l'activité végétative sur les sites non reboisés.

La dynamique de l'occupation du sol montre que le reverdissement des différentes localités observées au cours des décennies entre 2000 et 2020 est due à l'accroissement des superficies des savanes arborées et arbustives et les zones de cultures (entre +3 et 11,5%). Cependant, certains sites non reboisés présentent une tendance inverse malgré une pluviométrie normale. Cette dynamique a permis de séquestrer 5,8 millions de tonnes de carbone. À travers cette étude, il apparaît que le stockage de carbone devient significatif 8 à 10 ans après le début du reboisement.

Enfin, les simulations réalisées avec le modèle RegCM, couplé avec les schémas de surfaces BATS1E et CLM4.5, montrent que le reboisement peut contribuer à augmenter les quantités de pluie, le nombre de jours de pluie sur les zones reboisées et pourrait avoir un impact sur des régions éloignées. Ces résultats de simulation confirment l'hypothèse selon laquelle le reboisement favorise la pluviométrie sur les sites reboisés et au-delà.

Mots-clés : *Grande Muraille Verte, Indice de végétation, Précipitations, Humidité du sol, Evapotranspiration, Occupation du sol, Séquestration du Carbone, Modèle Climatique Régional RegCM-NH.*

ABSTRACT

The environmental context in the Sahel during the 1970s, 1980s and 1990s was marked by episodes of drought. These periods of severe drought profoundly affected the population, economies and ecosystems of the region. In light of this disaster, in 2007 the African Union launched a pan-African program, the Great Green Wall for the Sahara and Sahel Initiative (GGWSSI), to reverse land degradation and desertification, with the aim of erecting a wall of trees stretching from Dakar to Djibouti. Since 2006, ongoing reforestation campaigns have been carried out in the Sudano-Sahelian region of Senegal and in other Great Green Wall (GGW) countries. Fifteen years after the start of reforestation campaigns in the Sudano-Sahelian regions of Senegal, we felt it important to take stock through this thesis. The general aim of this study is to contribute to a better understanding of the impact of reforestation on climatic parameters in the case of Senegal's Great Green Wall after more than fifteen (15) years of reforestation effort.

This study revealed a localized change in climate dynamics at the end of the 1990s, regardless of the statistical approaches and methods used (anomaly calculations, break detection by Pettitt, Buishand and Bayesian BEAST tests, Wavelet transform). Next, the comparative analysis of changes in climatic parameters (precipitation CHIRPS, soil moisture NOAA-CPC, evapotranspiration GLEAM) and vegetation indices (NDVI, VHI from NOAA-CDR-AVHRR and NOAA-STAR) was explored over the periods 2000-2008 (before reforestation) and 2009-2020 (after reforestation). After reforestation, analyses show significant increases in vegetative activity (+2 to +8%), precipitation (+2 to 8%), soil moisture (+25 to 54%) and actual evapotranspiration (+2 to 12%). Spatio-temporal analysis of NDVI shows a significant positive change in vegetation cover on all reforested sites, and a regression in vegetation activity on non-reforested sites.

Land cover dynamics show that the greening of various localities observed over the decades between 2000 and 2020 is explained to an increase in the surface area of tree and shrub savannas and cultivated areas (between +3 and 11.5%). However, some non-reforested sites showed an opposite trend despite normal rainfall. This dynamic has sequestered 5.8 million tons of carbon. This study shows that carbon storage becomes significant 8 to 10 years after the start of reforestation.

Finally, simulations carried out with the RegCM model, coupled with the BATS1E and CLM4.5 surface schemes, show that reforestation can contribute to increasing rainfall amounts and the number of rainy days on reforested areas, and could have an impact on remote regions. These simulation results confirm the hypothesis that reforestation promotes rainfall on reforested sites and beyond.

Keywords: *Great Green Wall, Vegetation index, Precipitation, Soil moisture, Evapotranspiration, Land Cover-Land Use, Carbon sequestration, Regional Climate Model RegCM-NH.*

TABLES DES MATIERES

DEDICACE	i
REMERCIEMENTS	ii
RESUME	iv
ABSTRACT	v
TABLES DES MATIERES.....	vi
LISTE DES ABREVIATIONS	xi
LISTE DES FIGURES	xiii
LISTE DES TABLEAUX.....	xvii
INTRODUCTION GENERALE.....	1
Partie 1 :.....	7
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE ET METHODOLOGIE.....	7
Chapitre I : Revue bibliographique.....	8
I.1. Généralités sur la zone sahélienne.....	9
I.1.1. Climat sahélien et Mousson ouest-africaine	10
I.1.2. Evolution de la pluviométrie dans le Sahel	12
I.2. L’initiative de la Grande Muraille Verte pour le Sahara et le Sahel (IGMVSS).....	16
I.2.1. Concept de la Grande Muraille Verte.....	16
I.2.2. Objectifs et impacts attendus de la Grande Muraille Verte.....	16
Chapitre II : Zone d’étude, données et méthodologie	20
Introduction	21
II.1. Présentation de la zone d’étude	21
II.1.1. Localisation et de la Grande Muraille Verte du Sénégal.....	21
II.1.2. La pluviométrie	24
II.1.3. La végétation.....	27
II.1.4. Les sols	28
II.1.5. L’occupation des sols	29
II.2. Données utilisées	31
II.2.1. Données de suivi du couvert végétal.....	31

II.2.1.1.	Les indices de végétation : Indice de Végétation par Différence Normalisé (NDVI) et Indice de Santé de la Végétation (VHI)	31
II.2.1.2.	Données d'occupation des sols « Land cover »	32
II.2.2.	Données climatiques.....	34
II.2.2.1.	Données de Précipitations (CHIRPS).....	34
II.2.2.2.	Données d'humidité du sol (NOAA-CPC Soil moisture).....	35
II.2.2.3.	Données d'évapotranspiration (GLEAM).....	35
II.2.3.	Le modèle climatique régional RegCM4 (Regional Climate Model).....	35
II.2.3.1.	Présentation du modèle climatique RegCM4.7	35
II.2.3.2.	Présentation des schémas de surface utilisés.....	36
II.2.4.	Synthèse des jeux de données	39
II.3.	Méthodologie.....	40
II.3.1.	Analyses descriptives	40
II.3.1.1.	Calculs de l'anomalie et de tendances	40
II.3.1.2.	Détection de ruptures par l'approche statistique (test de Pettitt, test de Buishand et test bayésien BEAST).....	42
II.3.2.	Analyses spectrales	46
II.3.3.	Cartographie et dynamique de l'Occupations des sols - Analyse diachronique.....	47
II.3.4.	Estimation du stockage de carbone de la végétation.....	48
II.3.5.	Calcul de l'incertitude associée à la séquestration de carbone	49
II.3.6.	Comparaison de la dynamique des séries temporelles avant et après reboisement.	50
II.3.7.	Présentation et évaluation des résultats des simulations RegCM-BATSE et RegCM-CLM4.5.....	52
II.3.7.1.	Hypothèses initiales, paramétrage et limites de la modélisation.....	52
II.3.7.2.	Description des expériences réalisées.....	54
II.3.7.3.	Indices de précipitations - Analyse fréquentielle des jours pluvieux	56
II.3.7.4.	Évaluation des sorties de modèle - Outils statistiques (Biais, R ² , RMSE et RRMSE).....	57
II.3.8.	Traçabilité des résultats - Flux de traitement des données	58
	Conclusion partielle	60
	Partie 2 :.....	61
	RESULTATS ET DISCUSSION	61
	Chapitre III.....	62
	Dynamique du couvert végétal, de l'occupation du sol et des paramètres climatiques dans la zone de la Grande Muraille Verte du Sénégal	62

Introduction	63
III.1. Dynamique du couvert végétal et des paramètres climatiques dans la zone de la Grande Muraille Verte du Sénégal de 1981 à 2020.....	63
III.1.1. Analyse de l'évolution du couvert végétal au sein de la GMV du Sénégal de 1982 à 2020.....	63
III.1.1.1. Dynamique spatiale de l'état de santé de la végétation au Sénégal	63
III.1.1.2. Evolution temporelle du couvert végétal au sein de la GMV de 1982 à 2020	66
III.1.1.3. Statistique de l'évolution de la végétation sur les différentes périodes d'évolution.....	68
III.1.2. Analyse de l'évolution de la pluviométrie au sein de la GMV du Sénégal.....	71
III.1.2.1. Tendances et variabilité des précipitations de 1981 à 2020	71
III.1.2.2. Statistiques de l'évolution de la pluviométrie de 1981 à 2020	73
III.1.2.3. Dynamique des pluies hors saison de 1981 à 2020.....	74
III.1.3. Analyse en ondelette et recherche de modes d'évolution du couvert végétal et de la pluviométrie au sein de la GMV du Sénégal	77
III.1.3.1. Signaux mensuels des séries NDVI de janvier 1982 à décembre 2020	77
III.1.3.2. Signaux mensuels des séries de précipitations de janvier 1981 à décembre 2020.....	78
III.1.3.3. Modes de variabilités des anomalies mensuelles des séries d'activités de végétation et de précipitations de 1981 à 2020	81
III.1.4. Analyse des ruptures des séries d'indices de végétation et de paramètres climatiques aux échelles annuelle et saisonnière au sein de la GMV du Sénégal.....	83
III.1.4.1. Analyse des ruptures par le test de Pettitt.....	83
III.1.4.2. Analyse des ruptures par le test bayésien BEAST	89
III.1.5. Analyse comparée des évolutions interannuelle et intra saisonnière de 2000 à 2020 du couvert végétal et les paramètres climatiques au sein de la GMV du Sénégal	93
III.1.5.1. Tests de normalités des séries temporelles de végétation et paramètres climatiques.....	93
III.1.5.2. Evolution interannuelle du couvert végétal et les paramètres climatiques..	94
III.1.5.3. Evolution intra saisonnière du couvert végétal et les paramètres climatiques de 2000 à 2020.....	98
III.1.5.4. Evolution de la relation dynamique de la végétation et paramètres climatiques dans la GMV-Sénégal	101
III.1.6. Discussion	104
III.1.7. Synthèse.....	108
III.2. Dynamique de l'occupation du sol dans la zone de la grande muraille du Sénégal de 1992 à 2020.....	109

III.2.1. Analyse de l'évolution de l'occupation du sol au sein de la GMV du Sénégal de 1992 à 2020.....	111
III.2.1.1. Commune de Syer (Louga).....	111
III.2.1.2. Commune de Tèssékéré (Louga)	115
III.2.1.3. Commune de Loughéré-Thioly (Matam)	118
III.2.1.4. Commune de Ballou (Tambacounda)	121
III.2.2. Discussion	125
III.2.2.1. Dégradation du couvert végétal entre 1992 et 2000.....	125
III.2.2.2. Reverdissement du couvert végétal après les années 2000	126
III.2.2.3. Impact du reboisement et des pratiques agroforesteries sur le reverdissement du couvert végétal.....	127
III.2.3. Synthèse.....	128
Conclusion partielle	128
Chapitre IV	130
Évaluation du carbone séquestré par les sites de la Grande Muraille Verte au Sénégal et modélisation de l'impact du reboisement sur le climat local	130
Introduction	131
IV.1. Dynamique de la séquestration du carbone du sol des sites de la grande muraille verte du Sénégal de 1992 à 2020	132
IV.1.1. Analyse de l'estimation du stockage de carbone au sein des sites de la GMV du Sénégal de 1992 à 2020	132
IV.1.2. Analyse de la dynamique de séquestration de carbone de 2000 à 2020	135
IV.1.2.1. Analyse de l'évolution des anomalies standardisées de séquestration de carbone de 2000-2020.....	135
IV.1.2.2. Analyse des ruptures des séries de stockage de carbone par les tests de Buishand et Bayésien BEAST de 2000–2020.....	137
IV.1.3. Estimation de la quantité de carbone séquestrée après reboisement de la GMV... ..	139
IV.1.4. Discussion	140
IV.1.4.1. Comparaison des estimations de la séquestration du carbone des sites de la GMV avec les résultats d'autres régions.....	140
IV.1.4.2. Dynamique du stockage de carbone organique des sols	141
IV.1.4.3. Impacts du reboisement sur le stockage de carbone organique des sols ...	143
IV.1.5. Synthèse.....	145
IV.2. Modélisation de l'impact du reboisement sur quelques paramètres climatiques.....	146
IV.2.1. Validation et évaluation des simulations.....	146

IV.2.2. Analyse de l'impact du reboisement de la GMV-Sénégal sur les précipitations	150
IV.2.2.1. Evaluation de l'impact de la Grande Muraille Verte sur la pluviométrie moyenne au Sénégal	150
IV.2.2.2. Analyse de la dynamique du nombre de jours pluvieux au Sénégal et dans la zone de la GMV	153
IV.2.3. Evaluation de l'impact de la Grande Muraille Verte sénégalaise sur l'humidité relative et l'évapotranspiration	158
IV.2.3.1. Impact de la Grande Muraille Verte sénégalaise sur l'humidité relative	158
IV.2.3.2. Impact de la Grande Muraille Verte sénégalaise sur l'évapotranspiration	160
IV.2.4. Evaluation des performances des différentes simulations RegCM-CLM4.5 et RegCM-BATS1E	164
IV.2.5. Synthèse	168
Conclusion partielle	168
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	170
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	177
Articles tirés de la thèse	192
A. Recent Vegetation Cover Dynamics and Climatic Parameters Evolution Study in the Great Green Wall of Senegal.	192
B. Estimation of the Carbon Sequestration Dynamics of Senegal's Great Green Wall Based on Land Cover over the Past Three Decades.	192

LISTE DES ABREVIATIONS

AMMA :	Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine
ANSD :	Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie
AVHRR:	Advanced Very High-Resolution Radiometer
BATS:	Biosphere Atmosphere Transfer Scheme
BEAST:	Bayesian Estimator of Abrupt Change, Seasonal Change and Trend
CCI-LC:	Climate Change Initiative-Land Cover
CCM:	Community Climate Model
CDR:	Climate Data Record Program
CEN-SAD :	Communauté des Etats Sahélo-Sahariens
CHIRPS:	Climate Hazards Group Infra-Red Precipitation with Stations
CILSS :	Comité Inter-états de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel
CLM:	Community Land Model
ENSO :	El Niño and the Southern Oscillation (El Niño-Oscillation Australe)
ESA:	European Space Agency (Agence Spatiale Européenne)
FAO :	Food and Agriculture Organization of United Nations (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture)
FIT:	Front Inter-Tropical
GLCC:	Global Land Cover Characterization
GLEAM:	Global Land Evaporation Amsterdam Model
GMV :	Grande Muraille Verte
ICTP :	International Center for Theoretical Physics
IGMVSS :	Initiative de la Grande Muraille Verte pour le Sahara et le Sahel
JJA:	June-July-August
JJAS:	June-July-August-September
LAI :	Leaf area index
LCCS :	Land Cover Classification System (système de classification de la couverture terrestre)
LCLU:	Land Cover-Land Use
LOESS:	Locally Estimated Scatterplot Smoothing
LSS:	Land Surface Schemes
MAO :	Mousson d'Afrique de l'Ouest
MM5:	Mesoscale Model Version 5
NCAR:	National Center for Atmospheric Research
NCEP :	National Center for Environmental Prediction
NDVI :	Normalized Difference Vegetation Index (Indice de Végétation par Différence Normalisée)
NOAA:	National Oceanic and Atmospheric Administration
ODD :	Objectifs de Développement Durable
OMM :	Organisation Météorologique Mondiale
RCM :	Regional Climate Model
RegCM:	Regional Climate Model
RNA :	Régénération Naturelle Assistée
SM:	Soil Moisture

SPI :	Standardized Precipitation Index (Indice de Précipitations Standardisé)
UA :	Union Africaine
UNCCD :	United Nations Convention to Combat Desertification (Convention des Nations Unies sur la Lutte Contre la Désertification)
VAI :	Vegetation Anomaly Index (Indice d'Anomalie de Végétation)
VHI :	Vegetation Health Index (Indice de Santé de la Végétation)
VHP :	Vegetation Health Products
VIIRS :	Visible Infrared Imager Radiometer Suite
ZCIT :	Zone de Convergence Inter-Tropicale

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Schéma conceptuel des objectifs et questions scientifiques de la thèse	6
Figure I.1: Localisation du Sahel	9
Figure I.2: Diagramme de Hovmöller des pluies quotidiennes (TRMM, 1998-2012) lissées par une moyenne mobile de 15 jours, et moyennées zonalement entre 10°W et 10°E.....	9
Figure I.3: Schéma des flux de surface, de la pression atmosphérique (en hPa) et localisation de l'Equateur météorologique (FIT).....	12
Figure I.4: Evolution des anomalies standardisées de précipitations sur le Sahel de 1900 à 2012	13
Figure I.5: Précipitations annuelles moyennes et évolution des anomalies standardisées de précipitations sur la période 1973-2010, région du Ferlo (Sénégal), région du Gourma (Mali) et région du Fakara (Niger).....	14
Figure II.1: Localisation de la zone d'étude et de la trace de la GMV au Sénégal.	22
Figure II.2: Distributions spatiales des précipitations a) moyenne annuelle et b) moyennes saisonnières du Sénégal sur la période 1991-2020.....	25
Figure II.3: Diagrammes climatiques des localités de Syer, Tèssékéré (Louga), Loughéré-Thioly (Matam) et Ballou (Tambacounda), réalisés à partir des données de précipitations CHIRPS et de Température	26
Figure II.4: Illustration de la végétation ouverte composée de graminées annuelles formant un tapis herbacé continu, typique de la savane arbustive dans la réserve reboisée de Koli Alpha (Louga)	28
Figure II.5: Carte des types de sol du Sénégal.....	29
Figure II.6: Carte d'occupation des sols du Sénégal.....	30
Figure II.7: Schéma illustrant les utilisations et applications des données climatiques et d'occupation des sol d'ESA-CCI	34
Figure II.8: Topographie de l'Afrique de l'Ouest et présentation du domaine simulé (en Bleu) et le Sénégal (encadré rouge).....	54
Figure II.9: Codes des classes d'occupation du sol du domaine simulé a) non reboisé (couverture du sol standard de GLCC) et b) période avec reboisement (zone reboisée GMV présence de forêt mixte).....	55
Figure II.10: Schéma synthétique de la chaîne de traitement des données (de l'acquisition des données aux résultats)	59
Figure III.1: Climatologie spatiale annuelle de l'indice de végétation (NDVI) au Sénégal (S : SYER ; T : TESSEKERE ; L : LOUGHERE ; B : BALLOU) sur la période 1991-2020	64
Figure III.2: Climatologie spatiale mensuelle de l'indice de végétation (NDVI) au Sénégal sur la période 1991-2020	65
Figure III.3 : Evolution des anomalies de l'indice de végétation (VAI) entre 1982-2020 sur les sites de GMV Sénégal (Syer, Tèssékéré, Loughéré-Thioly et Ballou)	67
Figure III.4: Evolution mensuelle de l'activité de végétation (NDVI) dans les localités de Syer (Louga), Tèssékéré (Louga), Loughéré-Thioly (Matam) et Ballou (Tambacounda) Sénégal de 1982 à 2020	69
Figure III.5: Evolution annuelle de l'indice NDVI dans les localités de Syer, Tèssékéré, Loughéré-Thioly et Ballou de 1982 à 2020.....	70
Figure III.6: Evolution des anomalies de précipitations dans les localités de Syer, Tèssékéré, Loughéré Thioly et Ballou GMV-Sénégal de 1981 à 2020	72

Figure III.7: Evolution des cumuls annuels des pluies hors saison de Syer, Téssékéré (Louga), Loughéré-Thioly (Matam), Ballou (Tambacounda) de 1981 à 2020.....	74
Figure III.8: Evolution mensuelle des pluies hors saison de Loughéré-Thioly (Matam) de 1981 à 2020	76
Figure III.9: Evolution mensuelle des pluies hors saison de Ballou (Tambacounda) de 1981 à 2020	76
Figure III.10: Spectres de l'analyse en ondelettes continues et de puissances de l'indice NDVI et des précipitations de Téssékéré (Louga), trait noir fin : cône d'influence; traits noirs gras : limite de confiance 95%.....	79
Figure III.11: Spectres de l'analyse en ondelettes continues et de puissances de l'indice NDVI et des précipitations de Syer (Louga), idem III.10	79
Figure III.12: Spectres de l'analyse en ondelettes continues et de puissances de l'indice NDVI et des précipitations de Loughéré-Thioly (Matam), idem III.10	80
Figure III.13: Spectres de l'analyse en ondelettes continues et de puissances de l'indice NDVI et des précipitations de Ballou (Tambacounda), idem III.10	80
Figure III.14: Spectres de l'analyse en ondelettes continues de l'indice SPI localité Syer, Téssékéré (Louga), Loughéré-Thioly (Matam), Ballou (Tambacounda), trait noir fin : cône d'influence; traits noirs gras : limite de confiance 95%	82
Figure III.15: Spectres de l'analyse en ondelettes continues de l'indices VAI localité Syer, Téssékéré (Louga), Loughéré-Thioly (Matam), Ballou (Tambacounda), Idem III.14.....	82
Figure III.16: Evolution interannuelle :a) des Précipitations, c) de l'indice NDVI, e)de l'humidité du sol et le test U de Pettitt (b, d, f) de Téssékéré sur la période 1981-2020	88
Figure III. 17: Décomposition BEAST des séries annuelles de (a) Précipitations, (b) NDVI et (c) Humidité du sol de 1981-2020 – Téssékéré (Louga)	92
Figure III.18: Distributions spatiales de la végétation avant et après le reboisement et la différence (%) entre les deux périodes 2009-2020 et 2000-2008, région significative avec test de significativité $p=0,01$ (test de Student)	97
Figure III.19: Cycle saisonnier des indices de végétation NDVI et VHI des localités de Téssékéré, Syer (Louga), Loughéré-Thioly (Matam), Ballou (Tambacounda) GMV-Sénégal pour les périodes 2000-2008 et 2009-2020.....	99
Figure III.20: Cycle saisonnier des précipitations et humidité du sol des localités de Téssékéré, Syer (Louga), Loughéré-Thioly (Matam), Ballou (Tambacounda) GMV-Sénégal pour les périodes 2000-2008 et 2009-2020.....	100
Figure III.21: Cycle saisonnier de l'évapotranspiration réelle et évapotranspiration potentielle des localités de Téssékéré, Syer (Louga), Loughéré-Thioly (Matam), Ballou (Tambacounda) GMV-Sénégal pour les périodes 2000-2008 et 2009-2020	100
Figure III.22: Corrélations spatiales entre l'indice NDVI et les précipitations pour les périodes 2000-2008 ; 2009-2020 et 2000-2020 sur le Sénégal et les localités de Syer, Téssékéré (Louga) et Loughéré-Thioly (Matam), les pointillés bleus indiquent les zones significatives à $p=0,05$	103
Figure III.23: Pépinière de la Grande Muraille Verte du site de Syer (Louga) Sénégal.....	110
Figure III.24 : Vue aérienne des activités de plantation à Loughéré-Thioly (Matam) Grande Muraille Verte Sénégal	110
Figure III.25 : Vue aérienne de parcelle reboisée à Téssékéré (Louga) Grande Muraille Verte Sénégal.....	111
Figure III.26: Evolution des classes d'occupation du sol à Syer de 1992 à 2020.....	113
Figure III.27: Evolution de l'Occupation du sol de la commune de Syer de 1992 à 2020....	114
Figure III.28: Evolution des classes d'occupation du sol de Téssékéré 1992 à 2020.	116

Figure III.29: Evolution de l'Occupation du sol de la commune de Tessékéré de 1992 à 2020	117
Figure III.30: Evolution des classes d'occupation du sol de Loughéré-Thioly 1992 à 2020.....	119
Figure III.31: Evolution de l'Occupation du sol de la commune de Loughéré-Thioly de 1992 à 2020	120
Figure III.32: Evolution des classes d'occupation du sol de Ballou de 1992 à 2020.....	122
Figure III.33: Evolution de l'occupation du sol de la commune de Ballou de 1992 à 2020	123
Figure IV.1: Evolution des stocks moyens de carbone (t.C/ha) dans les sols de a) Syer, b)Téssékéré (Louga), c)Loughéré-Thioly (Matam) et d)Ballou (Tambacounda) de 1992 à 2020	133
Figure IV.2: Évolution des anomalies de stock de carbone sur les sites de Syer, Téssékéré, Loughéré-Thioly et Ballou au GMV- Sénégal de 2000 à 2020.	136
Figure IV.3: Évolution annuelle du stockage de carbone et du test de Buishand de 2000 à 2020 dans les régions de Syer, Téssékéré et Loughéré-Thioly.....	138
Figure IV.4: Gains et pertes de carbone séquestré à Syer, Téssékéré, Loughere-tioly et Ballou après reboisement.....	140
Figure IV.5: Distribution spatiale des précipitations moyennes annuelles sur la période 2000-2008 au Sénégal, pour les données d'observations a) CHIRPS, b) CRU et les données de simulations c) RegCM -BATS, d)RegCM-CLM4.5.	147
Figure IV.6: Cycle annuel des précipitations dans les localités de Syer, Téssékéré (Louga), Loughéré-Thioly (Matam) et Ballou (Tambacounda) sur la période 2000-2008.	148
Figure IV.7: Précipitations moyennes annuelles (mm) RegCM-BATSE sur le Sénégal en : a) 2012, b) 2016, c) 2020, d) moyenne 2000-2008, et évolutions entre les années e)2012, f)2016, g)2020 et la période non reboisée.....	152
Figure IV.8: Précipitations moyennes annuelles (mm) RegCM-CLM4.5 sur le Sénégal : a) 2012, b) 2016, c) 2020, d) moyenne 2000-2008, et évolutions entre les années e) 2012, f) 2016, g) 2020 et la période non reboisée.	153
Figure IV.9: Nombre de jours de pluies très intenses (R20mm, RegCM-CLM4.5) moyennes pour les années et périodes : a) 2012, b) 2016, c) 2020, d) moyenne 2000-2008, et évolutions entre les années e) 2012, f) 2016, g) 2020 et la période non reboisée (avec test de Student, avec une confiance de 95%).....	154
Figure IV.10: Evolutions et tendances des jours de pluie (R1mm, R10mm, R20mm) pour les localités de Syer, Téssékéré (Louga), Loughéré-Thioly (Matam) et Ballou (Tambacounda) de 2000 à 2020 pour la simulation RegCM-CLM4.5.	157
Figure IV.11: Humidité relative moyenne annuelle (%) RegCM-CLM4.5 sur le Sénégal : a) 2012, b) 2016, c) 2020, d) moyenne 2000-2008, et évolutions entre les années e) 2012, f) 2016, g) 2020 et la période non reboisée.	159
Figure IV.12: Humidité relative moyenne (%) pour les périodes : a) période avant reboisement, b) après reboisement, et c) différence entre les périodes avant et après reboisement, pour RegCM-CLM4.5.....	160
Figure IV.13: Evapotranspiration moyenne annuelle (mm) RegCM-CLM4.5 sur le Sénégal : a) 2012, b) 2016, c) 2020, d) moyenne 2000-2008, et évolutions entre les années e) 2012, f) 2016, g) 2020 et la période non reboisée.	162
Figure IV.14: Evolutions et tendances de l'évapotranspiration moyenne annuelle (mm) pour les localités de Syer, Téssékéré (Louga), Loughéré-Thioly (Matam) et Ballou (Tambacounda) de 2000 à 2020 pour les simulations RegCM-CLM4.5 et RegCM-BATS1E.....	163

Figure IV.15: Evolutions et tendances des précipitations et évapotranspiration annuelles des données d'observations (CHIRPS, GLEAM) et simulées (RegCM-BATSE et RegCM-CLM4.5) des localités de la GMV sur la période 2000-2020167

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1: Réalisations des activités des pays de la Grande Muraille Verte	17
Tableau II.1: Régions, Départements et Communes traversées par la GMV du Sénégal et sites retenus pour notre étude.....	22
Tableau II.2: Etat de mise en œuvre de la GMV du Sénégal de 2008 à 2015.....	23
Tableau II.3: Campagne et résultats de reboisement de la GMV au Sénégal par la Fondation Cœur Vert de 2006 à 2019	23
Tableau II.4 : Comparaison des données NDVI et VHI	32
Tableau II.5: Comparaison des configurations des schémas de surfaces BATS1E et CLM4.5 dans le modèle RegCM 4.7.....	38
Tableau II.6 : Synthèse des données de végétation et de paramètres climatiques.....	39
Tableau II.7: Interprétation de l'indice SPI	41
Tableau II.8: Gravité de la sécheresse selon les seuils de l'indice VHI	41
Tableau II.9: Probabilité associée aux tests de Pettitt et de Buishand	42
Tableau II.10: Valeurs moyennes de stocks de carbone du sol issus des données bibliographiques de la région (Sénégal)	50
Tableau II.11: Démarche de choix de tests de comparaisons des moyennes et de méthodes de calcul de coefficients de Corrélation	51
Tableau II.12: Paramétrage du modèle RegCM4.7 sur le domaine de simulation.....	53
Tableau II.13: Types de couverture du sol utilisés	56
Tableau II.14: Différents indices de précipitations et leurs définitions	56
Tableau III.1: Statistiques mensuelles du comportement de la végétation (NDVI) des localités de Syer, Tèssékéré, Loughéré-Thioly et Ballou de GMV-Sénégal	68
Tableau III.2 : Statistiques annuelles du comportement de la végétation (NDVI) des localités de Syer, Tèssékéré, Loughéré-Thioly et Ballou de GMV-Sénégal.....	70
Tableau III.3 : Valeurs caractéristiques de la pluviométrie des localités de Syer, Tèssékéré (Louga), Loughéré-Thioly(Matam), Ballou (Tambacounda) de la GMV-Sénégal entre 1981-2020	73
Tableau III.4 : Résultat du test de Pettitt - Années de ruptures et statistiques de la Végétation (NDVI, VHI).....	85
Tableau III.5: Résultat du test de Pettitt - Années de ruptures et statistiques des Précipitations et de l'Humidité du Sol.....	86
Tableau III.6: Années de ruptures et statistiques de l'Evapotranspiration réelle et de l'Evapotranspiration potentielle	87
Tableau III.7 : Résultat du test Bayésien BEAST- Années de ruptures, probabilité d'occurrence de ruptures et pente des tendances des données annuelles de précipitations, NDVI et humidité du sol de Syer,Tèssékéré (Louga),Loughéré-Thioly (Matam) et Ballou (Tambacounda).....	90
Tableau III.8: Résultat du test Bayésien BEAST- Années de ruptures, probabilité d'occurrence de ruptures et pente des tendances des données annuelles d'évapotranspiration réelle, évapotranspiration potentielle de Syer,Tèssékéré (Louga),Loughéré-Thioly (Matam) et Ballou (Tambacounda)	91
Tableau III.9: Résultats des tests de Normalité de séries NDVI annuelle et mensuelle de la localité de Syer.....	93
Tableau III.10: Résultats des tests de Normalité de séries de Précipitations de la localité de Syer.....	93

Tableau III.11: Statistiques moyennes annuelles de l'évolution de l'activité de la végétation et des paramètres climatiques des localités de la GMV-Sénégal de 2000-2020 (Test de comparaison de moyennes de Student aux seuils $\alpha=0,05(*)$ et $\alpha=0,01(**)$).....	95
Tableau III.12: Statistiques moyennes en saison de pluie « JAS » de l'évolution l'activité de la végétation et des paramètres climatiques des localités de la GMV-Sénégal de 2000-2020 (Test de comparaison de Mann whitney-Wilcoxon aux seuils $\alpha=0,05(*)$ et $\alpha=0,01(**)$).....	96
Tableau III.13: Corrélations interannuelles entre l'indice NDVI et les Précipitations, Humidité du sol, l'évapotranspiration des localités GMV-Sénégal pour les périodes 2000-2020 ; 2000-2008 et 2009-2020 (avec les seuils $\alpha=0,05(*)$ et $\alpha=0,01(**)$)	102
Tableau III.14: Evolution des superficies, des taux d'évolution et de changement dans la commune de Syer (Louga).....	112
Tableau III.15: Evolution des superficies, des taux d'évolution et de changement dans la commune de Tèssékéré (Louga)	115
Tableau III.16: Evolution des superficies, des taux d'évolution et de changement dans la commune de Loughéré-Thioly (Matam)	118
Tableau III.17: Evolution des superficies, des taux d'évolution et de changement dans la commune de Ballou (Tambacounda).....	121
Tableau III.18: Taux d'évolution et de changement de Syer, Tèssékéré (Louga), Loughéré-Thioly (Matam), Ballou (Tambacounda).....	124
Tableau IV.1: Quantités totales de carbone séquestrées par les principales classes d'occupation et d'utilisation des sols (LCLU) à Syer, Tèssékéré, Loughéré-Thioly et Ballou de 1992 à 2020.	134
Tableau IV.2: Quantités totales de carbone stockées (t.C/an) dans les sols de Syer, Tèssékéré, Loughéré-Thioly et Ballou de 1992 à 2020.	135
Tableau IV.3: Statistiques du test de Buishand, et du test bayésien BEAST des données de stockage de carbone.....	137
Tableau IV.4: Biais, Erreur quadratique moyenne et corrélation des précipitations entre les simulations (BATS, CLM) et des données d'observations (CHIRPS et CRU) pour la période 2000 à 2008.....	149
Tableau IV.5: Statistiques moyennes annuelles de l'évolution des précipitations sur les périodes 2000-2020, avant et après reboisement des localités de la GMV-Sénégal avec le test de comparaison de moyennes de Student aux seuils $\alpha=0,05(*)$ et $\alpha=0,01(**)$	151
Tableau IV.6: Statistiques moyennes annuelles de l'évolution du nombre de jours de pluie (RegCM-CLM4.5) des périodes 2000-2020, non reboisée et reboisée avec le test de comparaison de moyennes de Student aux seuils $\alpha=0,05(*)$ et $\alpha=0,01(**)$	155
Tableau IV.7: Statistiques moyennes annuelles de l'évolution du nombre de jours de pluie (RegCM-BATS1E) des périodes 2000-2020, non reboisée et reboisée avec le test de comparaison de moyennes de Student aux seuils $\alpha=0,05(*)$ et $\alpha=0,01(**)$	156
Tableau IV.8: Statistiques moyennes annuelles de l'évolution de l'humidité relative (CLM4.5 et BATS1E) des périodes 2000-2020, avant et après reboisement avec le test de comparaison de moyennes de Student aux seuils $\alpha=0,05(*)$ et $\alpha=0,01(**)$	159
Tableau IV.9: Statistiques moyennes annuelles de l'évolution de l'évapotranspiration (CLM4.5 et BATS1E) des périodes 2000-2020, avant et après reboisement avec le test de comparaison de moyennes de Student aux seuils $\alpha=0,05(*)$ et $\alpha=0,01(**)$	161
Tableau IV.10: Erreur quadratique moyenne et corrélation des précipitations et évapotranspiration réelle entre les simulations (BATS, CLM) et des données d'observations (CHIRPS et GLEAM) pour la période 2000-2020.....	165

INTRODUCTION GENERALE

L'Afrique, continent aux écosystèmes forestiers riches et diversifiés, joue un rôle crucial dans l'équilibre écologique mondial. Avec 17 % des forêts de la planète et 31 % des zones boisées du Sahel, ces ressources naturelles sont essentielles pour des millions de personnes. Environ 60 millions d'Africains dépendent directement des forêts pour leur subsistance, tandis que plus de 60% de la population en bénéficient indirectement à travers les services écosystémiques qu'elles fournissent (FAO et PNUE 2020 ; FAO, 2021). Ces écosystèmes sont au cœur des grands défis du XXI^e siècle : atténuation des changements climatiques, préservation de la biodiversité et sécurité alimentaire. Pourtant, malgré leur importance, le couvert végétal africain subit une dégradation accélérée. Selon la FAO, l'Afrique a enregistré le taux de déforestation net le plus élevé au monde entre 2010 et 2020, avec une perte annuelle de 3,9 millions d'hectares. Cette tendance alarmante s'accompagne d'une dégradation des terres, touchant 65 % des surfaces productives, et d'une désertification qui affecte 45 % du continent. Les conséquences socio-économiques sont lourdes : perte de productivité agricole, insécurité alimentaire croissante et dépendance accrue aux importations, dont le coût dépasse 35 milliards de dollars US par an (IPBES, 2018b ; Mansourian *et al.*, 2021).

Dans ce contexte, le Sahel, région semi-aride située au sud du Sahara, apparaît comme l'une des zones les plus vulnérables aux changements climatiques et à la dégradation des terres. En effet, depuis les années 1970, le Sahel a été marqué par des sécheresses récurrentes (Nicholson *et al.*, 1993, 2001, 2013 ; Le Barbé *et al.*, 2002 ; Ali *et al.*, 2009 ; Sarr *et al.*, 2009 ; Ozer *et al.*, 2010 ; Descroix *et al.*, 2015, 2018). Cette région, autrefois verdoyante, est devenue de plus en plus aride, entraînant une perturbation des équilibres écologiques et une désertification progressive. Les épisodes de sécheresses intenses de 1972-73 et de 1983-84, par exemple, ont été qualifiées de « grandes sécheresses » et de « bouleversements climatiques les plus incontestés et le plus importants » du 20^{ème} siècle (Nicholson *et al.*, 2001 ; Le Barbé *et al.*, 2002 ; Dai *et al.*, 2004). La forte dépendance de la population sahélienne à l'agriculture pluviale et au pastoralisme rend cette région particulièrement sensible aux évolutions climatiques. La hausse des températures et la modification des régimes de précipitations exacerbent les défis déjà existants, menaçant la biodiversité, la sécurité alimentaire et le développement économique (Luxereau *et al.*, 1997 ; Dia *et al.*, 2010 ; Marega, 2016).

Face à ces enjeux, les leaders africains et la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (CNULCD, 1994), ont mis en place plusieurs plans d'action nationaux et régionaux. Parmi ceux-ci, l'« Initiative pour la Grande Muraille Verte du Sahara et du Sahel (IGMVSS) » constitue une réponse panafricaine majeure aux défis environnementaux et socio-économiques du Sahel. Inscrite dans la dynamique mondiale des Objectifs de Développement Durable (ODD), elle contribue directement à l'ODD 13 en renforçant la résilience des communautés face au changement climatique et en favorisant la

séquestration de carbone, ainsi qu'à l'ODD 15 en luttant contre la désertification, en restaurant les écosystèmes terrestres et en promouvant l'utilisation durable des terres.

En 2005, l'idée de cette initiative a émergé lors de la septième session de la Conférence des Chefs d'Etats et des Gouvernements membres de la CEN-SAD (Communauté des Etats Sahélo-Sahariens) à Ouagadougou du 1^{er} au 2 juin 2005 par les Chefs d'Etats du Nigeria (Olusegun OBASANJO) et du Sénégal (Abdoulaye WADE). En 2007, la Conférence des Chefs d'Etats et de Gouvernements de l'Union Africaine (UA), tenue les 29 et 30 janvier 2007 à Addis-Abeba, adopte l'Initiative de la Grande Muraille Verte pour le Sahara et le Sahel. L'Union Africaine endosse l'initiative qui mobilise onze (11) pays de l'espace saharo-sahélien (Sénégal, Mauritanie, Mali, Burkina Faso, Nigéria, Niger, Tchad, Soudan, Ethiopie, Erythrée et Djibouti). Le 15 mai 2008 à Tripoli, un Comité Ad Hoc, composé de l'UA, du Sénégal, de la CEN-SAD, de l'Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS) et du Comité permanent Inter-Etats de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel (CILSS), a décliné les modalités de mise en œuvre de l'IGMVSS à travers une stratégie régionale harmonisée adossée à des Plans d'Actions concrets (<https://www.grandemurailleverte.org/> ; [Dia et al., 2010 et 2012](#) ; [Mbow, 2017](#); [Diallo, 2019](#) ; [UNCCD, 2020](#) ; [Bruckmann et al., 2022](#)). À l'heure actuelle, cette initiative est mise en œuvre dans 22 pays africains (y compris les 11 pays du Sahel) et coopère avec de nombreuses organisations internationales, des instituts de recherche, la société civile et des organisations communautaires. Initialement conçue comme une barrière physique d'arbres de 7600 km reliant Dakar à Djibouti pour freiner l'avancée du désert, la Grande Muraille Verte a évolué pour inclure des objectifs plus larges : (i) lutter contre l'avancée du désert et valoriser les zones sahéliennes par une gestion durable des ressources naturelles, (ii) réduire la pauvreté dans un contexte de changement climatique, et (iii) séquestrer des millions de tonnes de carbone d'ici 2030 ([Dia et al., 2010, 2012](#); [Mbow, 2017](#); [Diallo, 2019](#); [UNCCD, 2020](#) ; [Bruckmann et al., 2022](#)), contribuant ainsi simultanément aux cibles clés des ODD 13 et ODD 15.

Le Sénégal, l'un des pays les plus engagés dans ce projet, a déjà planté plus de 18 millions d'arbres, contribuant ainsi à la restauration des terres dégradées ([UNCCD, 2020](#)). Cependant, malgré ces efforts, les études sur l'impact du reboisement de la Grande Muraille Verte sur le climat, la dynamique du couvert végétal et la séquestration du carbone restent limitées. Bien que certaines recherches aient montré une légère amélioration de la biomasse dans certaines zones ([Schucknecht et al., 2016](#)), les contributions des pratiques de reboisement et d'agroforesterie à la résilience des écosystèmes sont encore peu documentées. La présente thèse vise à combler cette lacune en étudiant notamment l'impact du reboisement sur les paramètres climatiques et la séquestration du carbone dans le cadre de la Grande Muraille Verte au Sénégal.

L'objectif de cette thèse est de contribuer à une meilleure compréhension de l'impact du reboisement sur les paramètres climatiques dans le cas de la Grande Muraille Verte du Sénégal après plusieurs années d'efforts de planting. Les réflexions autour de cet objectif ont conduit à la formulation des quatre objectifs spécifiques ci-dessous (Figure 1) :

- (i) Suivre l'évolution de la végétation et des précipitations depuis plus de quatre (04) décennies ;
- (ii) Analyser l'impact du reboisement sur les paramètres climatiques avant et après le reboisement dans les zones traversées par la Grande Muraille Verte au Sénégal ;
- (iii) Évaluer la quantité de carbone séquestrée depuis la mise en œuvre de l'initiative GMV ;
- (iv) Utiliser des modèles numériques pour analyser la contribution du reboisement sur le climat du Sénégal.

Ainsi, cette thèse tentera de répondre aux questionnements scientifiques suivants (Figure1) :

- Quels sont les différents modes d'évolutions de la végétation et des paramètres climatiques ?
- Quelles sont les principales phases et transitions ayant marqué l'évolution des précipitations et de la végétation depuis 1981 ?
- Quels liens peut-on établir entre la dynamique de la végétation et les paramètres climatiques ?
- Quelle est la part du reboisement dans l'évolution du climat (pluviométrie, humidité du sol, évapotranspirations réelle et potentielle) au Sénégal ?
- Le reboisement peut-il contribuer de manière significative à la réduction de la quantité de carbone dans l'atmosphère ?
- Par quel mécanisme le reboisement de la GMV est-il représenté en modélisation climatique ?
- Comment le climat des zones traversées par la GMV et, plus largement, celui du Sénégal, évoluerait-il en cas de succès à long terme du reboisement ?

Pour répondre aux objectifs de la thèse, ainsi qu'aux questionnements scientifiques associés, le présent manuscrit s'organise autour de quatre (4) chapitres en plus de la présente introduction générale et la conclusion générale.

Le **chapitre I** fait une description de la zone sahélienne, de l'évolution du climat sahélien et du concept de la Grande Muraille Verte Africaine pour le Sahara et le Sahel.

Le **chapitre II** est consacré à la présentation des caractéristiques de la zone d'étude, à l'ensemble des jeux de données et des différentes méthodes utilisées. Il y est décrit en particulier les acquis de la Grande Muraille Verte (GMV) au Sénégal depuis 2006. Ensuite, les caractéristiques biophysiques de la zone d'étude sont analysées, à travers l'examen du régime pluviométrique, des formations végétales, des types de sols et de l'occupation du sol. Par ailleurs, ce chapitre détaille les différents jeux de données mobilisés pour le suivi environnemental, incluant notamment les indices de végétation, d'occupation du sol, les précipitations, les données d'humidité des sols et les estimations d'évapotranspiration. La dernière section de ce chapitre est dédiée aux aspects méthodologiques spécifiques, en expliquant d'une part la démarche adoptée pour quantifier la dynamique du carbone dans les sols de la GMV, et d'autre part en décrivant le modèle utilisé ainsi que les différentes simulations effectuées pour évaluer l'impact de la Grande Muraille Verte sur le climat du Sénégal.

Le **chapitre III** porte sur l'évolution spatio-temporelle du couvert végétal, des précipitations, de l'humidité du sol, de l'évapotranspiration des sites d'étude entre 1981 et 2020 et de l'occupation du sol de 1992 à 2020. L'analyse repose principalement sur l'indice NDVI pour évaluer les variations spatio-temporelles de la végétation entre 1982 et 2020. Une attention particulière est portée à la variabilité saisonnière et interannuelle du couvert végétal et des précipitations dans la zone de la Grande Muraille Verte du Sénégal, en utilisant différentes approches méthodologiques pour identifier les tendances et les ruptures dans les séries temporelles. Ce chapitre explore également le rôle des pluies hors saison et leur éventuel lien avec les modifications locales du couvert végétal, afin de déterminer dans quelle mesure la végétation influence le régime pluviométrique. Par ailleurs, les évolutions interannuelles et intra-saisonnières récentes de la végétation et des paramètres climatiques (précipitations, humidité du sol, évapotranspiration) sont analysées. Une analyse corrélative approfondie est menée pour comprendre les relations entre le NDVI et les variables climatiques, notamment à travers les corrélations spatiales et des tests statistiques. Cette approche permet d'évaluer l'apport du reboisement sur le climat des différentes localités. Enfin, la dernière partie du chapitre (**section 2 du chapitre III**) traite de la dynamique de l'occupation et de l'utilisation du sol entre 1992 et 2020, offrant une vision intégrée des transformations du paysage et de leurs interactions avec les facteurs climatiques et anthropiques.

Au **chapitre IV**, il est question dans un premier temps d'implémenter une nouvelle approche pour l'estimation et le suivi de la séquestration du carbone dans les sols de la GMV au Sénégal (**section 1 du chapitre IV**). En utilisant les résultats de l'évolution de l'occupation

du sol du **chapitre III (section 2)**, ce chapitre présente d’abord l’estimation du stockage de carbone de chaque site d’intervention de la GMV du Sénégal de 1992 à 2020, suivi de la dynamique de séquestration de carbone de ces localités. Ensuite, l’Estimation de la quantité de carbone séquestrée avant et après reboisement de la GMV est analysée. Enfin, la **section 2** du **chapitre IV** utilise un modèle climatique pour comprendre l’impact du reboisement sur les précipitations au Sénégal. Ce dernier objectif simule une modification du couvert végétal afin d’analyser les mécanismes par lesquels la reforestation pourrait contribuer à une augmentation des hauteurs des pluies au Sénégal et en particulier dans les zones reboisées.

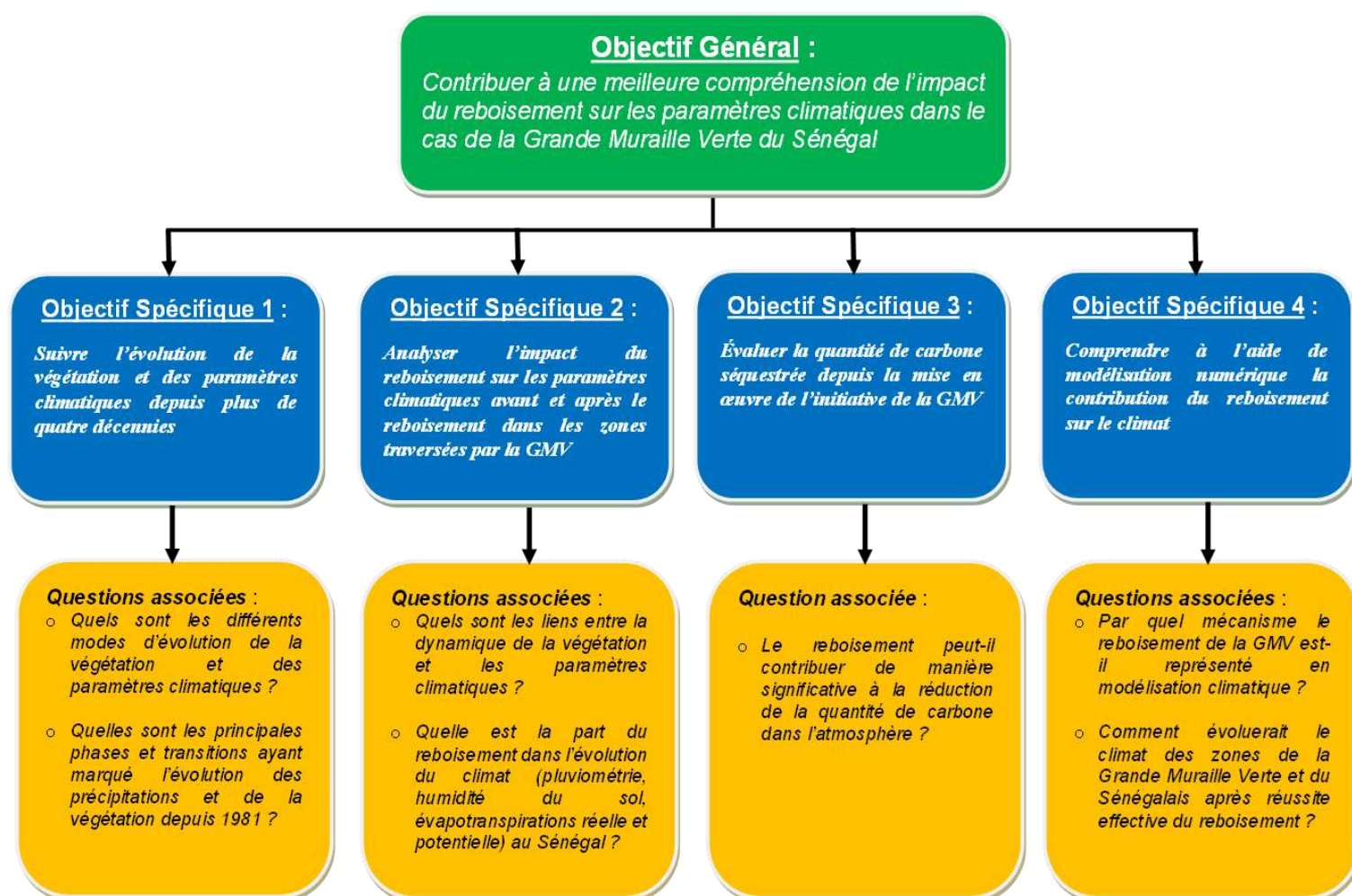


Figure 1: Schéma conceptuel des objectifs et questions scientifiques de la thèse

Partie 1 :

**SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE
ET METHODOLOGIE**

Chapitre I : Revue bibliographique

I.1. Généralités sur la zone sahélienne

Le Sahel est situé dans le domaine climatique de transition compris entre la zone saharienne au nord et la zone soudanienne au sud. De l'ouest vers l'est, la bande Sahélienne s'étend de l'océan Atlantique à la mer Rouge, recouvrant une dizaine de pays. Cette zone est délimitée en fonction de la pluviométrie moyenne dont les seuils sont généralement définis par les isohyètes 100-200 mm/an pour la limite nord et les isohyètes 600-700 mm/an pour la limite sud (Le Houerou, 1997) ou 150 mm à 600 mm (Hiernaux *et al.*, 2006). Cependant, ces isohyètes moyens varient en fonction de la période de référence considérée (Lebel *et Ali.*, 2009). Géographiquement, cette bande correspond à la région qui traverse le continent Africain entre les 12 et 20 degrés de latitude nord (Figure I.1). Le Sahel est souvent subdivisé en trois sous domaines, à savoir le Sahel ouest, le Sahel central et le Sahel est. Le Sahel ouest s'étend de l'ouest du Niger au Sénégal en passant par le Burkina Faso, le Mali et la Mauritanie.

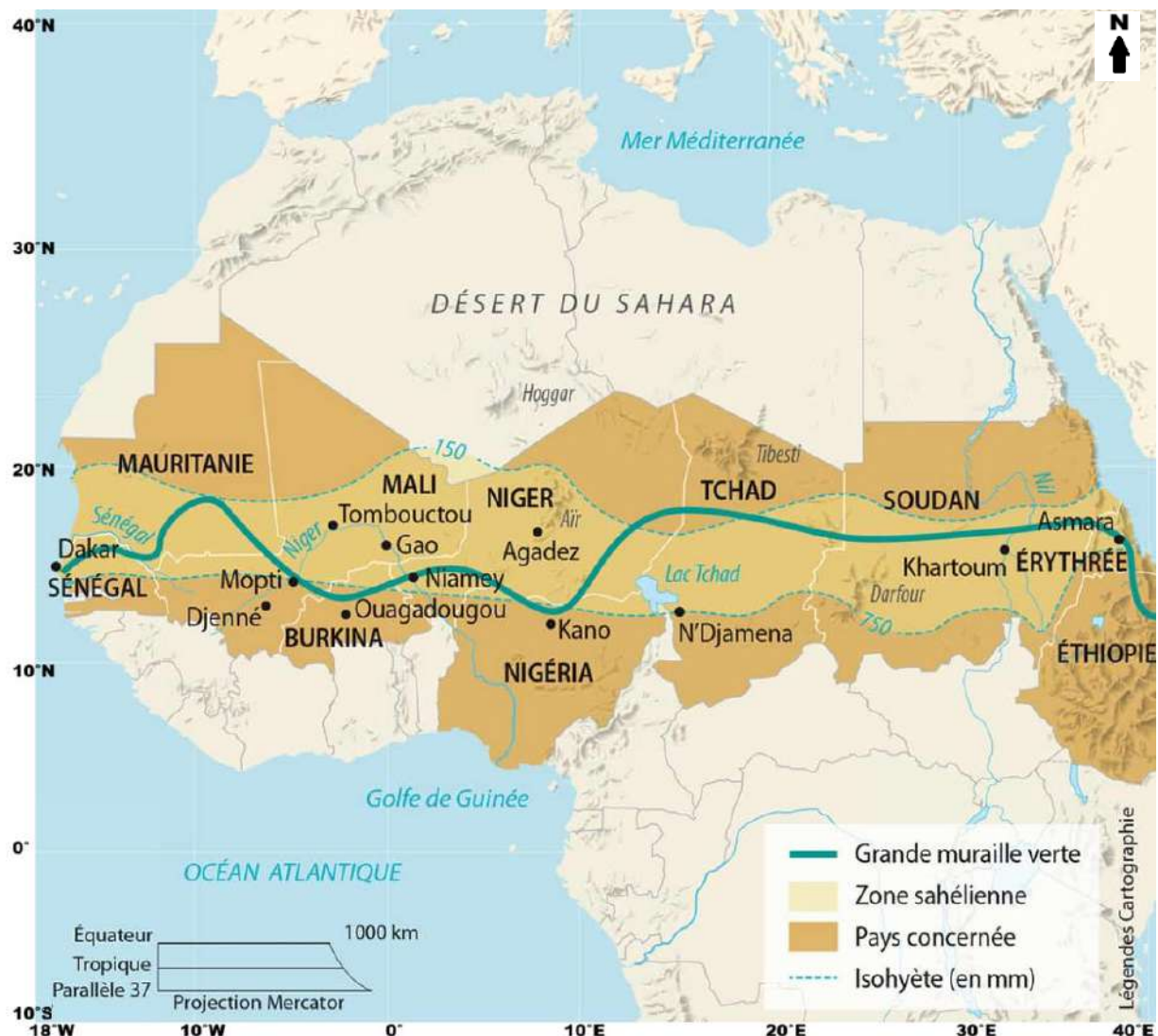


Figure I.1: Localisation du Sahel, Source : Brunel 2019

I.1.1. Climat sahélien et Mousson ouest-africaine

Le climat de la zone sahélienne (une saison de pluie et une saison sèche) est régulé par le système de la Mousson Ouest Africaine (MOA) définie comme un vaste schéma de circulation saisonnier à basse latitude dû à des contrastes thermodynamiques entre le Sahara chaud et sec et l'océan Atlantique tropical (Nicholson, 2013 ; Hamza *et al.*, 2016). La MOA repose sur la migration saisonnière de la Zone de Convergence Inter-Tropicale (ZCIT) qui est définie comme la rencontre des circulations atmosphériques continentales et océaniques. Cette zone de convergence, conjuguée aux flux solaires, induit des conditions thermodynamiques instables sur le continent Ouest-Africain, provoquant de fortes précipitations convectives (Le Barbé *et al.*, 2002). Ces systèmes convectifs de méso-échelle sont responsables de la majorité des quantités de pluies au Sahel. Toutes ses ressources en eau, ainsi que ses ressources végétales naturelles et cultivées en dépendent.

En effet, au niveau de la zone intertropicale, l'apport en énergie solaire est maximal. Et, la redistribution du surplus de chaleur autour du globe à travers la circulation générale de l'air (cellule de Hadley) influence les schémas climatiques à l'échelle mondiale. Elle est également responsable de la formation des principaux types de climats dans les régions intertropicales et au-delà. Cette circulation est à l'origine des variations des paramètres climatiques (températures, vent, humidité relative, précipitations, pression) qui en retour détermineront le climat à l'échelle régionale. La convergence entre les alizés de secteur nord-est appelés Harmattan (masses d'air sèches du nord-est) et la Mousson (masses d'air humides du sud-ouest), avec l'antagonisme thermodynamique entre l'anticyclone des Açores et l'anticyclone de Sainte Hélène, forment un flux convergent appelé Zone de Convergence Inter-tropicale (ZCIT) ou équateur météorologique (FIT). Le Front Inter-Tropical (FIT), qui correspond à la trace au sol de la ZCIT, définit une zone de basses pressions (Dépression) repérable par une bande de nuages convectifs à fort développement vertical (les cumulonimbus). Le déplacement latitudinal du FIT détermine les saisons.

Au mois de janvier, le FIT atteint sa position la plus méridionale (Figures I.2 et I.3) et se situe en moyenne à 4° nord. Cette position induit le prolongement saharien de l'Anticyclone des Açores (Anticyclone de Libye) et favorise l'installation des masses d'air tropicales stables, chaudes et sèches dont les vents sont dominés par les alizés continentaux du nord-est (Harmattan). À cette période, l'Harmattan règne au Sahel, les températures sont élevées, les précipitations sont nulles : c'est la saison sèche absolue. La première saison des pluies observée sur l'Afrique de l'Ouest correspond au premier saut de la ZCIT qui migre brusquement de 2°N à 5°N en début Mai. Cette brusque migration en Mai est la phase de pré-mousson appelée « pré-

onset » ou « régime guinéen ». Pendant cette période, le FIT remonte jusqu'à 15°N. La seconde période de pluies est caractérisée par le second saut de la ZCIT qui passe de 5°N à 10°N en l'espace de quelques jours vers la fin juin : c'est la phase de mousson appelée « onset » ou « régime sahélien » (Sultan *et al.*, 2003). Pendant la phase d'«onset », la température de surface continue d'augmenter sur le Sahara, ce qui renforce la dépression thermique (Heat Low) vers 25°N. Ainsi, les gradients horizontaux de pression, de température et d'humidité augmentent entre le Sahara et le Golfe de Guinée ce qui favorise l'accélération du flux de Mousson pendant cette phase et son extension méridienne vers le Nord jusqu'à 20°N (position la plus septentrionale du FIT en août). A partir de Septembre, la zone de pluie se retire vers le Sud. Cette phase de « retrait » de la ZCIT paraît beaucoup plus linéaire que les phases d'«onset » ou de « pré-onset ». Après 3 à 4 mois de saison pluvieuse au Sahel, le flux de Mousson se rétracte vers le Sud, entraînant avec lui le FIT à partir du mois d'Octobre (Sultan *et al.*, 2003 ; Beucher *et al.*, 2010 ; Parker *et al.* 2018).

La bande du Sahel, caractérisée par un fort gradient (sud-nord) de pluies et de températures, est l'une des régions du monde les plus sensibles aux changements du climat. L'impact désastreux de la variabilité et des extrêmes climatiques sur ses écosystèmes, les conditions de vie des populations sahéliennes depuis les cinq dernières décennies sont une parfaite illustration de cette vulnérabilité (Niasse *et al.*, 2004).

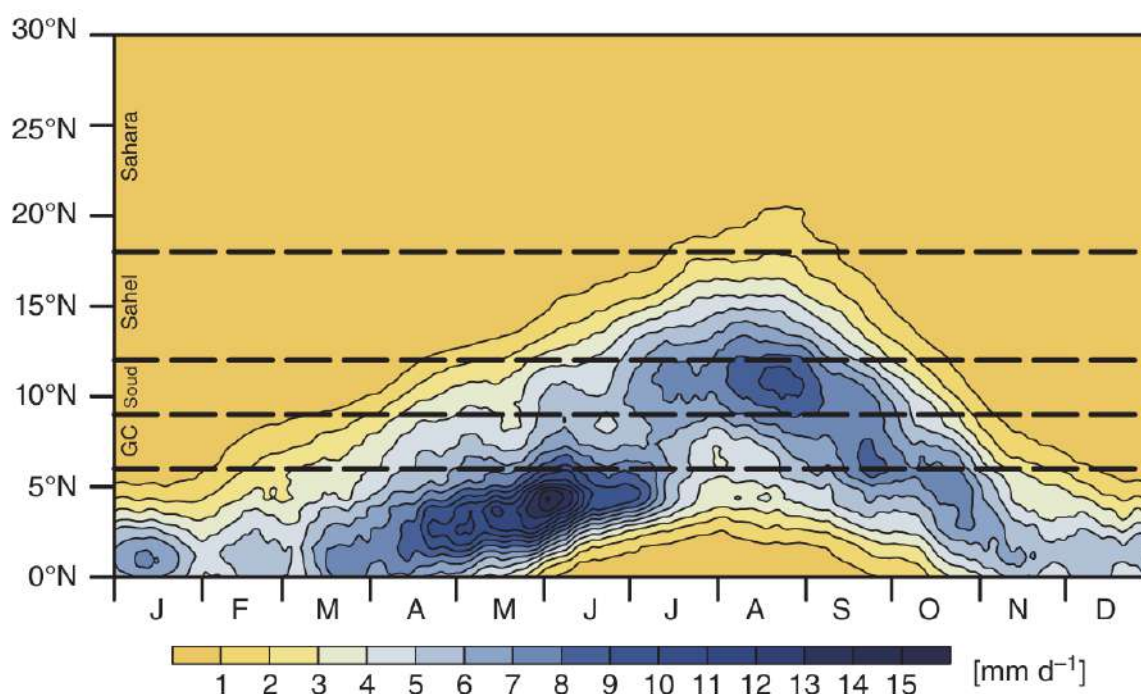


Figure I.2: Diagramme de Hovmöller des pluies quotidiennes (TRMM, 1998-2012) lissées par une moyenne mobile de 15 jours, et moyennées zonalement entre 10°W et 10°E. Source : Parker *et al.*, 2018.

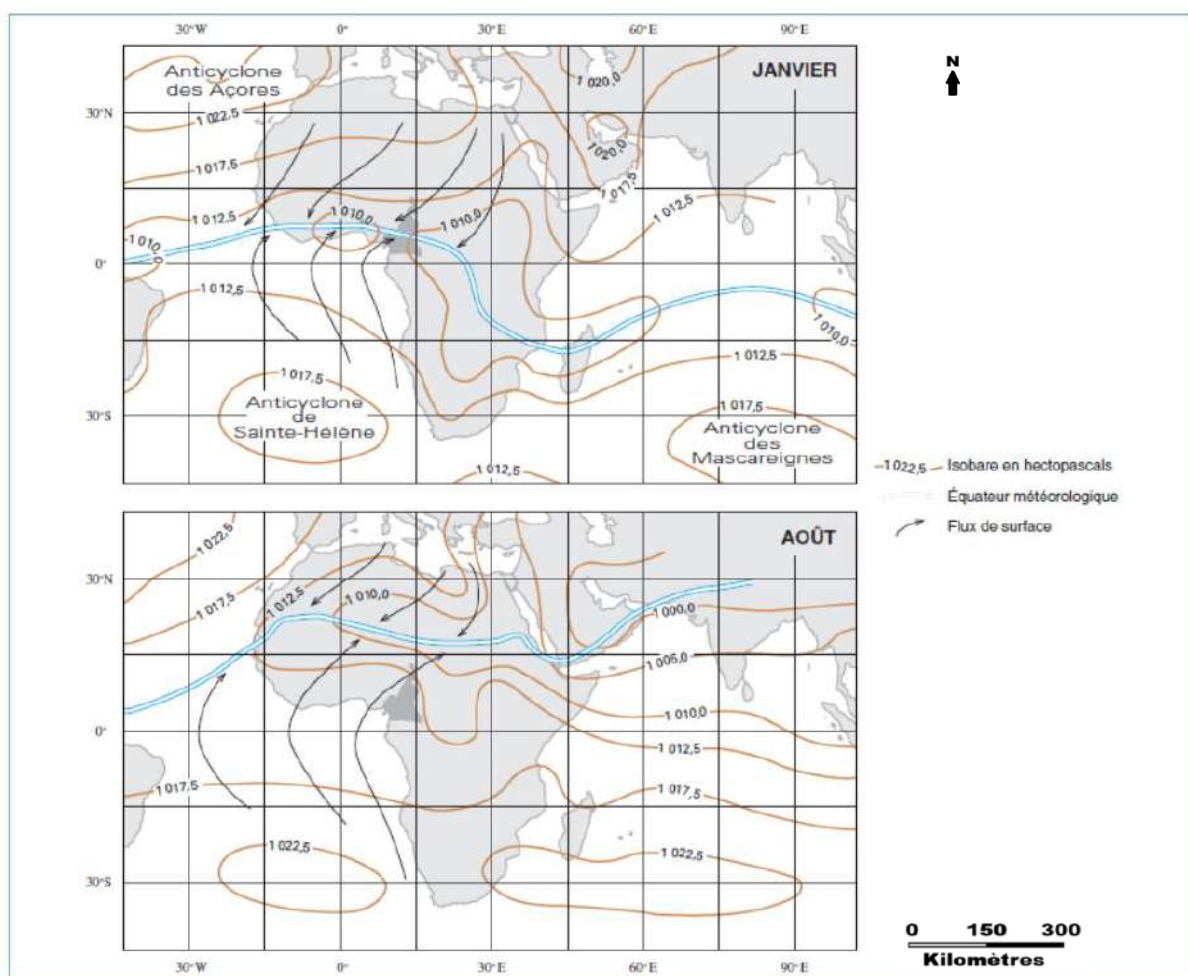


Figure I.3: Schéma des flux de surface, de la pression atmosphérique (en hPa) et localisation de l'Equateur météorologique (FIT), Figure extraite et modifiée de [Gbetkom, 2020](#).

I.1.2. Evolution de la pluviométrie dans le Sahel

Au Sahel, les études sur l'évolution de la pluviométrie ont révélé des alternances de périodes humides et sèches depuis les années 1900 (Figure I.4). Ces épisodes de déficits extrêmes ont eu de fortes conséquences sur l'environnement, la vie socio-économique des populations sahéliennes ([Mahé et Paturel., 2009](#) ; [Touré et al., 2012](#) ; [Nicholson, 2013](#)).

Une première période de 1900 à 1950 a été identifiée comme une période d'alternance entre années humides et années sèches, caractérisée par des épisodes de sécheresses dans les années 1910-20 et 1940 qui ont eu pour conséquence une famine sévère dans la région ([Nicholson, 1979](#) ; [L'Hôte et al., 2002](#)).

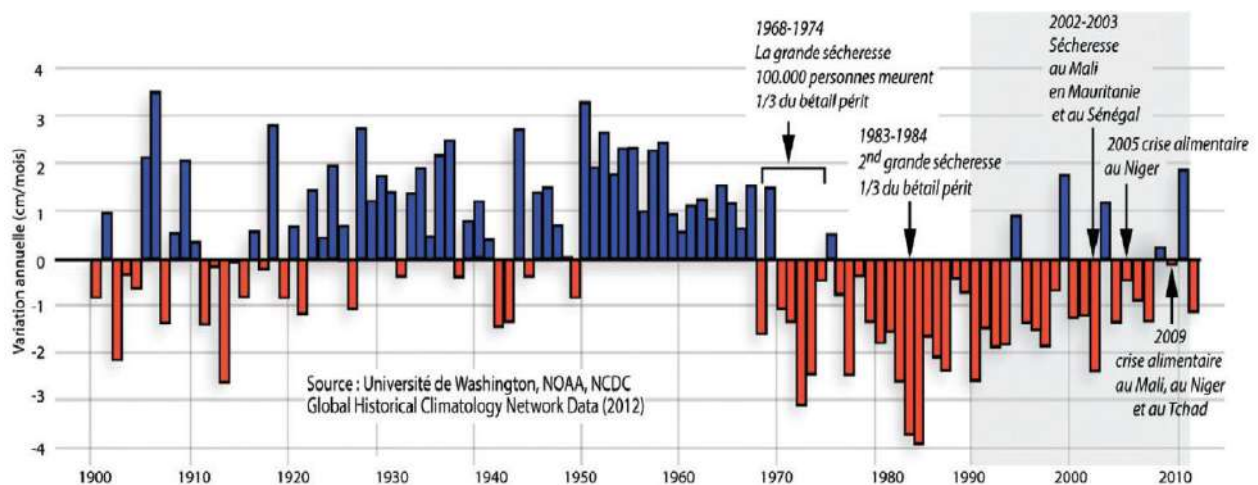


Figure I.4: Evolution des anomalies standardisées de précipitations sur le Sahel de 1900 à 2012 (Source : *Touré et al., 2012*)

La période de 1950 à 1967 a été identifiée comme très humide, contribuant à un fort développement agricole. Cette modification climatique s'est accompagnée d'une extension rapide de l'agriculture et de l'exploitation des terres initialement marginales (*Nicholson, 1979*). Le début des années 70 a marqué le début d'une longue sécheresse qui a persisté jusqu'au milieu des années 90. La période 1970-80, caractérisée par un déficit pluviométrique sur le Sahel, a été marquée par des années de sécheresses intenses en 1972-73 et de 1983-84 (*Nicholson et al., 2001; Le Barbé et al., 2002; Dai et al., 2004*) et souvent qualifiées de « grandes sécheresses ». Ces dernières ont entraîné, tout comme dans les années 40, famine et déplacement de population. Pendant ces décennies, les problèmes environnementaux consécutifs à ces changements furent 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*). Cette sécheresse est reconnue comme étant "le bouleversement climatique régional le plus incontesté et le plus important" du 20^{ème} siècle (*L'Hôte et al., 2002; Dai et al., 2004*).

Au cours de la décennie 1990, une troisième période de reprise partielle des précipitations est survenue de manière hétérogène sur le Sahel (Figure I.5), avec des alternances entre années humides et années sèches (*Mahé et Paturel., 2009; Panthou et al., 2014; Sanogo et al., 2015*). Bien que les quantités de précipitations de cette période n'aient pas retrouvé leurs niveaux des années 1950-1960, certaines années (1994, 1999) se rapprochent de ces valeurs. En parallèle, le nombre d'événements extrêmes à l'échelle journalière a augmenté (*Panthou et al., 2014*). Cette évolution a fait émerger de nouvelles problématiques locales telles que les inondations dévastatrices de Niamey par exemple (*Descroix et al., 2011; Cassé et al., 2015*).

Comme il a été noté plus haut, les conditions climatiques humides des années 50 et 60 ont cédé la place à des conditions beaucoup plus sèches, à partir des années 70 dans le sahel. Les scientifiques soupçonnent le réchauffement des eaux du proche Atlantique et le changement d'état des surfaces continentales (déforestation et utilisation des sols) d'être les causes de ces sécheresses. Pour une meilleure compréhension de la Mousson d'Afrique de l'Ouest, et ses conséquences sur la sécurité alimentaire, les ressources en eau et la santé, la communauté scientifique, à travers le programme international AMMA (Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine) a impulsé la recherche multidisciplinaire nécessaire pour fournir des prévisions améliorées de la Mousson Ouest Africaine (MOA), préalable indispensable à l'évaluation de ses impacts ([Redelsperger et al., 2006](#)).

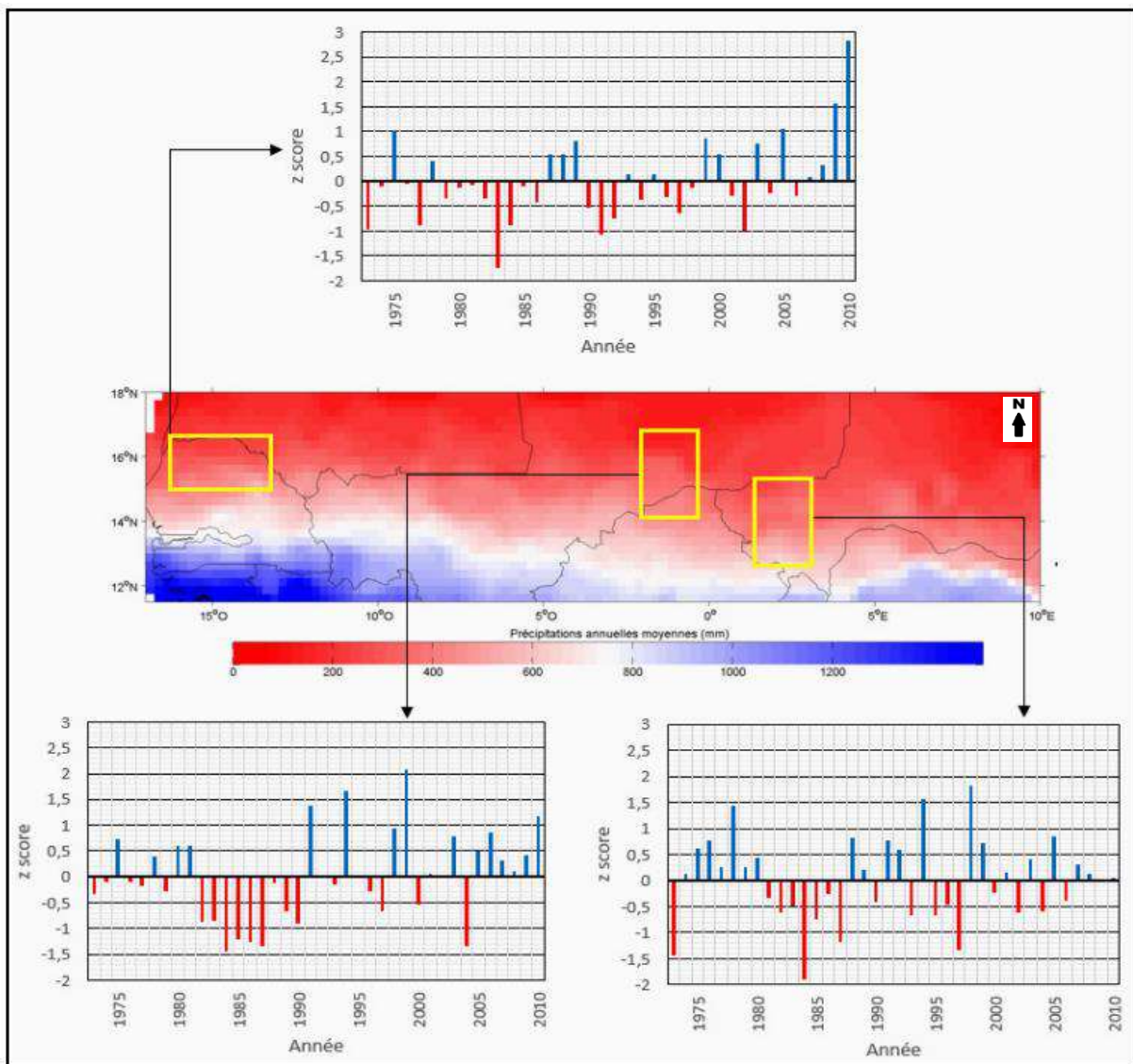


Figure 1.5: Précipitations annuelles moyennes et évolution des anomalies standardisées de précipitations sur la période 1973-2010, région du Ferlo (Sénégal), région du Gourma (Mali) et région du Fakara (Niger). Extrait de [Marega et al., 2021](#).

En Afrique, plus de 60% de la population africaine dépend directement ou indirectement des ressources forestières (IPBES, 2018b ; Mansourian *et al.*, 2021). Les zones forestières jouent un rôle fondamental dans les grands enjeux du millénaire (changements climatiques, extinction de la biodiversité et sécurité alimentaire). Pourtant, les évaluations périodiques réalisées par la FAO en 2020 attestent que l'Afrique a enregistré le taux annuel le plus élevé de perte nette de forêts entre 2010 et 2020. En Afrique de l'Ouest principalement, la région a perdu 5,3 millions hectares de forêt, soit une perte annuelle de 530.000 hectares de couverture forestière entre 2010 et 2020 en raison de l'exploitation forestière incontrôlée, des feux de forêt, de l'agriculture extensive et du pastoralisme transhumant (CEDEAO, 2015a ; FAO, 2020b). La dégradation du couvert végétal ne fait pas qu'intensifier les effets des changements climatiques, elle menace considérablement le développement économique des pays, des communautés et perturbe la paix sociale de la région.

Au regard donc des aléas climatiques qui ont affecté le Sahel durant les décennies 70 et 80 et face aux multiples défis environnementaux (notamment la désertification, les pertes de récoltes), les leaders Africains ont élaboré et approuvé plusieurs plans d'actions nationaux et sous régionaux dans le cadre de la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification dans les pays gravement touchés par la sécheresse et/ou la désertification (CNULCD, 1994).

I.2. L'initiative de la Grande Muraille Verte pour le Sahara et le Sahel (IGMVSS)

I.2.1. Concept de la Grande Muraille Verte

L'initiative Grande Muraille Verte pour le Sahara et le Sahel (IGMVSS) est née d'un triple constat, à savoir :

- La désertification, le changement climatique et la perte de la diversité biologique qui constituent une problématique cruciale pour les régions sèches d'Afrique. Ces aléas aggravent l'insécurité alimentaire des populations, éprouvent les efforts de développement des pays et affectent les moyens d'existence durable des populations de l'espace saharo-sahélien.
- Les prévisions climatiques pour l'Afrique font peser de graves risques d'extension des zones sèches vers le sud du Sahara de nature à enrayer les efforts de lutte contre la pauvreté déployée par les États dans ces terres arides.
- Les efforts consentis dans le cadre de la Convention des Nations Unies de Lutte Contre la Désertification ([UNCCD, 1994](#)) et de l'amélioration de la résilience des systèmes humains et naturels face au Changement Climatique n'ont pas encore permis d'atteindre les objectifs fixés en matière de conservation, de gestion durable des ressources naturelles et de lutte contre la pauvreté dans l'espace saharo-sahélien.

I.2.2. Objectifs et impacts attendus de la Grande Muraille Verte

À l'origine, le but de la GMV était de créer une longue barrière d'arbres au Sahel pour freiner l'avancée du Sahara. Cette vision s'est transformée au fil du temps et intègre actuellement les approches de gestion intégrée des écosystèmes, systèmes d'utilisation des terres et de systèmes de production, la gestion et la restauration durables des zones arides, la régénération de la végétation naturelle ainsi que des mesures de rétention et de conservation des eaux. Ainsi, l'objectif global de la Grande Muraille Verte vise à apporter une réponse significative à l'avancée du désert à travers la mise en valeur des zones saharo-sahéliennes, la gestion durable des ressources naturelles et la lutte contre la pauvreté par le développement d'activités économiques créatrices de richesses pour les populations. Et, l'objectif principal de la GMV est de réduire la dégradation des ressources forestières, les effets néfastes du changement climatique et la perte de biodiversité dans les localités d'intervention de l'initiative. Ainsi, l'IGMVSS contribue aux objectifs globaux de politiques du secteur Environnemental et

des ODD (17 Objectifs de Développement Durable) des Nations Unies qui visent à : (i) réduire la dégradation de l'environnement et des ressources naturelles, les effets néfastes des changements climatiques et la perte de biodiversité ; (ii) promouvoir des moyens d'existence, la résilience des groupes vulnérables et les modes de production et de consommation durables (<https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/objectifs-de-developpement-durable/>).

La réalisation des différents objectifs de l'initiative occasionnerait des effets et impacts positifs pour les populations et l'environnement des zones traversées par la GMV.

À l'horizon 2030, l'initiative GMV a pour ambition de : (i) restaurer 100 millions d'hectares de terres actuellement dégradées ; (ii) séquestrer 250 millions de tonnes de carbone et (iii) créer 10 millions d'emplois (Mbow, 2017 ; UNCCD, 2020 ; <https://www.unccd.int/actions/great-green-wall-initiative>; Bruckmann *et al.*, 2022).

Depuis le lancement de l'initiative, les pays ayant réalisé des avancées significatives dans le processus de restauration sont le Sénégal, le Niger, l'Éthiopie, l'Érythrée (APA, 2018 ; UNCCD, 2020 ; <https://www.grandemurailleverte.org/>). Au Sénégal, plus de 18 millions d'arbres ont été plantés, 120.000 ha de terres restaurées, 73.000 ha de forêt reboisée et 35.500 ha sous régénération naturelle assistée (RNA) sur la période de 2006 à 2020. Depuis 2019, l'Éthiopie a amplifié ses campagnes de reboisement et a réussi à planter, en l'espace de quatre ans, plus de 20 milliards d'arbres (Beyene, 2022 ; www.greencross.fr/reforestation-ethiopie/).

Tableau I.1: Réalisations des activités des pays de la Grande Muraille Verte (sources : UNCCD 2020, <https://www.grandemurailleverte.org/>).

Pays	Superficies initiales de la GMV (ha)	Superficies actuelles d'intervention de GMV (ha)	Réalisation de GMV	Revenus Générés par la GMV (2011-2019) FCFA (Dollars US)
Sénégal	817.500	817.500	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 120000 ha restaurés ; ✓ 72452 ha reboisés ; ✓ 33500 ha sous RNA. 	33.698.000
Mauritanie	1.300.500	1.650.000	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 3500 ha restaurés ; ✓ 2860 ha de dunes fixé ; ✓ 950 ha protégés ; ✓ 900 ha sous RNA. 	3.996.800

Mali	1.329.000	44.400.000	✓ 6297 ha restaurés ; ✓ 120 ha reboisés ; ✓ 41 ha sous RNA ; ✓ 18 ha de dunes fixées.	32.517.000
Burkina Faso	906.000	13.300.300	✓ 53000 ha restaurés ; ✓ 29605 ha reboisés ; ✓ 12500 ha sous RNA ✓ 250 ha de dunes fixées.	5.224.425.762
Niger	1.399.500	47.300.000	✓ 363928 ha restaurés ; ✓ 364615 ha reboisés ; ✓ 310 ha sous RNA ; ✓ 80040 ha de dunes fixées.	48.530.370.000
Nigéria	528.000	17.400.000	✓ 3000 ha restaurés ; ✓ 2801 ha sous RNA ; ✓ 373 ha de jardins polyvalents.	-
Tchad	1.339.500	3.000.000	✓ 16000 ha restaurés ; ✓ 994 ha reboisés ; ✓ 1819 ha sous RNA ✓ 12755 ha de dunes fixées ; ✓ 900 m ² de système d'irrigation.	4.800.000
Soudan	2.280.000	2.280.000	✓ 88000 ha restauré ; ✓ 2500 ha sous RNA.	-
Érythrée	580.500	12.400.000	✓ 501000 ha restaurés ; ✓ 52930 ha reboisés ; ✓ 394551 ha sous RNA.	-
Éthiopie	883.500	13200000	✓ 2000000 ha restauré ;	-

			✓ 151448 ha reboisés ; ✓ 236551 ha sous RNA ✓ 792711 ha de terrasses ; ✓ 893706 ha de gestion de forêt et de bassin versants.	
Djibouti	313.500	340.000	✓ 130 ha restaurés ; ✓ 6 ha restauré ; ✓ 90 ha reboisés ; ✓ 32 ha sous RNA.	300\$/ Bénéficiaire
Total	11,7 millions d'hectares.	156,1 millions d'hectares	4 millions d'hectares restaurés.	53,8 milliards FCFA ; 90 millions de dollars US.

Le Sénégal, l'un des pays concernés par la désertification et faisant partie de l'initiative GMV a réalisé depuis le lancement du projet d'énormes progrès avec plusieurs millions d'arbres plantés (18 millions d'arbres plantés, [UNCCD, 2020](#)). Les études sur l'impact potentiel du reboisement sur le climat (précipitations et températures) ont été réalisées par l'usage de modèles climatiques ([Abiodun *et al.*, 2012](#) ; [Saley *et al.*, 2016](#) ; [Diba *et al.*, 2016](#) ; [Bamba *et al.*, 2019](#)). L'étude menée par [Schucknecht *et al.* \(2016\)](#) au Sénégal sur la période 1981-2014, et en utilisant des données de précipitations satellitaires et d'indice de végétation par différence normalisée (NDVI), a noté une légère hausse de la biomasse sur certains sites et des changements non significatifs sur d'autres.

L'autre défi majeur concerne la séquestration du carbone. Plusieurs programmes internationaux à l'échelle globale ont débuté dans les années 1980s pour la compréhension des interactions atmosphère-surface terrestre et leurs effets sur le climat. Bien que peu d'études aient été réalisées pour mettre en évidence une augmentation de la biomasse, aucune étude sérieuse n'a été entreprise pour évaluer l'impact de la reforestation sur le stockage du carbone dans la Grande Muraille Verte du Sénégal.

Chapitre II : Zone d'étude, données et méthodologie

Introduction

Le chapitre précédent définit le cadre thématique et conceptuel de la présente recherche et de présenter l'objet de l'étude qui est de quantifier l'impact du reboisement sur les paramètres climatiques et la séquestration du carbone dans le cadre de la Grande Muraille Verte au Sénégal. Le but de ce second chapitre est de présenter les données utilisées et l'approche méthodologique retenue pour cette étude. Pour les données, il s'agit principalement de données satellitaires de couverture végétale (NOAA-AVHRR, NOAA-STAR ; ESA-CCI LC), des données de précipitation CHIRPS, d'humidité du sol (NOAA-CPC) et d'évapotranspiration GLEAM, auxquelles s'ajoutent les données de ré-analyses pour la simulation du modèle RegCM4.7. Ainsi, la première partie de ce chapitre sera consacrée à la présentation des caractéristiques physiques de la Grande Muraille Verte du Sénégal qui sera suivie, dans une deuxième partie, d'un rappel des principes d'acquisition des données de mesure du couvert végétal par télédétection. Ensuite, nous donnerons une description succincte des différentes données utilisées. La dernière section sera consacrée aux outils et approches statistiques employés pour atteindre les objectifs de cette thèse.

II.1. Présentation de la zone d'étude

Le tracé initial de la Grande Muraille Verte africaine est large de 15 km, s'étend de Dakar à Djibouti et concerne 11 pays africains. La zone que nous nous proposons d'étudier concerne les sites reboisés de la Grande Muraille Verte du Sénégal. Cette zone a fait l'objet de plusieurs campagnes de reboisement entre 2005 et 2019 par différentes communautés. Après une brève présentation de l'initiative de la Grande Muraille Verte au Sénégal, nous décrirons les caractéristiques écologiques de notre zone à travers son régime de pluie, son couvert végétal et le type de sol.

II.1.1. Localisation et de la Grande Muraille Verte du Sénégal

Situé en Afrique de l'ouest entre 12°8' et 16°41' de latitude nord et 11°21' et 17°32' de longitude ouest, le Sénégal a une superficie de 196.722 Km² et une population estimée à 17.215.433 en 2021 ([ANSD, 2021](#)). Notre zone d'étude correspond aux domaines sahéliens et soudano-sahéliens du Sénégal (nord et nord-est du territoire). Cette zone s'étend entre 14,5° et 16° de latitude nord (Figure II.1). La GMV Sénégalaise a une largeur de 15km et une longueur de 545 km. Elle représente 7% de la longueur totale de la GMV africaine. Ce tracé occupe une superficie de 817.500 hectares. L'initiative GMVSS au Sénégal passe par les régions de Louga, Matam et Tambacounda (Tableau II.1). Pour l'étude des sites de la GMV, les localités ont été

sélectionnées par région, en fonction du nombre de campagnes de reboisement par commune (régions de Louga et Matam), à l'exception de la région de Tambacounda où le reboisement n'avait pas encore commencé (voir Figure II.1, Tableaux II.2 et II.3).

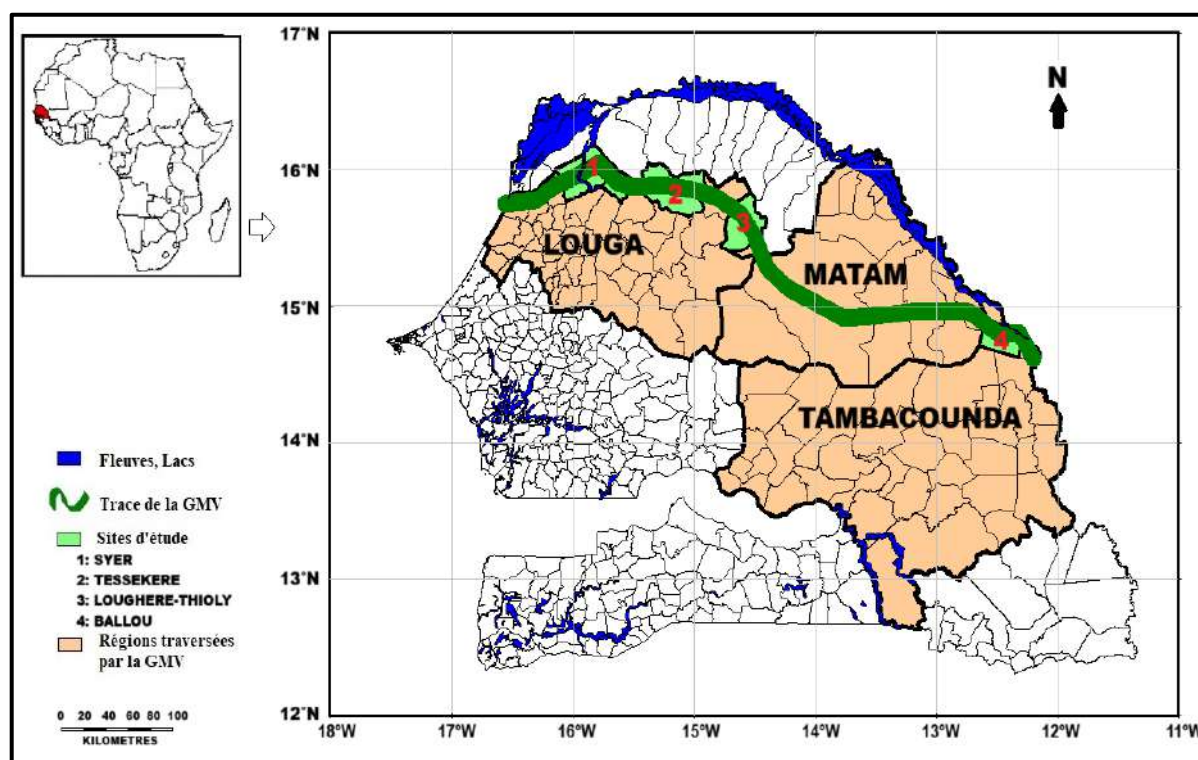


Figure II.1: Localisation de la zone d'étude et de la trace de la GMV au Sénégal.

Tableau II.1: Régions, Départements et Communes traversées par la GMV du Sénégal et sites retenus pour notre étude () (ANSD, 2021)*

Régions administratives (Population de la région)	Départements	Communes	Longueur de la GMV (km)	Population
Louga (1.091.268)	Louga. Linguère	Léona, Ngueune Sarr, Sakal, Keur Momar Sarr, Syer* , Mboula, Téssékéré* et Labgar	225	130.057
Matam (760.588)	Kanel. Ranérou	Loughéré-Thioly* , Oudalaye, Ourou Sidy, Dendory et Aouré	250	134.830
Tambacounda (904.032)	Bakel	Ballou* , Gabou et Bélé	70	57.334
Total : 03 régions	05	16	545	322.221

Tableau II.2: Etat de mise en œuvre de la GMV du Sénégal de 2008 à 2015 (Source *APGMV* <https://www.grandemurailleverte.org/>)

Années	Nombre de plants	Superficies reboisées (Ha)	Pare feux (Km)	Mise en défens (Ha)
2008	2.500.000	5.000	240	13.000
2009	2.200.000	3.000	2.100	
2010	2.700.00	3.700	2.200	
2011	1.650.000	4.000	2.560	
2012	1.950.000	3.900	1.200	
2013	2.025.000	5.000	1.500	
2014	1.380.624	4.000	1.500	
2015	1.733.800	4.700	1.500	
Total	16.139.424	33.300	12.800	13.000

Tableau II.3: Campagne et résultats de reboisement de la GMV au Sénégal par la Fondation Cœur Vert de 2006 à 2019 (Source *Fondation Cœur Vert /Green Heart Foundation* <https://fondationcoeurvert.org>)

Années	Localité	Nombre de plants	Superficies reboisées (Ha)
2006	Widou Thiengoly (Tessékéré)	31.540	250
2007	Loumbol Samba Abdoul (Ouadalaye)	25.000	252
2008	Tessékéré	75.000	594
2009	Loughéré Thioly	192.500	1200
2010	Syer	162.500	1040
2011	Mbar Toubab (Syer)	110.000	443
2012	Mbar Toubab (Syer)	40.000	250
2013	Mbar Toubab (Syer)	110.000	443
2014	Belly Gawdy Chérif (Syer)	27.975	225
2015	Bélèl Aya (Syer)	50.000	250
2016	Tagar (Loughéré Thioly)	36.000	180
2017	Mbanar	57.000	220
2018	Kalom	76.250	305
2019	N’Gadou Thiel	88.000	176
Total		1.081.765	5.828

En 2020, le rapport sur l’état d’avancement de la mise en œuvre de la Grande Muraille Verte de la Convention des Nations Unies sur la lutte Contre la Désertification ([UNCCD, 2020](#)), révèle que le Sénégal a planté plus de 18 millions d’arbres, restauré 119.200 ha de terres, 72.542 ha de forêt reboisée et 35.500 ha sous régénération naturelle assistée. En effet, la régénération

naturelle assistée (RNA) est une technique utilisée en agroforesterie, particulièrement dans les zones arides ou semi-arides, qui vise à restaurer les forêts dégradées en exploitant la capacité naturelle des arbres à se régénérer. Plutôt que de planter de nouveaux arbres, la RNA consiste à identifier, protéger et gérer les jeunes pousses (rejets) d'arbres et d'arbustes déjà présents dans le sol. La restauration des terres et le reboisement dans la zone d'intervention de l'agence Panafricaine représentent respectivement 15% et 9% de la superficie de la GMV Sénégalaise.

II.1.2. La pluviométrie

La saison de pluie va de juin à octobre avec un maximum en août-septembre et variable selon la latitude (moins de précipitation au nord par rapport au sud). Cette saison de pluie correspond à la période de Mousson sur le Sahel. La saison sèche dure de novembre à juin. La région nord du Sénégal enregistre une pluviométrie annuelle moyenne d'environ 300 mm, alors qu'elle atteint 1000 mm dans le sud (Figure II.2).

L'analyse des diagrammes climatiques (Figure II.3) met en évidence d'importantes disparités dans la distribution des précipitations entre les quatre sites, aussi bien dans le temps que dans l'espace. Et ils ont un climat sahélien à Syer, Téssékéré, Loughéré-Tioly (cumul annuel des pluies inférieur à 500 mm/an) et soudano-sahélien à Ballou. La distribution spatiale montre une augmentation progressive des hauteurs pluviométriques dans le sud et à Ballou située à l'est du pays avec une précipitation de plus de 55 mm au mois de juin, ensuite à Loughéré-Thioly, Téssékéré et Syer. La saison des pluies dure 2 à 3 mois (juillet-août-septembre) et atteint son pic en août. À Syer la saison est plus arrosée entre août et septembre. Dans les communes de Téssékéré et Loughéré-Thioly, la saison pluvieuse est bien répartie sur les mois de juillet-août-septembre (jas). Par contre à Ballou, la moitié de la quantité d'eau précipitée dans l'année est enregistrée en août avec 212 mm. La saison sèche quant à elle, s'étend d'octobre à juin. Le nombre de jours de pluie dans le Sahel de l'ouest est en moyenne de 60 à 120 jours ([Touré et al., 2012](#)).

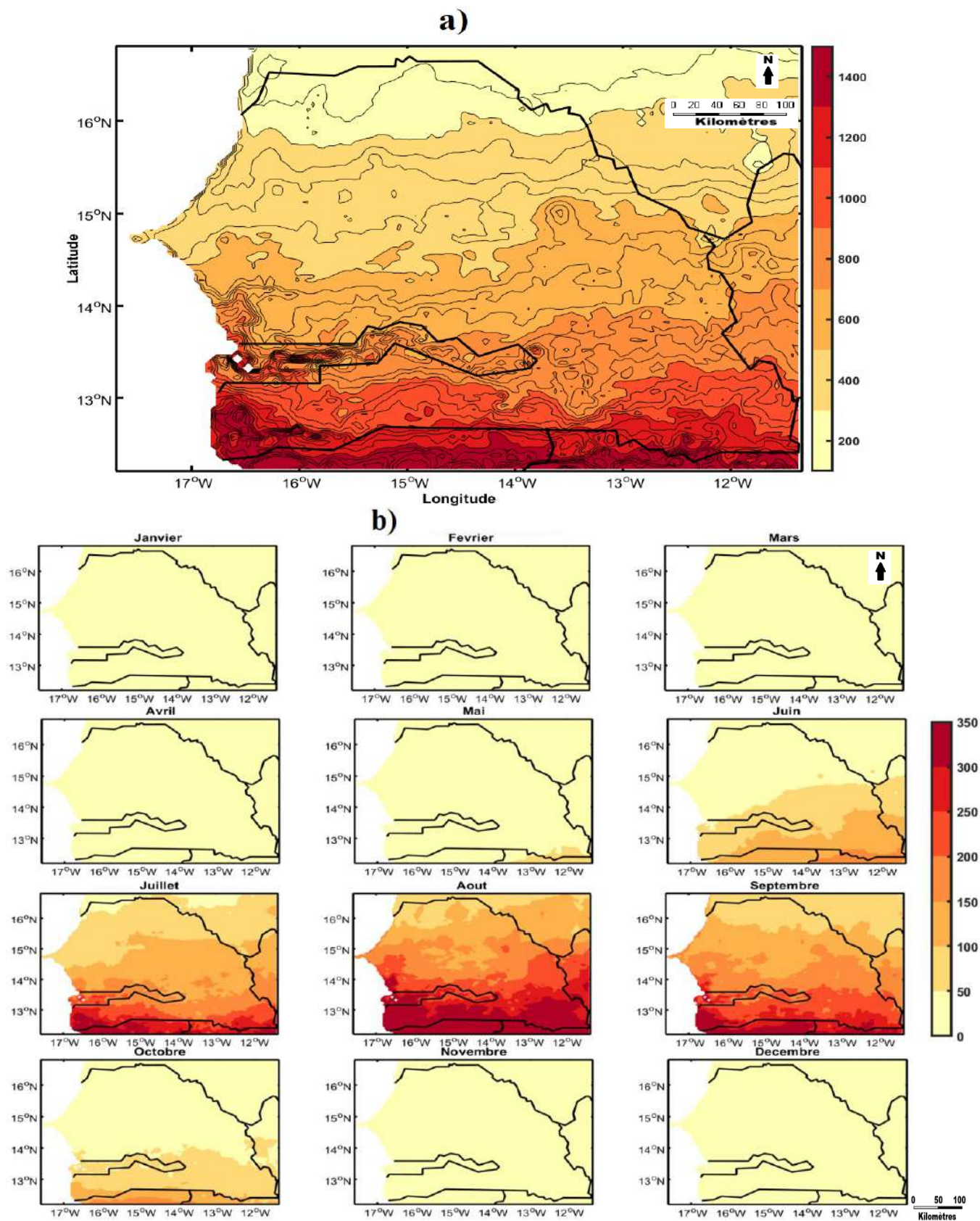
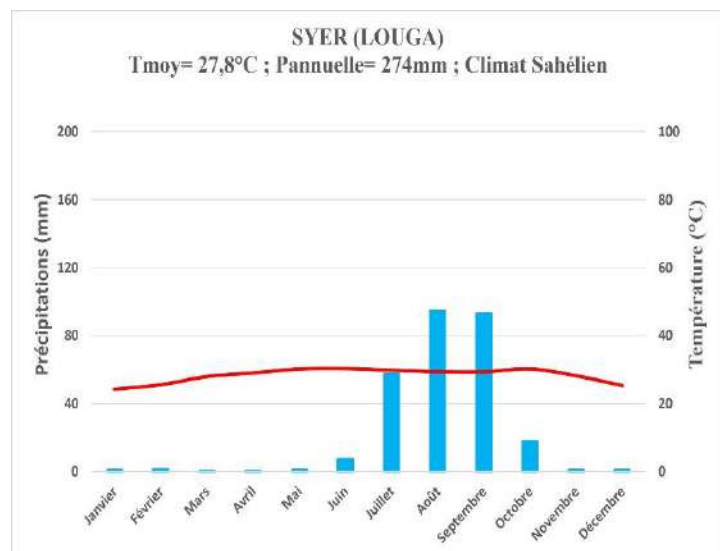
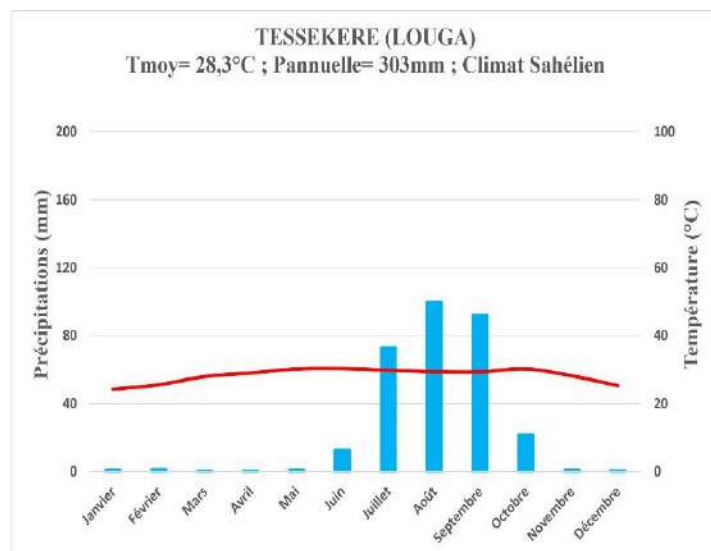
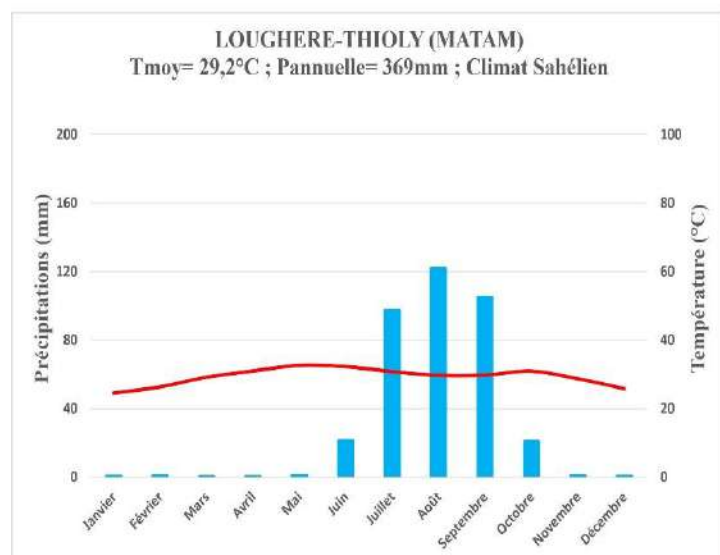
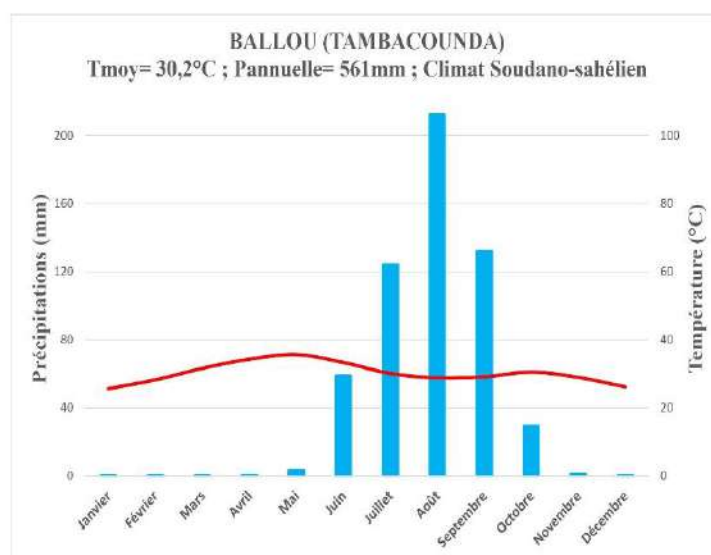


Figure II.2: Distributions spatiales des précipitations a) moyenne annuelle et b) moyennes saisonnières du Sénégal sur la période 1991-2020



■ Précipitations (mm) — Température (°C)

Figure II.3: Diagrammes climatiques des localités de Syer, Téssekéré (Louga), Loughéré-Thioly (Matam) et Ballou (Tambacounda), réalisés à partir des données de précipitations CHIRPS et de Température (CRU TSv.4.07 ; <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/>)

II.1.3. La végétation

La distribution de la végétation est essentiellement liée à celle de la pluviométrie et à la topographie. Selon une répartition latitudinale nord-sud, trois domaines biogéographiques sont à distinguer (le domaine sahélien, le domaine soudanien et le domaine guinéen). Cette couverture végétale est structurée en deux strates principales. Une strate aérienne où prédominent des espèces caducifoliées (*Espèces qui perdent leurs feuilles en saison sèche*) et une strate herbacée où prédominent des graminées annuelles.

Le domaine sahélien est caractérisé par une végétation ouverte (type pseudo-steppe arbustive) dominée par les acacias (*Balanites aegyptiaca*, *Acacia raddiana*, *Acacia senegal*, *Acacia seyal*, *Boscia senegalensis*, *Ziziphus mauritiana*, *Commiphora africana*, *Combretum glutinosum*) et dont la présence de l'espèce est fonction de l'aménagement des sols, et par des graminées annuelles (*Cenchrus biflorus*, *Eragrostis tremula*, *Aristida mutabilis*, et *Schoenefeldia gracilis*) formant un tapis éphémère, plus ou moins continu (CSE, 2020).

Le domaine soudanien caractérisé par une végétation du type savane arborée ou boisée à forêt sèche (claire) avec des essences de grandes tailles telles que *Bombax costatum*, *Cassia sieberiana*, *Cordyla pinnata*, *Daniella oliveri*, *Parkia biglobosa*, *Pterocarpus erinaceus*, *Sterculia setigera*, *Combretum sp.*, et un tapis herbacé dominé par des graminées vivaces du genre *Andropogon sp.*

Le domaine guinéen caractérisé par une forêt semi-sèche à dense, à deux étages, composés de *Azizia africana*, *Detarium microcarpum*, *Elaeis guineense*, *Erythrophleum guineense*, *Khaya senegalensis*, *Parinari curatellifolia* et un sous-bois dense formé d'arbrisseaux sarmenteux, de lianes et d'herbes.



Figure II.4: Illustration de la végétation ouverte composée de graminées annuelles formant un tapis herbacé continu, typique de la savane arbustive dans la réserve reboisée de Koli Alpha (Louga), <https://www.grandemurailleverte.org/>

II.1.4. Les sols

De manière générale, les sols sénégalais sont sablonneux et secs au nord du pays, ferrugineux dans les régions centrales et latéritiques dans la partie sud. Leur distribution se fait en fonction des deux principaux facteurs de formation : le matériau originel et la topographie qui permettent la différenciation de caractères d'hydromorphie, de salure ou d'acidité, liés à un excès ou un déficit hydrique (CSE, 2020).

Les principaux types de sols rencontrés par ordre d'importance sont les sols ferrugineux tropicaux non lessivés et lessivés (34,40%), les lithosols (21,38%), les sols hydromorphes (10,93%), les régosols (8,16%), les sols peu évolués (7,74%), les sols rouge-brun (6,15%), les sols ferrallitiques (5,78%), les sols halomorphes (2,90%), les vertisols (1,65%), les sols bruns subarides (0,64%) et les sols minéraux bruts (0,27%) (CSE, 2020 ; Ndour *et al.*, 2020). Par contre, les principaux types de sols traversés par (GMV), d'ouest en est, sont les sols sablonneux et sec, sols ferrugineux, sols brun rouges, sols brun subarides (Figure II.5).

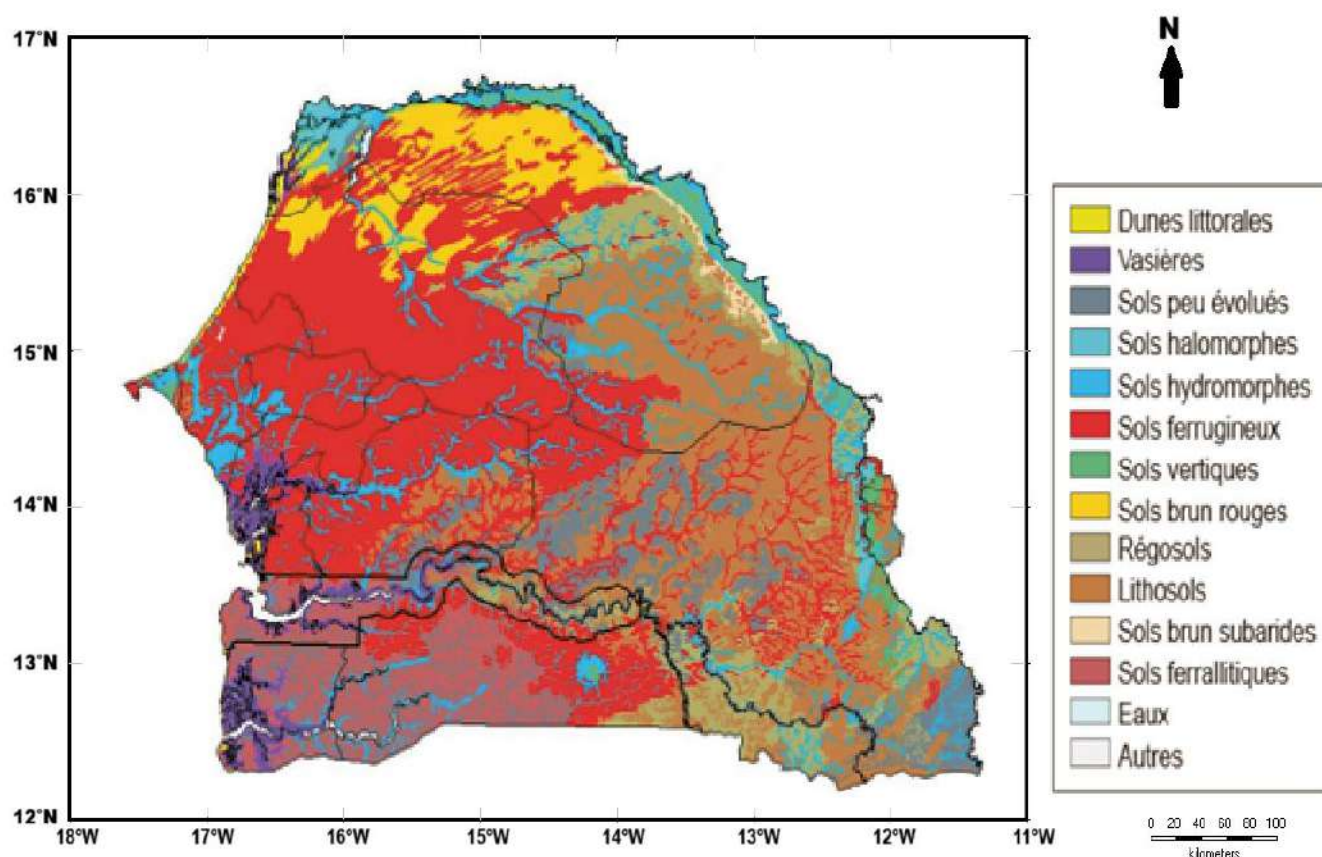


Figure II.5: Carte des types de sol du Sénégal (Ndour et al., 2020)

II.1.5. L'occupation des sols

Les classes dominantes de l'occupation du sol au Sénégal sont la culture pluviale (23,5%), la savane boisée (19,5%), la savane arborée (16,4%), la savane arbustive (15,6%) et la steppe (13,9%), alors que des classes telles que les zones d'habitation, les forêts denses, les mares et les lacs occupent chacune moins de 1% du territoire Sénégalais (Figure II.6). Ces différentes classes peuvent être regroupées en trois grands groupes : (i) les terres arables (39,3%), (ii) les forêts, savanes et parcours classés (55,1%) et (iii) les zones non classées et terres non cultivables (5,6%) (CSE, 2020, Figure II.6). Par ailleurs, l'occupation du sol est caractérisée par une disparité des superficies entre les différentes régions. Ainsi, la zone d'étude (la zone sylvopastorale) concentre 34,9% des terres arables comparée aux zones du Bassin arachidier (42,1%), de la Casamance (7,9%) et du Sénégal oriental (3,3%).

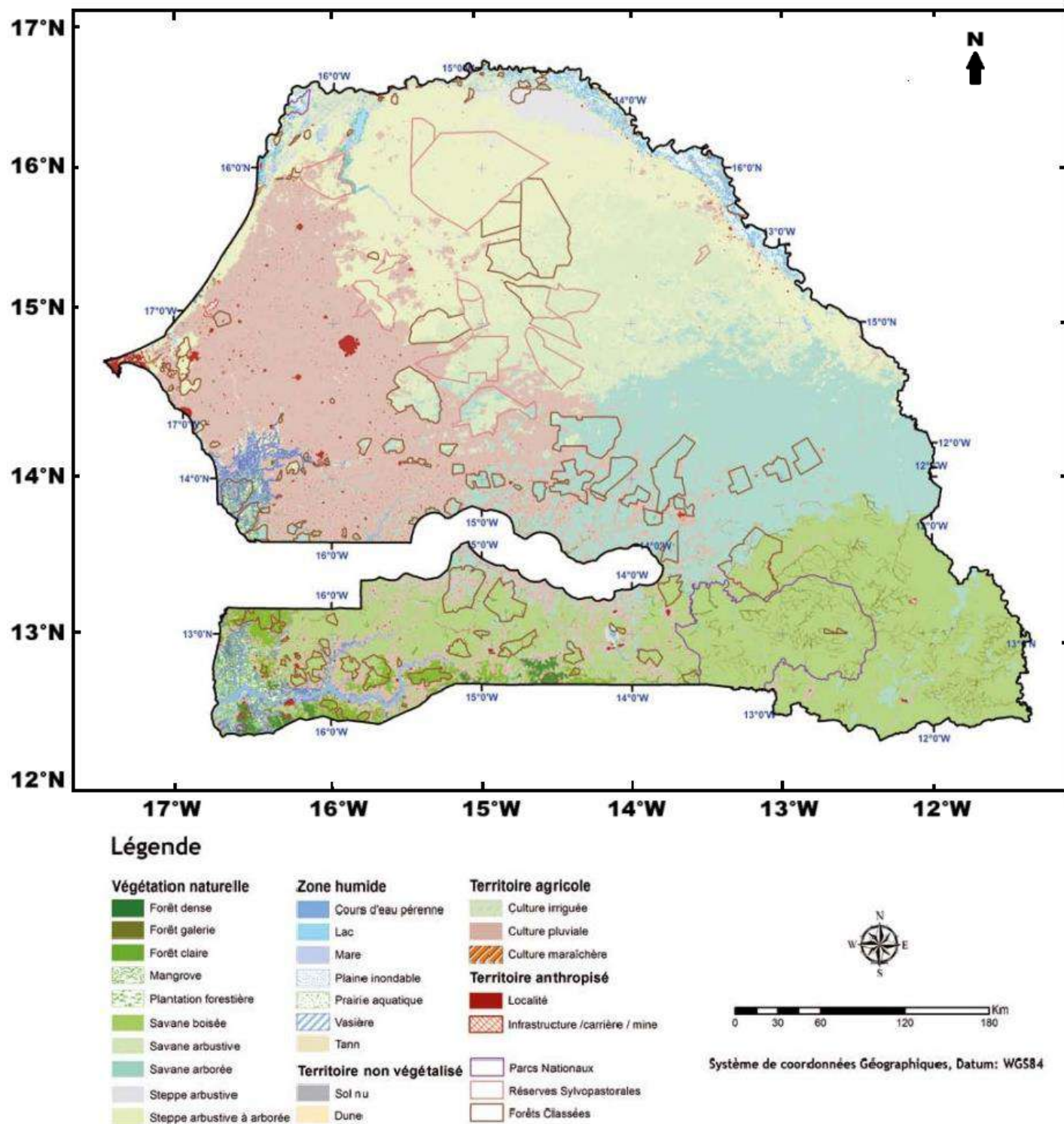


Figure II.6: Carte d'occupation des sols du Sénégal (Source : *Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS, 2015)*)

II.2. Données utilisées

II.2.1. Données de suivi du couvert végétal

II.2.1.1. Les indices de végétation : Indice de Végétation par Différence Normalisé (NDVI) et Indice de Santé de la Végétation (VHI)

L'état du couvert végétal peut être étudié à partir d'indices de végétation générés de façon continue à partir d'images issues des capteurs des satellites. Ainsi, les données d'indice de végétation par différence normalisé (AVHRR-NDVI et VHP-ND) proviennent respectivement des bases NOAA-CDR (National Oceanic and Atmospheric Administration, Climate Data Record Program, <https://www.ncei.noaa.gov/data/avhrr-land-normalized-difference-vegetation-index/access/>) et NOAA-STAR (Center for Satellite Applications and Research, https://www.star.nesdis.noaa.gov/pub/corp/scsb/wguo/data/Blended_VH_4km/VH/).

Cet indice NDVI est généré à partir des données du radiomètre de très haute résolution AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) des satellites NOAA (NOAA-7, 9, 11, 14, 16, 18 and 19) depuis 1981. Quant aux données de santé de végétation (VHP-VH : Global Vegetation Health Products), elles proviennent essentiellement de la base NOAA-STAR et disponibles de 1981 à aujourd'hui. Ces produits de santé de la végétation sont générés à partir du radiomètre AVHRR de 1981 à 2020 et de VIIRS (Visible Infrared Imager Radiometer Suite) de 2013 à aujourd'hui. Les données issues du radiomètre AVHRR ont une résolution de 4 km et la résolution du Radiomètre VIIRS est de 1 km. Les bandes du radiomètre VIIRS utilisés pour produire l'indice NDVI sont les canaux visible I1 (0,64 μm) et proche infrarouge I2 (0,86 μm), quand la bande infrarouge I5 (11,0 μm) est utilisée pour produire la température de brillance (BT). Ces indices sont disponibles au pas de temps journalier à hebdomadaire.

Le NDVI et le VHI ont été retenus en raison de leur pertinence pour l'analyse à long terme de la dynamique de la végétation et de ses interactions avec le climat (Tableau II.4). En effet, ces indices de végétation sont très sensibles à variation des saisons et du climat en zone sahélienne ou zone semi-aride. Le tableaux II.4 résume les avantages et limites de ces indices de végétation utilisés dans ce travail.

Tableau II.4 : Comparaison des données NDVI et VHI

Critère	NDVI (NOAA-CDR AVHRR, NOAA-STAR)	VHI (NOAA-STAR)
Définition	Indice de végétation basé sur la réflectance dans le rouge et le proche IR	Indice de santé de la végétation combinant NDVI et indice de température (TCI)
Objectif principal	Suivi de la productivité et de la couverture végétale	Détection du stress hydrique et thermique, suivi des sécheresses
Avantages	Longues séries temporelles homogénéisées (>40 ans), corrigées des effets atmosphériques et géométriques, robustesse globale, large couverture spatiale	Intègre deux dimensions (végétation et température), plus sensible aux stress climatiques
Limites	Saturation en zones de végétation dense, sensibilité aux effets atmosphériques et à l'angle de visée	Dépendance à la qualité des données TCI, sensibilité au bruit, nécessite calibration régionale
Résolution spatiale	0,01° à 0,036° (1 à 4 km)	0,01° à 0,036° (1 à 4 km)
Résolution temporelle	Journalière/Hebdomadaire	Hebdomadaire à mensuelle
Fréquence de mise à jour	Journalière (délai 2 à 3 jours, quasi en temps réel)	Hebdomadaire (quasi en temps réel)

II.2.1.2. Données d'occupation des sols « Land cover »

Le couvert végétal peut aussi être étudié à partir des cartographies de l'occupation du sol (Land cover) qui sont générées à plusieurs dates. Ces produits « Land cover » permettent de visualiser et de quantifier l'évolution des différents types de couvert végétal.

Les données d'occupation du sol, que nous avons utilisées, proviennent de la base de l'Agence Spatiale Européenne (European Space Agency Climate Change Initiative Land Cover « ESA-CCI LC ») et de Copernicus Climate Change. Cet ensemble de données fournit des cartes mondiales décrivant la surface terrestre en 22 classes définies à l'aide du système de classification de la couverture terrestre (Land Cover Classification System « LCCS » [Di Gregorio & Jansen, 2005](#)) de l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) ([ESA, 2017](#) ; [Defourny et al., 2017](#)).

Cette base a une résolution spatiale de 300 m et est disponible de 1992 à nos jours, avec un décalage d'une année (1992-2020). L'ESA-CCI LC est un produit combiné de la réflectance de la surface globale provenant de différentes missions satellites (ENVISAT, MERIS, SPOT 4, SPOT 5, Proba-V, NOAA-15(AVHRR)). Ces données sont disponibles sur les sites <http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download.php>. et <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/satellite-land-cover/>. Les détails sur la validation approfondie effectuée sur les cartes mondiales d'occupation des sols sont disponibles dans le rapport d'évaluation de la qualité du produit (https://datastore.copernicus-climate.eu/documents/satellite-land-cover/D5.2.3_PQAR_ICDR_LC_v2.1.x_PRODUCTS_v1.1.pdf ; ECMWF, 2021).

Grâce à la cohérence des données à long terme, aux mises à jour annuelles et au niveau élevé de détails thématiques basés sur des données d'observation à l'échelle mondiale, la série de cartes LC de ESA-CCI a servi de données d'entrée pour diverses applications comme l'impact du changement d'occupation du sol (LCC) sur le climat (Duveiller *et al.*, 2020), les reconstructions historiques à long terme pour la modélisation climatique de la LC et la comptabilité de la biodiversité (Lurton *et al.*, 2020 ; Houghton *et al.*, 2023), ainsi qu'à la surveillance des forêts (Akinyemi *et al.*, 2018 ; Kganyago *et al.*, 2019) et de la désertification dans les domaines de la recherche scientifique (Plummer *et al.*, 2017 ; Zhang *et al.*, 2020), de l'élaboration des politiques et dans le secteur des affaires (UNCCD, 2018 ; OCDE, 2020 ; FAO, 2022).

Dans le cadre de l'élaboration des rapports en 2018 à la CNULCD (Convention des Nations Unies sur la Lutte Contre la Désertification ou UNCCD) les données d'occupation des sols LC ESA-CCI ont été conseillées pour évaluer les indicateurs suivants : tendances de la couverture terrestre ; tendances de la productivité des terres ; tendances des stocks de carbone organique. Ces données ont été fournies aux pays membres comme données par défaut de niveau 1 (UNCCD, 2018).

La figure II.7 présente un schéma des utilisations et applications des données climatiques et d'occupation des sol d'ESA-CCI.



Figure II.7: Schéma illustrant les utilisations et applications des données climatiques et d'occupation des sol d'ESA-CCI (source : <https://climate.esa.int/fr/projects/land-cover/about/user-uptake/>)

II.2.2. Données climatiques

Afin d'analyser l'évolution du climat dans la zone d'étude et ses éventuelles interactions avec le couvert végétal, nous nous sommes appuyés sur les données de précipitations (CHIRPS), d'humidité du sol (NOAA-CPC) et d'évapotranspiration (GLEAM) entre 1981 et 2020.

II.2.2.1. Données de Précipitations (CHIRPS)

Les données de précipitations CHIRPS (Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations) sont des données construites par combinaison des données d'observation des stations, des données de température de sommet de nuages et des données issues de la climatologie. Les données CHIRPS étaient originellement produites pour l'analyse des tendances climatiques et le suivi saisonnier de la sécheresse (Funk *et al.*, 2015). Il s'agit d'un jeu de données de précipitations quasi-mondiales, d'une résolution spatiale de 5km et couvre la période 1981 à aujourd'hui. Ces données sont accessibles à l'adresse <https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/>.

II.2.2.2. Données d'humidité du sol (NOAA-CPC Soil moisture)

Dans le cadre de notre analyse des interactions climat-végétation, les données d'humidité du sol NOAA-CPC ont été utilisées comme indicateur des conditions hydriques de surface. Ce jeu de données d'humidité du sol, développé par le Climate Prediction Center de la NOAA repose sur une assimilation multi-source (satellites micro-ondes passives, modèles de réanalyse et données pluviométriques) pour estimer l'humidité volumétrique des sols. Ces données d'humidité du sol représentent une moyenne journalière ou mensuelle d'équivalent en hauteur d'eau du sol. Avec une résolution de 0,5° et une couverture temporelle étendue (de 1948 à aujourd'hui), ce produit est largement utilisé pour le suivi hydrologique (surveillance des sécheresses et des inondations), les études sur le climat et l'évolution des sols, les prévisions agricoles et la gestion des ressources en eau (Huug van den Dool *et al.*, 2003). Ces données sont disponibles en libre accès à l'adresse <https://www.psl.noaa.gov/data/gridded/data.cpcsoil.html>.

II.2.2.3. Données d'évapotranspiration (GLEAM)

Les données d'évapotranspiration utilisées dans notre étude proviennent du jeu de données GLEAM v4 (Global Land Evaporation Amsterdam Model, Martens *et al.*, 2017) et disponible à l'adresse <https://www.gleam.eu/>. Le modèle GLEAM est un ensemble d'algorithmes qui estiment séparément les différentes composantes de l'évapotranspiration terrestre : transpiration, évaporation du sol nu, perte par interception, évaporation de l'eau libre et sublimation. En outre, GLEAM fournit l'humidité du sol en surface et dans la zone racinaire, l'évaporation réelle, l'évaporation potentielle et les conditions de stress évaporatif. Les données GLEAM ont une couverture mondiale sur la période du 1^{er} janvier 1980 au 31 décembre 2023. Ces données journalières sont disponibles sur une grille régulière de 0,1°×0,1° (10km×10km).

II.2.3. Le modèle climatique régional RegCM4 (Regional Climate Model)

II.2.3.1. Présentation du modèle climatique RegCM4.7

Le modèle climatique utilisé dans cette thèse est la quatrième génération du modèle climatique régional RegCM et la version 4.7 Non-Hydrostatique (Coppola *et al.*, 2021) développé par le Centre International « Abdus Salam international Center for Theoretical Physics » ICPT à Trieste en Italie.

Le RegCM4 est un modèle à aire limitée, avec une discrétisation par différences finies utilisant un système de coordonnées verticales de pression σ (sigma) suivant le terrain et un algorithme de différences finies à grille horizontale Arakawa-B. En plus du noyau hydrostatique, la dynamique de la version RegCM4.7 possède le noyau non hydrostatique du Modèle de Mésos-échelle MM5 de l'Université de Pennsylvanie (Grell *et al.*, 1994), permettant des simulations à haute résolution (3 km de résolution pour l'étude de Coppola *et al.*, 2021). Ce modèle vise à simuler l'évolution de l'atmosphère à différentes échelles spatiales et temporelles en prenant en compte les bilans radiatifs, la chimie et la dynamique atmosphérique, l'effet des aérosols sur les transferts radiatifs et la formation de nuages, les précipitations. Son schéma de rayonnement s'inspire du modèle NCAR CCM3 (Kiehl *et al.*, 1996), avec une représentation des aérosols (Zakey *et al.*, 2006). La version RegCM 4.7 propose six (6) schémas de convection différents (schéma de Kuo, schéma de Grell, schéma d'Emanuel, schéma de Tiedtke, schéma de Kain-Fritsch et schéma de MM5 Shallow cumulus) (Coppola *et al.*, 2021). Il comprend également des processus détaillés complexes tels que les processus de transfert radiatif, les processus nuageux à l'échelle de la grille et de la sous-maille, les processus de mélange de la turbulence et les processus de la surface du sol (Giorgi *et al.*, 2012 et Coppola *et al.*, 2021).

Les améliorations du RegCM4 concernent la précision dynamique, les processus physiques, l'efficacité du code et la modélisation de la surface terrestre. Pour une description complète du modèle et de ses paramétrisations, il convient de se référer aux travaux de Giorgi *et al.* (2012, 2023) et Coppola *et al.* (2021).

II.2.3.2. Présentation des schémas de surface utilisés

a) Schéma de surface BATS (Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme, ou BATS)

Le schéma BATS (Schéma de Transfert Biosphère-Atmosphère version 1E, ou simplement BATSE, la version utilisée dans ce travail) a été développé par Dickinson *et al.* (1989), et c'est le schéma standard de surface terrestre du modèle RegCM depuis de nombreuses années. Ce schéma a été amélioré au fil des ans grâce à différentes versions. Il est constitué d'une couche de végétation, d'une couche de neige et d'un schéma de sol à trois niveaux (une couche de sol en surface de 10 cm de profondeur, une zone racinaire de 1 m de profondeur pour la végétation courte et de 2 m pour les surfaces boisées). La couverture terrestre est constituée de 20 classes d'occupation du sol conformément à la carte des sols de la FAO (Dickinson, *et al.*, 1993). Une paramétrisation de type mosaïque de la topographie et de l'occupation des sols à l'échelle de la

sous-maille a été mise en œuvre. Cette paramétrisation utilise une sous-maille de surface régulière à échelle fine pour chaque cellule de la grille du modèle grossier. La représentation de l'hydrologie de surface du modèle comprend des équations prédictives pour la teneur en eau de la couche superficielle du sol et de la zone racinaire. Ces équations tiennent compte des précipitations, de la neige, de l'évapotranspiration, du ruissellement de surface, de l'infiltration sous la zone racinaire et de l'échange diffus d'eau entre les couches du sol. Le bilan hydrique est calculé pour une profondeur de 1 à 2 m, qui est la couche de sol la plus importante pour le processus biologique.

b) Schéma de surface CLM4.5 (Community Land Model 4.5)

Le modèle CLM4.5 ou Modèle de terrain communautaire version 4.5 utilise un ensemble de paramètres couplant les processus bio-géophysiques, biogéochimiques et biogéographiques pour décrire les échanges d'énergie, de quantité de mouvement, d'eau et de carbone entre la surface et l'atmosphère. Il est actuellement développé au NCAR. Les cellules de la grille sont divisées en une première hiérarchie de sous-grilles composée d'unités d'occupations de sol multiples (zones humides, végétation, lacs et zones urbaines) et en deuxième et troisième hiérarchies de sous-grilles pour les unités de surface végétalisées, y compris différentes colonnes neige/sol et types fonctionnels de plantes (Oleson *et al.*, 2008). Le taux de sable et d'argile varie en fonction de la profondeur des données sol de résolution 0,08° pour produire les données de texture du sol (Bonan *et al.*, 2002). Dans le cas du couplage RegCM-CLM, le modèle de surface CLM simule les échanges d'énergie entre le sol et l'atmosphère, le développement de la végétation, l'hydrologie du sol ainsi que l'évolution bio-physico-chimique du sol, notamment les cycles C et N. Les variables simulées ayant un impact sur l'évolution de l'atmosphère sont ensuite transférées vers le modèle RegCM.

Le tableau II.5 ci-dessous donne un bref résumé des paramètres et des attributs des schémas de surface BATS et CLM4.5.

Tableau II.5 : Comparaison des configurations des schémas de surfaces BATS1E et CLM4.5 dans le modèle RegCM 4.7

Paramètres	BATS 1E	CLM 4.5
Nombre de couches du sol	3	10
Calcul de la température du sol	Méthode de restauration forcée	Équation de diffusion de chaleur
Gel et dégel du sol	Oui	Nouveau modèle de sol gelé (eau du sol surfondue)
Nombre de couches de neige	1	5
Paramètres d'occupation du sol	20 (GLCC)	5 unités terrestres, 17 types fonctionnels de représentation de la végétation
Données de surface	LAI (Leaf area index)	Produits MODIS
Texture du sol	Carte des sols du monde de la FAO	Base de IGBP

c) Données nécessaires à l'exécution d'une simulation

Les conditions atmosphériques du modèle ont été initialisées et forcées toutes les six heures par les réanalyses ERA-Intérim de résolution spatiale de $1,5^{\circ} \times 1,5^{\circ}$ (Dee *et al.*, 2011). Ces données de réanalyses du Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT/ECMWF) résultent de la combinaison des sorties d'un modèle météorologique avec toutes les mesures d'observations (observation in situ, radiosondages, observation par satellites, avions de recherche pour des mesures) et sont disponibles depuis 1979. Dans les régions où les données d'observations sont insuffisantes comme en Afrique de l'Ouest, ces réanalyses sont les meilleurs moyens de décrire l'état physique de l'atmosphère. Les produits ERA-Intérim sont de bonne qualité et leur homogénéité à long terme s'est considérablement améliorée. Elles ont été utilisées pour diverses études en raison de leur bonne capacité à reproduire les principaux composants du système de Mousson ouest africain (Dee *et al.*, 2011 ; Diallo *et al.*, 2014). Les données de forçage des conditions océaniques (SST pour Sea Surface Temperature) hebdomadaires avec interpolation optimisée sont fournies par la NOAA à une résolution de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ (Reynolds *et al.*, 2002). Ces données OISST constituent l'une des principales références mondiales pour l'étude de la température de surface de la mer (SST). Elles combinent des observations satellitaires (AVHRR, Capteurs micro-ondes) et in-situ (navires, bouées, flotteurs) pour produire une analyse globale et quotidienne depuis 1981.

Diba *et al.* (2016), Koné *et al.* (2018) et Kouassi *et al.* (2022) ont montré que le modèle RegCM4 arrivait à bien simuler le climat de l'Afrique de l'Ouest.

II.2.4. Synthèse des jeux de données

Cette section rappelle les sources, les périodes de couverture ainsi que les résolutions spatio-temporelles des données de suivi de la végétation et du climat mobilisées dans le cadre de cette étude. Le tableau II.6 ci-après en propose une synthèse.

Tableau II.6 : Synthèse des données de végétation et de paramètres climatiques

Paramètres	Sources	Résolutions spatio-temporelles
NDVI	NOAA-CDR et NOAA-STAR https://www.ncei.noaa.gov/thredds/catalog/cdr/ndvi/catalog.html/ , et https://www.star.nesdis.noaa.gov/pub/corp/scsb/wguo/data/Blended_VH_4km/VH/ .	<ul style="list-style-type: none"> • 0,01 à 0,036° (1 à 4 km) • Journalière/hebdomadaire • Oct. 1981 à présent.
VHI	NOAA-STAR https://www.star.nesdis.noaa.gov/pub/corp/scsb/wguo/data/Blended_VH_4km/VH/	<ul style="list-style-type: none"> • 0,036° (~ 4 km) • Hebdomadaire • Oct. 1981 à présent
Occupation du sol	ESA-CCI et COPERNICUS http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download.php . et https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/satellite-land-cover/ .	<ul style="list-style-type: none"> • 300 m • Annuelle • 1992 à présent
Précipitations	CHIRPS 2.0 https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/	<ul style="list-style-type: none"> • 5 km • Journalière/mensuelle • 1981 à nos jours
Humidité du sol	NOAA-CPC https://www.psl.noaa.gov/data/gridded/data.cpc_soil.html .	<ul style="list-style-type: none"> • 0,5° • Mensuelle • 1948 à nos jours
Evapotranspirations (réelle et potentielle)	GLEAM v4 https://www.gleam.eu/	<ul style="list-style-type: none"> • 10km • Journalière/Mensuelle • 1980 à nos jours

II.3. Méthodologie

Afin d'analyser et d'expliquer la variabilité de la couverture végétale et des différents paramètres climatiques (précipitations, humidité du sol, évapotranspiration) au niveau des localités de la GMV du Sénégal, nous avons procédé dans un premier temps par l'utilisation des méthodes descriptives des données climatiques et de végétation (calculs d'anomalies, détection d'éventuelles ruptures), une analyse spectrale pour explorer, caractériser et quantifier le contenu fréquentiel, mais aussi visualiser les variations temporelles au cours du temps. Ensuite, une analyse comparative a été réalisée pour évaluer l'effet du reboisement sur différents paramètres du climat.

II.3.1. Analyses descriptives

II.3.1.1. Calculs de l'anomalie et de tendances

Le calcul et la représentation des anomalies de nos séries chronologiques permettent de regarder les fluctuations autour de l'état moyen du climat. En plus de comparer l'évolution des paramètres de différentes zones, les calculs d'anomalies normalisés de précipitations (SPI), ou de végétation (VAI), nous permettent de :

- retirer le signal saisonnier de nos séries mensuelles pour faire ressortir les différents modes de variabilité et étudier la variabilité des paramètres.
- retirer le signal climatique des séries annuelles en vue de mettre en évidence les différentes périodes d'évolution de nos paramètres (période humide, période sèche, sécheresse, stress de la végétation...).
- détecter les événements extrêmes sur la végétation et les précipitations (exemple de sécheresse météorologique et de stress de la végétation).

i) Indice de précipitations normalisé ou anomalie standardisée de précipitations (SPI) :

Le calcul de l'indice SPI se fait suivant l'équation ci-dessous :

$$SPI_i = \frac{(P_i - P_m)}{\sigma} \quad (II.1)$$

Où P_i représente la pluviométrie de l'année i (ou du mois i) ; P_m : Pluviométrie moyenne annuelle (ou moyenne mensuelle) sur la période considérée ; σ : Écart type de la pluviométrie annuelle sur la période considérée (ou du mois) et SPI_i est l'indice de précipitations normalisé.

Lorsque l'indice SPI est négatif, nous avons une période sèche et un SPI positif indique des conditions climatiques humides. Selon le tableau de l'OMM (OMM, 2012, Tableau II.7), nous pouvons caractériser le degré d'une sécheresse par exemple.

Tableau II.7: Interprétation de l'indice SPI (Source : Guide d'utilisation de l'indice de précipitation normalisé OMM N°1090, 2012)

Valeurs SPI	Niveau d'humidité
2,0 et plus	Extrêmement humide
De 1,5 à 1,99	Très humide
De 1 à 1,49	Modérément humide
De -0,99 à 0,99	Proche de la normale
De -1,0 à -1,49	Modérément sec
-1.5 à -1,99	Très sec
-2,0 et moins	Extrêmement sec

ii) Indice d'anomalie de la végétation (VAI)

L'indice statistique VAI (Vegetation Anomaly Index) décrit l'état du stress hydrique de la végétation. Cet indice quantitatif permet de décrire à l'échelle mensuelle (ou annuelle) l'état de la végétation.

$$VAI_i = \frac{NDVI_i - (NDVI)_moyenne}{\sigma} \quad (II.2)$$

Une valeur positive du VAI indique une dynamique satisfaisante de la végétation, alors qu'un VAI négatif indique la présence de stress de la végétation (Amri *et al.*, 2011).

A l'indice VAI, nous associerons la valeur de l'indice de santé de la végétation (VHI) qui sera interprété suivant les recommandations de Kogan (2001) et de Bhuiyan *et al.* (2006) qui sont résumés dans le tableau II.8.

Tableau II.8: Gravité de la sécheresse selon les seuils de l'indice VHI

Niveau de sévérité des conditions climatiques	Valeurs VHI
Sécheresse extrême	< 10
Sécheresse sévère	10 - 20
Sécheresse modérée	20 - 30
Sécheresse légère	30 - 40
Pas de sécheresse	> 40

iii) Analyses des tendances générales et des fluctuations : lissage par LOESS

La régression locale LOESS (Locally Estimated Scatterplot Smoothing) est une méthode de régression non paramétrique, c'est-à-dire qu'il n'existe pas d'hypothèses quant à la

forme de la fonction de régression. Elle permet d'analyser l'évolution à long terme sans a priori, qu'elle soit effectivement linéaire ou plus structurée. Cette méthode est l'équivalent d'un lissage ou moyenne mobile, employée à titre exploratoire sur les séries temporelles et permettant notamment de mettre en évidence les fluctuations caractéristiques contenues dans une série de données. Le lissage LOESS permet une relativement bonne conservation de la variance du signal analysé. L'ajustement par polynômes est effectué localement sur l'ensemble de la série de données et repose sur la méthode des k plus proches voisins (pondération par rapport à la distance à ce point). La fenêtre d'ajustement peut être choisie en fonction du type de données, de leurs pas d'échantillonnage, etc. Cet outil est donc bien adapté à l'exploration des fluctuations hydrologiques et climatiques (Cleveland *et al.*, 1979 ; Dieppois, 2011).

Dans cette thèse, l'analyse des tendances à long terme et les fluctuations pluriannuelles de nos séries chronologiques se sont faites par l'ajustement respectif des fenêtres de largeur égale à 100% (LOESS-100% ; tendance à long terme) et 25% (LOESS-25% ; tendance à court terme) du nombre de valeurs des données.

II.3.1.2. Détection de ruptures par l'approche statistique (test de Pettitt, test de Buishand et test bayésien BEAST)

La recherche de rupture (année de changement de la moyenne ou de tendance) dans nos séries temporelles de végétation et de paramètres climatiques, s'est faite par l'utilisation des tests de Pettitt (Pettitt, 1979), de Buishand (Buishand *et al.*, 1984) et du test bayésien BEAST de Zhao *et al.* (2019). En effet, l'absence de rupture dans la série temporelle constitue l'hypothèse nulle pour les tests de Pettitt et Buishand qui permettent de détecter une seule rupture (la rupture principale). En vue d'évaluer la significativité de cette rupture, la probabilité (P_v) associée aux statistiques de ces tests est interprétée suivant le tableau II.9 ci-dessous (Paturel *et al.*, 1998).

Tableau II.9: Probabilité associée aux tests de Pettitt et de Buishand

Probabilité associée (P_v)	Classe
< 1%	Rupture très significative
1-5%	Rupture significative
5-20%	Rupture peu significative
>20%	Série homogène (Rupture Non Significative)

Quant au test BEAST, il permet de déceler éventuellement plusieurs ruptures dans les tendances avec les probabilités et pentes associées aux apparitions de ces ruptures.

a) Statistiques du test de rupture de Pettitt

Le test de Pettitt est un test non paramétrique qui dérive du test de Mann-Whitney basé sur les rangs, permettant d'identifier le temps auquel se produit un changement (Pettitt, 1979). Il s'applique à des séries non auto-corrélées. L'absence d'une rupture dans la série de taille N constitue l'hypothèse nulle. Et les statistiques du test de Pettitt sont données par les relations suivantes ci-dessous :

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N \text{sign}(X_i - X_j), \text{ avec } \text{sign}(X_i - X_j) = \begin{cases} 1 & \text{si } (X_i - X_j) > 0 \\ 0 & \text{si } (X_i - X_j) = 0 \\ -1 & \text{si } (X_i - X_j) < 0 \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

$$K_N = \max |U_{t,N}| \quad (\text{II.4})$$

En se basant sur la théorie des rangs, Pettitt a donné la probabilité de dépassement de la valeur K par la formule approchée suivante :

$$Pv = 2 \times \exp \left(\frac{-6K_N^2}{N^3 + N^2} \right) \quad (\text{II.5})$$

Où on rejettera l'hypothèse nulle lorsque la probabilité est inférieure à un risque α . Dans ce cas, la série présente une rupture au temps t où est observé K_N .

b) Statistique du test de rupture de Buishand

Le test de Buishand est basé sur la comparaison des moyennes entre deux périodes de temps. Il est calculé comme la somme des différences entre les moyennes des deux périodes, ajustée pour la taille de l'échantillon et la variabilité de la série temporelle (Buishand *et al.*, 1984). Cette statistique suit une distribution normale sous l'hypothèse nulle de stabilité de la série temporelle. La statistique U du test peut être résumée comme suit :

$$U = \frac{1}{n(n+1)} \sum_{k=1}^{n-1} \left(\frac{S_k}{D_x} \right)^2 \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$$S_k = \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x}) \quad (1 \leq i \leq k) \quad (\text{II.7})$$

$$D_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{II.8})$$

Où :

- n est le nombre total d'observations dans la série temporelle.
- x_i est la valeur de l'observation à l'instant i .
- $\bar{x}$ est la moyenne de la série temporelle.

Si la valeur calculée de U dépasse un certain seuil, cela suggère un changement significatif dans la moyenne de la série temporelle. A cette statistique U est associée une probabilité selon une procédure de Monte Carlo.

c) Méthode bayésienne - BEAST

Dans cette section, les grandes lignes de la méthode bayésienne de détection de rupture et de tendance seront présentées ([Andrew et al., 2013](#) ; [Zhao et al., 2019](#)), et ensuite le test BEAST expliqué.

Contrairement aux méthodes classiques de détection de ruptures qui reposent souvent sur des hypothèses de distribution spécifiques ou sur des seuils prédéfinis (méthode fréquentielle), les tests de rupture bayésienne utilisent des approches probabilistes basées sur la théorie bayésienne. Un résumé des étapes de cette méthode est donné comme suit :

- Modélisation du processus** : On commence par définir un modèle probabiliste qui décrit le processus sous-jacent.
- Estimation a priori** : On spécifie les distributions a priori pour les paramètres du modèle ainsi que pour les positions potentielles des changements. Ces distributions a priori reflètent les connaissances initiales sur les paramètres et les changements.
- Calcul de l'a postérieur** : En utilisant le théorème de Bayes, les distributions a priori sont mises à jour en tenant compte des données observées, pour obtenir les distributions a posteriori des paramètres et des positions de rupture.
- Décision de rupture** : Enfin, les tests de rupture bayésienne comparent les modèles avec et sans rupture en utilisant les distributions a posteriori des paramètres. En plus, ils fournissent des mesures de probabilité ou de crédibilité pour chaque hypothèse de rupture, permettant ainsi de quantifier l'évidence en faveur ou en défaveur d'un changement.

Ces tests de rupture bayésienne offrent plusieurs avantages par rapport aux approches classiques. Ils permettent notamment une prise en compte plus naturelle de l'incertitude, une

flexibilité dans la modélisation des changements, ainsi qu'une adaptation automatique du nombre de ruptures détectées en fonction des données.

Le test bayésien utilisé dans cette thèse est l'algorithme BEAST (*Bayesian Estimator of Abrupt Change, Seasonal Change and Trend*, de [Zhao et al., 2019](#)). BEAST décompose une série temporelle (Y_i) en signaux saisonniers, tendance, changements brusques et bruit selon la formule suivante :

$$Y_i = S(t_j, \theta_s) + T(t_i, \theta_t) + \varepsilon_i \quad (\text{II.9})$$

Où $S(\cdot)$ et $T(\cdot)$ représentent respectivement les signaux saisonniers et de tendance quand ε_i est la composante de bruit supposée avoir une distribution gaussienne avec une amplitude de σ . Les changements brusques dans les composantes saisonnières et tendanciennes sont représentés respectivement par θ_s et θ_t . Ces paramètres fournissent des informations sur la probabilité, les intervalles de confiance et le nombre de changements brusques estimés par l'outil. Les dates des changements brusques sont repérées par t_j dans la composante saisonnière et t_i dans la tendance ([Zhao et al., 2019](#)).

En résumé, les ruptures dans nos différentes séries temporelles ont été identifiées à l'aide de trois (3) tests :

- Test de **Pettitt** : adapté à la détection d'un point de changement unique dans une série.
- Test de **Buishand** : utile pour détecter un changement de moyenne et adapté aux changements graduels ou aux biais systématiques.
- Test bayésien **BEAST** : approprié pour détecter plusieurs ruptures dans la tendance, dans la saisonnalité.

Et, les résultats ont été considérés comme statistiquement significatifs pour des p-valeurs inférieures à 0,05 (seuil de confiance de 95 %), et fortement significatifs pour des p-valeurs inférieures à 0,01 (seuil de confiance de 99 %) (Voir Tableau II.9).

Notons que le choix d'utiliser plusieurs tests de détection de rupture repose sur le fait qu'aucun test ne garantit une sensibilité optimale dans toutes les configurations de données. L'utilisation combinée de ces tests permet donc :

- i) D'améliorer la robustesse des résultats,
- ii) De limiter les faux positifs liés aux particularités d'un test unique,
- iii) Et de mieux caractériser la nature des ruptures détectées (unique, multiple, progressive ou brutale).

II.3.2. Analyses spectrales

Les analyses spectrales sont utilisées afin d'examiner et de caractériser le contenu fréquentiel d'un signal climatique, qu'il soit global, régional ou local. La transformée en ondelettes constitue un outil particulièrement adapté pour les données environnementales, car elle permet d'analyser simultanément **la fréquence** et **l'évolution temporelle** des composantes du signal, ce qui est essentiel dans le cas de phénomènes **non stationnaires** tels que la pluviométrie, l'humidité du sol ou l'indice de végétation.

Dans cette étude, la transformée en ondelettes sera appliquée aux séries chronologiques de végétation et de précipitations afin de :

- **Identifier les principaux modes de variabilité** (saisonnier, interannuel, décennal) ;
- **Détecter la variabilité transitoire** liée à des événements ponctuels (sécheresses, années humides, interventions de reboisement) ;
- **Mettre en évidence les changements de régime climatique** et leur synchronisation éventuelle avec la dynamique de la végétation.

Sur le plan technique, la méthode consiste à décomposer chaque série en ondelettes filles générées à partir d'une fonction de référence appelée ondelette mère. Chaque ondelette fille est localisée à la fois dans le temps et dans l'échelle (inverse de fréquence), permettant de construire un **spectre temps–fréquence** qui indique l'intensité (puissance) des composantes de variabilité dominantes au cours du temps ([Grinsted et al., 2004](#) ; [Schulte, 2015](#)).

La pertinence de cette méthode dans un contexte climatique s'explique par :

- i) **L'adaptation à la nature intermittente des signaux climatiques**, souvent perturbés par des anomalies ponctuelles ;
- ii) **La capacité à analyser plusieurs échelles temporelles simultanément**, ce qui permet d'isoler des cycles naturels (par exemple la saisonnalité, ENSO) et des tendances de long terme ;
- iii) **La robustesse face aux données bruitées ou incomplètes**, fréquentes dans les séries climatiques ;
- iv) **La possibilité de lier directement les signatures spectrales à des processus physiques** (par ex. interactions biosphère–atmosphère).

L'ondelette mère comprend deux paramètres de temps–fréquence (ou échelle de temps) :

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (\text{II.10})$$

Où

$\psi_{a,b}(t)$: est l'ondelette analysante ou ondelette fille ;

a : est un paramètre d'échelle ;

b : est un paramètre de position.

Un cône de significativité à un niveau de confiance de 95% est associé à cette décomposition suivant la méthode de Monte Carlo. Nous allons aussi représenter le spectre global de puissance de chaque signal avec des niveaux de confiance de 95%, 99% et 99.9%.

II.3.3. Cartographie et dynamique de l'Occupations des sols - Analyse diachronique.

La dynamique de l'occupation du sol se définit comme une évolution spatio-temporelle des classes d'occupation du sol, soit vers un stade de dégradation ou d'amélioration, soit vers un état d'équilibre plus ou moins stable (Taibou *et al.*, 2012 ; Biga *et al.*, 2020). Cette dynamique permet de synthétiser les changements des classes d'occupation du sol intervenus dans un même paysage à différentes périodes (Barima *et al.*, 2010).

Dans le chapitre 4, la méthode de comparaison des différences de classe d'occupation du sol (analyse diachronique) entre différentes périodes (de 1992 à 2020 ou bien de 2000 à 2020) sera utilisé pour analyser la dynamique du changement du couvert végétal. Il s'agira dans un premier temps de cartographier le couvert végétal à partir des données d'occupation du sol (Land Cover ESA-CCI LC) sur une localité donnée pour une période donnée. Ensuite, à l'aide de l'analyse d'histogramme d'image, la surface de chaque classe sera calculée. En effet, les histogrammes d'image synthétisent visuellement la distribution d'une variable numérique continue en mesurant la fréquence à laquelle certaines valeurs apparaissent dans l'image.

Pour chaque carte réalisée, les statistiques des différentes classes d'occupation du sol seront présentées en surface relative, c'est-à-dire le rapport de la superficie occupée par une classe d'occupation du sol et la superficie de la commune. La dynamique de l'occupation du sol résulte de la différence entre les périodes (carte 2020 et carte 1992 par exemple).

Pour finir, les taux de changement (Tc) de l'occupation du sol et d'évolution moyen annuel (Te) entre deux dates seront calculés pour chaque classe d'occupation du sol.

$$Tc = \left(\frac{A2-A1}{A1} \right) \times 100 \quad (\text{II.11})$$

A1 et A2 sont respectivement la superficie initiale et finale de la classe d'occupation du sol.

- Si $Tc = 0$, on conclut qu'il y a stabilité de cette catégorie d'occupation du sol ;
- Si $Tc < 0$, on conclut qu'il y a régression de cette classe d'occupation du sol ;
- Si $Tc > 0$, il y a extension ou évolution de cette classe d'occupation.

Le taux d'évolution moyen annuel de chaque classe d'occupation des terres est calculé suivant la formule ci-après :

$$Te = \left(\frac{100}{t2-t1} \right) \times \ln \frac{A2}{A1} \quad (\text{II.12})$$

Te : Taux d'évolution annuel de la classe « i » ; A1 : superficie de la classe « i » au temps t1 ; A2 : superficie de la classe i au temps t2.

II.3.4. Estimation du stockage de carbone de la végétation

Le carbone organique, déterminant majeur des propriétés des sols et élément essentiel des cycles de carbone et des gaz à effet de serre, est très sensible à l'utilisation et la gestion des terres : forêt, savane, culture, prairie (IPCC, 2006 ; UNCCD, 2018 ; IRD, 2020). Ainsi, l'estimation et la variation des stocks de carbone, au sein des sites de la Grande Muraille Verte du Sénégal, utilise comme proxy l'occupation du sol (cartographie de la végétation, IPCC, 2006; Vannier *et al.*, 2017 ; UNCCD, 2018; Mba *et al.*, 2020; Dai *et al.*, 2020; Aitali *et al.*, 2022 ; DREAL, 2022), les valeurs moyennes de stock de carbone des données bibliographiques de la région (Loum *et al.*, 2014 ; MEPN *et al.*, 2016; Ndour *et al.*, 2020; Chevallier *et al.*, 2020; N'Goran *et al.*, 2022) et l'équation (II.13) ci-dessous (Tableau II.10).

$$\text{Séquestration de Carbone}_{LCi} = \text{Surperficie}_{LCi} \times \text{Stock}_{LCi} \quad (\text{II.13})$$

Où :

- Séquestration de Carbone LCi : est la séquestration de carbone liée à la classe « i » d'occupation du sol en tonne Carbone (t.C) ;
- Surperficie LCi est la surperficie de la classe « i » exprimée en hectare (ha) ;
- Stock LCi est le taux de stockage carbone de la classe « i », exprimé en t.C/ha.

Ces différentes études fournissent des valeurs moyennes de stock de carbone par unité de surface. Ces travaux d'estimation du stockage de carbone s'appuient sur les méthodes

allométriques (Henry *et al.*, 2011 ; Mbow *et al.*, 2013 ; Ndour *et al.*, 2020 ; Ndiaye *et al.*, 2021) et l'analyse spectrométrique infrarouge sur les prélèvements d'échantillons de sol d'un site (Teng *et al.*, 2016 ; Cambou *et al.*, 2016 ; Barthès *et al.*, 2020 ; N'Goran *et al.*, 2022). Les équations allométriques permettent d'estimer la quantité de carbone stockée dans une zone, à partir de sa biomasse totale en utilisant les informations mesurables tels que la hauteur de l'arbre, le diamètre du tronc, la circonférence du tronc, la densité du bois. Et, pour mesurer le stock de carbone issu d'un échantillon de sol sur une épaisseur donnée, il faut connaître la teneur en carbone du sol (en g C.kg⁻¹ sol), la densité du sol et la proportion de graviers (>2 mm) qui s'y trouvent (en kg.dm⁻³).

Ensuite, pour mieux apprécier la dynamique du stock de carbone dans le sol, nous avons calculé les stocks moyens et les anomalies standardisées du stock de carbone sur la période 1992–2020 (Chapitre IV).

II.3.5. Calcul de l'incertitude associée à la séquestration de carbone

Aux différents résultats de séquestration de carbone, nous avons calculé les incertitudes selon les lignes directrices du GIEC (IPCC, 2006). Pour pouvoir réaliser ces calculs, il est normalement nécessaire de connaître l'incertitude qui pèse sur tous les paramètres rentrant en compte dans la détermination des stocks de carbone organique du sol (les différentes classes d'occupation du sol). Les informations connues, qu'il faut combiner pour les calculs, sont donc les incertitudes sur les classes d'occupation des sols et les stocks moyens associés à chaque classe d'occupation du sol lorsque cette dernière est disponible. La méthode GIEC pour la combinaison de quantités incertaines par multiplication utilise l'équation (II.14) et pour l'addition ou soustraction l'équation (II.15) :

$$I_{totale} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2} \quad (\text{II.14})$$

- I_{totale} : Incertitude du produit des quantités de stocks de carbone ;
- I_i : Incertitude associé à chaque quantité de stock de carbone.

$$I_{totale} = \frac{\sqrt{(x_1 \times I_1)^2 + (x_2 \times I_2)^2 + \dots + (x_n \times I_n)^2}}{|x_1 + x_2 + \dots + x_n|} \quad (\text{II.15})$$

- I_{totale} : Incertitude de la somme des quantités de stocks de carbone ;
- x_i et I_i : Quantité incertaines de stocks de carbone et leurs incertitudes respectives.

Tableau II.10: Valeurs moyennes de stocks de carbone du sol issus des données bibliographiques de la région (Sénégal)

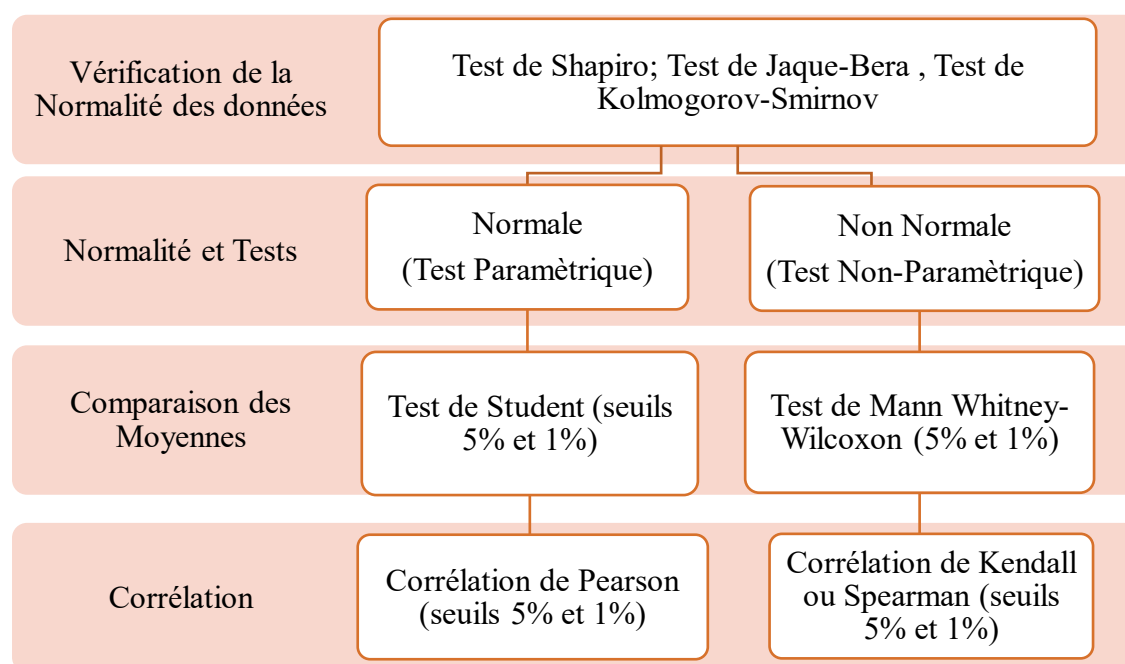
Types d'occupation du sol	Stocks de Carbone (t C./ha)	Sources
Savane arborée	32,42±5,4 t.C/ha	MEPN, 2016.
Savane arbustive	19,44±2,7 t.C/ha	
Steppe arbustive	8,29±1,0 t.C/ha	
Foret claire	40,45±5,0 t.C/ha	
Steppes d'arbustes et prairies (Région pastorale sablonneuse du nord)	14,73 t.C/ha	N'Goran <i>et al.</i> , 2022.
Savanes arbustives souvent relativement denses (Région pastorale ferrugineuse)	15,23 t.C/ha	
Savanes arborées et savanes boisées (Région de transition orientale)	29,37 t.C/ha	
Steppes herbacées (Ferlo)	2,0 t.C/ha	El Berling <i>et al.</i> , 2003.
Cultures annuelles (arachide + mil)	8,9 t.C/ha	Loum <i>et al.</i> , 2014. Ndour <i>et al.</i> , 2020.
Plantation d'arbres (Balanites aegyptiaca, Acacia raddiana)	1,73 t.C/ha	Ndiaye <i>et al.</i> , 2021.
Arbustes, prairies et zones à végétation clairsemée	19,18± 2,3 t.C/ha	Retiere, 2015.
Terres cultivées	17,18± 2,2 t.C/ha	
Zones humides	59,14± 5,0 t.C/ha	

II.3.6. Comparaison de la dynamique des séries temporelles avant et après reboisement

Pour évaluer l'impact du reboisement, nous nous proposons d'étudier l'évolution de nos paramètres (du climat, de végétation, stock de carbone) sur la période récente 2000-2020 qui sera subdivisée en deux : 2000-2008 (avant le reboisement) et 2009-2020 (après reboisement). Dans un premier temps, les évolutions spatiales et temporelles des indices de végétation, temporelles des données du climat ont été comparées à l'aide des tests de comparaisons de la moyenne de Student et de Mann whitney-Wilcoxon (Hollander, 1999 ; De Winter, 2010 ; Gibbons, 2011) aux seuils de significativités (α) de 5% et 1%. Le choix de ces tests a été déterminé par l'application de tests de normalité de Shapiro (Shapiro, 1965), Jarque-Bera (Jarque, 1987), de Kolmogorov-Smirnov et de D'Agostino (Razali, 2011 ; Öner, 2017 ; Tomšik,

2019) (Tableau II.11). A ces tests de normalité sont associés un risque α , qui est la probabilité de rejeter l'hypothèse de normalité (l'hypothèse nulle implique que les données suivent une distribution normale) alors qu'elle est vraie. Lorsque la probabilité associée au test de normalité est inférieure au risque α , les données s'écartent significativement de la normalité ($p\text{-value} < \alpha$) (Rakotomalala, 2008). En effet, un test est dit statistiquement significatif lorsque le risque de se tromper (p ou $p\text{-valeur}$) est inférieur à un niveau de signification α ($p \leq \alpha$). Plus la valeur de p est petite (généralement inférieur à 5%), plus la probabilité de faire une erreur en rejetant l'hypothèse nulle est faible. Ensuite, l'évaluation de l'évolution des relations entre la végétation et paramètres climatiques s'est fait par les calculs des corrélations spatiales et temporelles avec des niveaux de confiances de 95% et 99%. Le choix de la méthode de calcul du coefficient de corrélation s'est fait suivant la démarche indiquée dans le tableau II.11 ci-dessous.

Tableau II.11: Démarche de choix de tests de comparaisons des moyennes et de méthodes de calcul de coefficients de Corrélation



II.3.7. Présentation et évaluation des résultats des simulations RegCM-BATSE et RegCM-CLM4.5

II.3.7.1. Hypothèses initiales, paramétrage et limites de la modélisation

Dans le cadre de cette thèse, la mise en place des simulations numériques avec le modèle régional RegCM4.7 repose sur un ensemble d'hypothèses initiales, d'options de paramétrage, de limites identifiées et de conditions aux limites explicites. Les hypothèses de départ considèrent notamment l'homogénéité spatiale du couvert végétal reboisé, supposé uniforme en termes d'espèces, de densité et de structure, ainsi que la stabilité relative des pratiques agricoles et d'aménagement du territoire au cours de la période étudiée. Le climat de référence est défini sur la période 2000–2008, considérée représentative des conditions pré-reboisement, et sert de base stationnaire pour évaluer les changements ultérieurs. Par ailleurs, l'analyse repose sur l'hypothèse d'un lien direct entre reboisement et climat, où les modifications observées (précipitations, humidité du sol, température, flux énergétiques) sont principalement attribuées à l'évolution du couvert végétal, en supposant des réponses linéaires ou quasi-linéaires de certains paramètres tels que l'albédo ou l'évapotranspiration.

Le paramétrage du modèle mobilise un ensemble de variables d'entrée issues de différentes sources : données météorologiques ERA-INTERIM, humidité du sol (NOAA CPC ou ESA-CCI), températures de surface de la mer (SST OISST), chimie atmosphérique (MZCLM), topographie (GMTED ou GTOPO DEM), indices de végétation et LAI (NOAA), ainsi que des données d'occupation du sol GLCC, adaptées pour représenter la dynamique de reboisement de la Grande Muraille Verte (voir Tableau II.12). Les simulations sont réalisées à une résolution horizontale de 10 km×10 km, avec 18 couches verticales définies en coordonnées sigma jusqu'à 18 km d'altitude, un pas de temps de 6 heures et une période simulée allant de 2000 à 2020. Une étape de calibration a été effectuée sur la période pré-reboisement (2000–2008), afin d'ajuster les coefficients de sensibilité reliant la végétation aux paramètres climatiques, suivie d'une validation des résultats par comparaison avec les observations CHIRPS (précipitations) et GLEAM (évapotranspiration).

Néanmoins, plusieurs limites doivent être soulignées. Celles-ci concernent d'abord les incertitudes liées aux données satellitaires (erreurs de calibration des capteurs, effets atmosphériques résiduels), mais aussi la variabilité interannuelle du climat régional, susceptible d'être influencée par des phénomènes globaux comme l'ENSO ou les oscillations atlantiques, et pouvant masquer l'effet direct du reboisement. L'absence de mesures in situ détaillées pour certains flux (par exemple, flux de chaleur latente et sensible) limite également la robustesse

des validations locales. Enfin, la période relativement courte considérée (une à deux décennies) peut ne pas suffire pour capturer pleinement les tendances climatiques à long terme.

Les conditions aux limites appliquées concernent, d'une part, les forçages climatiques, fixés selon les réanalyses ERA-INTERIM pour la période pré-reboisement, incluant les champs initiaux de température, humidité, vent et rayonnement. D'autre part, des conditions écologiques et hydrologiques spécifiques ont été intégrées, telles que la composition des plantations, la densité et le taux de survie des plants, ainsi que les niveaux initiaux d'humidité des sols et la disponibilité en eau souterraine. Enfin, les simulations tiennent compte de forçages externes exceptionnels, tels que les sécheresses sévères ou les années à forte influence ENSO, afin de mieux encadrer l'interprétation des résultats.

Tableau II.12: Paramétrage du modèle RegCM4.7 sur le domaine de simulation

Paramètres du Modèle	Descriptions
Dynamique du Modèle	Non-Hydrostatique (Giorgi et al., 2023)
Schéma de transfert radiatif	CCSM (Kiehl et al., 1996)
Schéma explicite d'humidité (Microphysique)	SUBEX (Pal et al., 2000)
Schéma de convection	Emanuel (Emanuel 1991 ; Koné et al., 2018)
Schémas de surface	<ul style="list-style-type: none"> Community Land Model (CLM4.5; Brunke et al., 2016) and Biosphere Atmosphere Transfer Scheme (BATS; Yang et al., 1996, Giorgi et al., 2003)
Schéma de flux océanique	Zeng's scheme (Zeng et al., 1998)
Couplage océanique	RegCM-ES (Sitz et al., 2017)
Domaine de la simulation	20°W-10°W et 10°N-20°N
Grille horizontale	10km × 10km
Couche verticale (haut, coordonnées sigma)	18 Km
Point central du domaine	15,50°W et 14°N
Période de simulation	2000-2020

II.3.7.2. Description des expériences réalisées

Le domaine de simulation de notre étude s'étend de 20°W à 10°W et 10°N à 20°N, et avec une grille horizontale de 10km×10km (Figure II.8 et Tableau II.12). Il est suffisamment grand pour minimiser les effets de bord du modèle. Le Sénégal (12,1° et 16,7° de latitude nord et 11,3° et 17,5° de longitude ouest) et en particulier la région soudano-sahélienne sont nos différents domaines d'étude. Le modèle RegCM4.7 est simulé avec les deux (2) schémas de surfaces BATSE et CLM4.5. Les deux simulations réalisées sur la période 2000-2020 sont identiques excepté le couplage du modèle avec les schémas de surface.

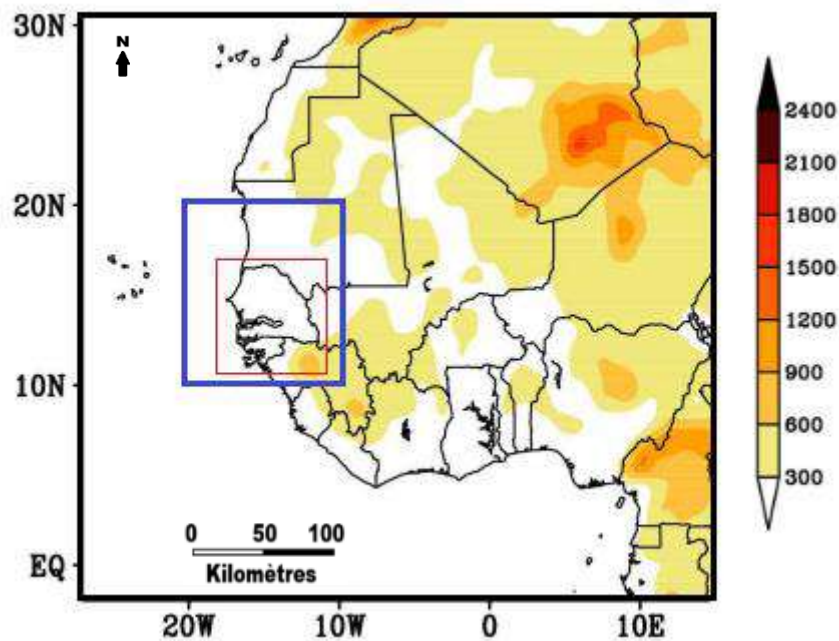


Figure II.8: Topographie de l'Afrique de l'Ouest et présentation du domaine simulé (en Bleu) et le Sénégal (encadré rouge)

Pour évaluer l'impact du reboisement de la GMV sur le climat du Sénégal (chapitre IV), nous avons adopté le protocole expérimental suivant (une première période non reboisée et une seconde période avec reboisement) :

- i) Les simulations de la première période non reboisée seront modélisées avec l'occupation du sol standard du modèle de la base GLCC (Global Land Cover Characterization) où la trace de la GMV est recouverte d'herbes courtes et longues (Savane herbeuse, steppe et prairie, classes 2 et 7 ; Figure II.9.a, Tableau II.13) (par exemple pour la période allant du 1^{er} janvier 2000 au 31 décembre 2008, la GMV est occupée par des classes d'herbe courte, savane, steppe) ;

- ii) Ensuite, avec l'option RESTART du modèle RegCM4.7 qui permet de subdiviser une simulation en plusieurs étapes, nous avons changé l'occupation du sol standard de GLCC (herbes courte et longue) de la trace de la GMV-Sénégal par une Forêt Mixte (arbre + arbuste + herbe, classe 18) d'une largeur de 50 km pour représenter le reboisement de la GMV (Figure II.9.b, la date de début de la nouvelle occupation du sol « Classe 18 » sera successivement positionné en 2009, 2012, 2016 et 2020, dates qui correspondent au début de période où l'activité de végétation, l'occupation du sol et la séquestration de carbone deviennent significatives) ;
- iii) Début de la seconde période au 31 décembre 2020, les simulations sont réalisées avec prise en compte du reboisement de GMV (présence de forêt mixte sur la trace de GMV, par exemple du 1^{er} janvier 2009 au 31 décembre 2020).

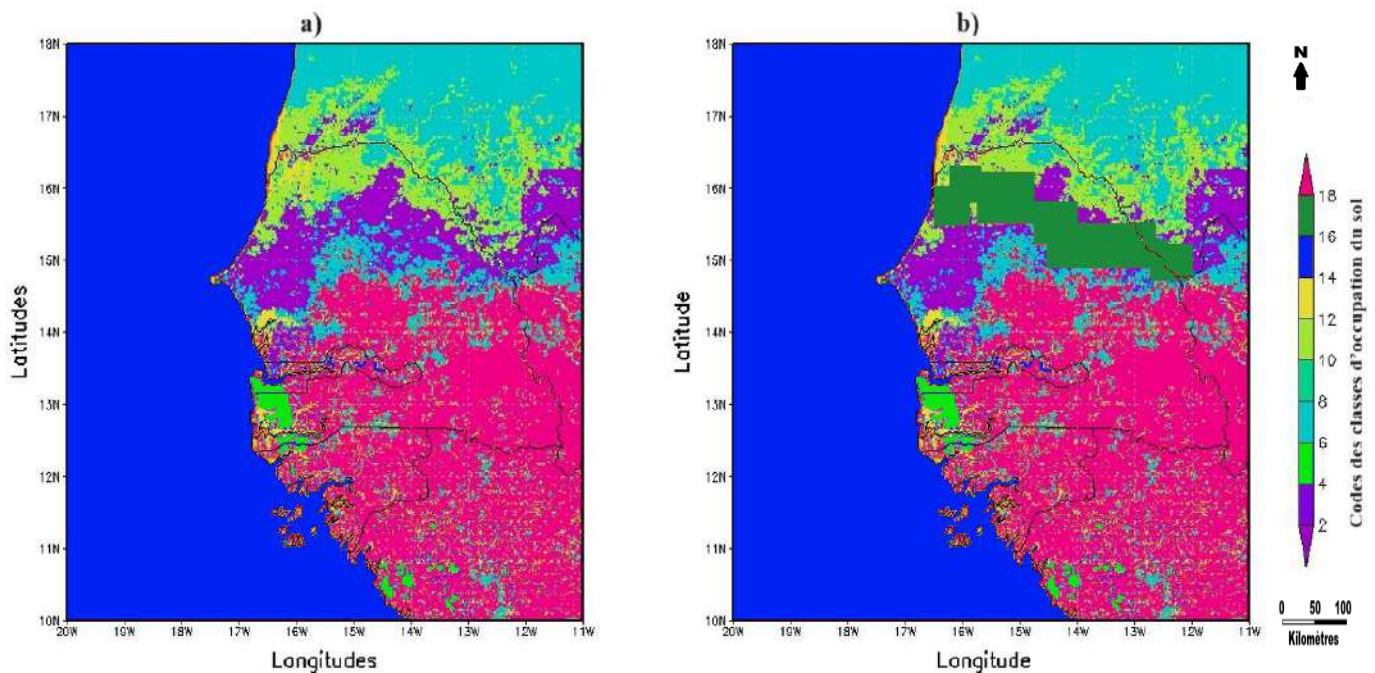


Figure II.9: Codes des classes d'occupation du sol du domaine simulé a) non reboisé (couverture du sol standard de GLCC) et b) période avec reboisement (zone reboisée GMV présence de forêt mixte)

Tableau II.13: Types de couverture du sol utilisés

Codes	Classes	Codes	Classes	Codes	Classes	Codes	Classes
1	Culture/agriculture mixte	6	Arbre à feuilles larges à feuilles persistantes	11	Semi-désert	16	Arbuste à feuilles persistantes
2	Savane / Herbe courte	7	Savanes Grandes herbes	12	Glacier	17	Arbuste à feuilles caduques
3	Arbre à feuilles persistantes	8	Désert	13	Tourbière ou marais	18	Forêt mixte
4	Arbre résineux à feuilles caduques	9	Toundra	14	Eaux intérieures	19	Forêts/ Champs Mosaïque
5	Arbre à feuilles larges à feuilles caduques	10	Cultures irriguée	15	Océan	20	Mélange d'eau et de terre

II.3.7.3. Indices de précipitations - Analyse fréquentielle des jours pluvieux

Dans cette étude, l'impact de la GMV sur le climat du Sénégal s'est évalué principalement sur la pluviométrie. Et suivant les recommandations de l'OMM (Peterson, 2001), nous avons étudié les impacts du reboisement sur la qualité des précipitations annuelles et les fréquences des jours pluvieux. Nous avons sélectionné quatre (4) indices pluviométriques qui sont définis dans le tableau II.14. Il s'agit du total pluviométrique annuel (PRCPTOT), du nombre de jours pluvieux (R1mm), nombre de jours de pluies intenses (R10mm) et nombre de jours de pluies très intenses (R20mm). L'analyse consiste à étudier l'évolution de ces indices de 2000 à 2020 sur l'ensemble du Sénégal et les quatre (4) sites de la GMV retenus dans notre étude.

Tableau II.14: Différents indices de précipitations et leurs définitions

Indices	Définitions	Unités
Nombre de jours pluvieux (R1mm)	Nombre de jours présentant un cumul pluviométrique journalier > 1mm/j	jours
Nombre de jours de pluies intenses (R10mm)	Nombre de jours pluvieux présentant un cumul pluviométrique journalier >10mm/j	jours
Nombre de jours de pluies très intenses (R20mm)	Nombre de jours pluvieux présentant un cumul pluviométrique journalier >20mm/j	jours
Total pluviométrique annuel (PRCPTOT)	Cumul pluviométrique annuel	mm/an

II.3.7.4. Évaluation des sorties de modèle - Outils statistiques (Biais, R², RMSE et RRMSE)

Afin d'évaluer les résultats de nos différentes simulations et d'établir d'éventuelles relations entre différentes variables environnementales observées, nous avons utilisé principalement trois outils statistiques :

- i) le biais qui désigne la tendance systématique d'un modèle à sous-estimer ou surestimer la vraie valeur d'un paramètre (Biais, Equation II.16) ;
- ii) l'erreur quadratique moyenne relative (RRMSE, Equation II.18) qui donne la RMSE relatif à la moyenne des valeurs observées et permet de pondérer l'erreur globale. Notons que l'erreur quadratique moyenne (RMSE, Equation II.17) permet de déterminer la précision du modèle et donne une mesure synthétique de l'erreur globale en une seule valeur. La RRMSE est utilisée pour comparer la performance de différents modèles sur des ensembles de données avec des plages de valeurs différentes ;
- iii) le coefficient de détermination (R², Equation II.19) variant entre 0 et 1 qui mesure le pouvoir explicatif et l'adéquation du modèle par rapport aux données observées.

La qualité de prédiction du modèle augmente lorsque la RMSE et la RRMSE se rapprochent de 0 et lorsque le R² se rapproche de 1. L'utilisation de ces deux critères permet d'apprécier objectivement et statistiquement la performance d'un modèle à reproduire les observations.

$$Biais = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i) \quad (\text{II.16})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2} \quad (\text{II.17})$$

$$RRMSE = \frac{RMSE}{\bar{Y}_l} \times 100 \quad (\text{II.18})$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (\text{II.19})$$

Où, $\hat{Y}_i$ est la valeur de la variable prédite, Y_i la variable observée et n le nombre d'observations.

II.3.8. Traçabilité des résultats - Flux de traitement des données

Le schéma de la figure II.10 ci-dessous illustre la chaîne complète de traitement adoptée dans ce travail. Il retrace l'ensemble des étapes méthodologiques, depuis l'**acquisition des données** issues de différentes sources (données satellitaires multi-capteurs, observations climatiques, bases de données institutionnelles et produits dérivés) jusqu'à la **production et l'interprétation finale des résultats**. Cette chaîne intègre successivement le prétraitement et l'harmonisation des données (rééchantillonnage spatial et temporel, corrections radiométriques et atmosphériques, contrôle de qualité, normalisation des séries), les analyses spectrales (notamment par ondelettes continues et discrètes), les analyses statistiques classiques et avancées (corrélations, tendances, tests de significativité, modèles de régression) ainsi que les approches spatiales (cartographie des changements, détection des transitions, analyses multi-échelles).

À cette première étape exploratoire s'ajoutent les simulations numériques réalisées à l'aide de modèles climatiques régionaux (RegCM4.7), configurés avec deux schémas de surface contrastés (BATS et CLM4.5), permettant de tester la sensibilité du climat régional aux dynamiques de reboisement. Ce flux méthodologique vise non seulement à garantir la traçabilité et la reproductibilité des résultats, mais également à assurer la robustesse scientifique des analyses par la confrontation des données observées et simulées. L'intégration cohérente de données multi-sources et multi-échelles, combinée à une approche comparative des outils de modélisation, constitue ainsi un cadre rigoureux permettant de répondre aux objectifs et questions scientifiques formulés dans le cadre de cette thèse.

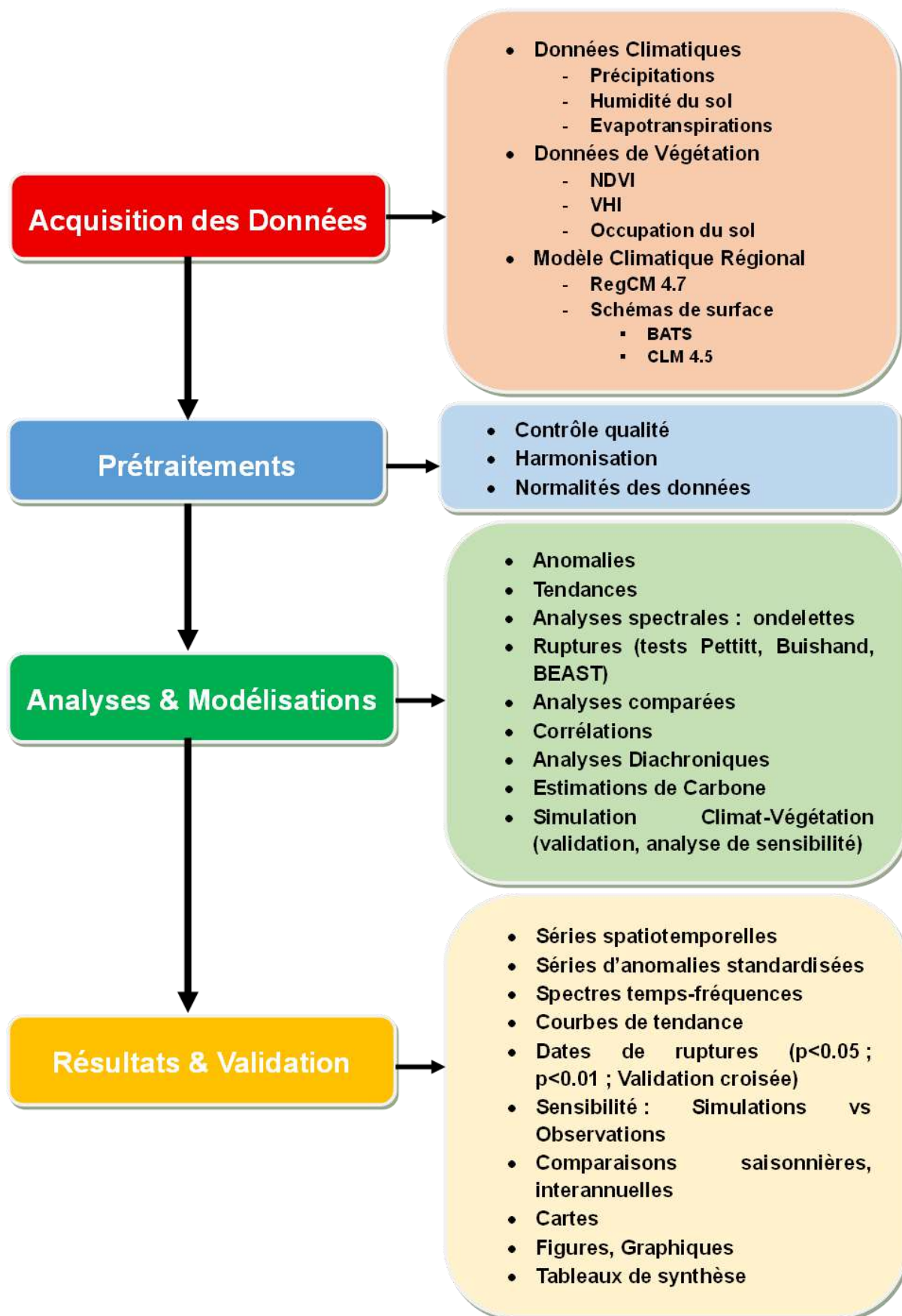


Figure II.10: Schéma synthétique de la chaîne de traitement des données (de l'acquisition des données aux résultats)

Conclusion partielle

La télédétection satellitaire est la technique la plus adaptée pour l'étude et la représentation des interactions biophysiques entre climat et végétation. De nombreuses études ont montré la capacité de l'information satellitaire à suivre l'évolution du climat, en particulier pour la zone africaine. Par ailleurs, ces jeux de données, de plus en plus nombreuses et accessibles, couvrent plusieurs décennies, ce qui permet des analyses spatio-temporelles d'une grande précision. En plus, le développement de modèles régionaux à échelles fines permet d'étudier les différentes interactions entre les différents composants du climat.

L'étude menée au nord du Sénégal et principalement sur les sites de la GMV repose sur la sélection de bases de données satellitaires de couverture végétale (NOAA NDVI-AVHRR, NOAA VHP-STAR), d'occupation du sol (Land Cover ESA), de paramètres climatiques (précipitations CHIRPS, humidité du sol NOAA-CPC, évapotranspirations GLEAM).

Les méthodes d'analyse retenues sont basées sur des approches statistiques de calculs d'anomalies, de recherche de ruptures, de l'analyse spectrale et d'utilisation de modèle de simulation numérique pour atteindre nos différents objectifs. La séquestration du carbone sera étudiée à partir des données d'occupation du sol. Les résultats obtenus par les différentes méthodes décrites feront l'objet d'analyses critiques dans les chapitres suivants.

Partie 2 :

RESULTATS ET DISCUSSION

Chapitre III

Dynamique du couvert végétal, de l'occupation du sol et des paramètres climatiques dans la zone de la Grande Muraille Verte du Sénégal

Introduction

Le chapitre 3 de la présente étude vise à analyser les évolutions du couvert végétal avant et après le reboisement à travers les indices NDVI et VHI, de l'occupation du sol, ainsi que la dynamique de la pluviométrie et de l'humidité du sol sur les différents sites de la GMV entre 1981 à 2020. De ce fait, il s'agira de mettre en évidence, à travers une analyse multi-dates, les différents modes de variations et les tendances qui caractérisent les évolutions de la végétation, de la pluviométrie, de l'humidité du sol et de l'évapotranspiration réelle et potentielle dans les localités étudiées. Ce travail d'analyse permet de décrire l'activité végétative et des paramètres climatiques à différentes périodes. Afin d'atteindre ces différents objectifs, nous avons recherché les différentes périodes d'évolution par l'analyse des anomalies à l'échelle interannuelle. Ensuite, l'application des ondelettes continues a permis de faire ressortir les différents modes d'évolution des séries temporelles. L'usage des tests de Pettitt et Bayésien sur les séries chronologiques a permis de détecter les ruptures et statistiques des différentes périodes et dynamiques dans ces données. Dans ce chapitre, nous allons exposer et analyser les principaux résultats en termes de dynamique du couvert végétal dans chacune des régions traversées par la GMV Sénégalaise. Ces résultats éclairent sur l'état de la couverture végétale des quatre dernières décennies (1981–2020).

III.1. Dynamique du couvert végétal et des paramètres climatiques dans la zone de la Grande Muraille Verte du Sénégal de 1981 à 2020

III.1.1. Analyse de l'évolution du couvert végétal au sein de la GMV du Sénégal de 1982 à 2020

Dans cette partie, il est présenté l'étude de la variabilité spatiale et temporelle du couvert végétal à travers l'indice de végétation NDVI-AVHRR sur la période 1982–2020. Par la suite, la variabilité saisonnière et la recherche de modes de variabilité des indices de végétation sur les sites de la GMV du Sénégal seront analysées de 1982 à 2020. Quant à l'étude de la variabilité des précipitations, elle sera analysée de 1981 à 2020.

III.1.1.1. Dynamique spatiale de l'état de santé de la végétation au Sénégal

Pour analyser l'évolution spatiale du couvert végétal des sites de la grande muraille verte et du Sénégal, il a été calculé et cartographié cette distribution à l'échelle annuelle et mensuelle sur la période 1991–2020. Ces normales climatologiques annuelle et mensuelles du couvert végétal du Sénégal, sont présentées sur les figures III.1 et III.2.

La figure III.1 montre la répartition spatiale de l'état de santé de la végétation sur la période 1991–2020. Elle montre une distribution zonale de la végétation avec les valeurs de NDVI qui diminuent du sud vers le nord :

- L'indice NDVI de la partie sud du pays (12°N et 13°N) est compris entre 0,4 et 0,5 ; on y trouve généralement une végétation du type de forêt claire et de forêt dense.
- La partie comprise entre les latitudes 13°N et 15°N, présente des valeurs d'indices NDVI allant de 0,3 à 0,4 qui représentent des savanes ;
- Et la zone nord du pays, entre 15°N et 17°N, a une plage d'indice de 0,2 à 0,3 avec un couvert végétal prédominé par des steppes.

La saison végétative sur le Sénégal s'étend du mois de juillet à novembre. Sur la région nord du pays, cette saison débute en août et se termine généralement en octobre. Les fortes valeurs de l'activité végétative sont enregistrées dans le sud du pays ($\text{NDVI} \geq 0,6$, Figure III.2).

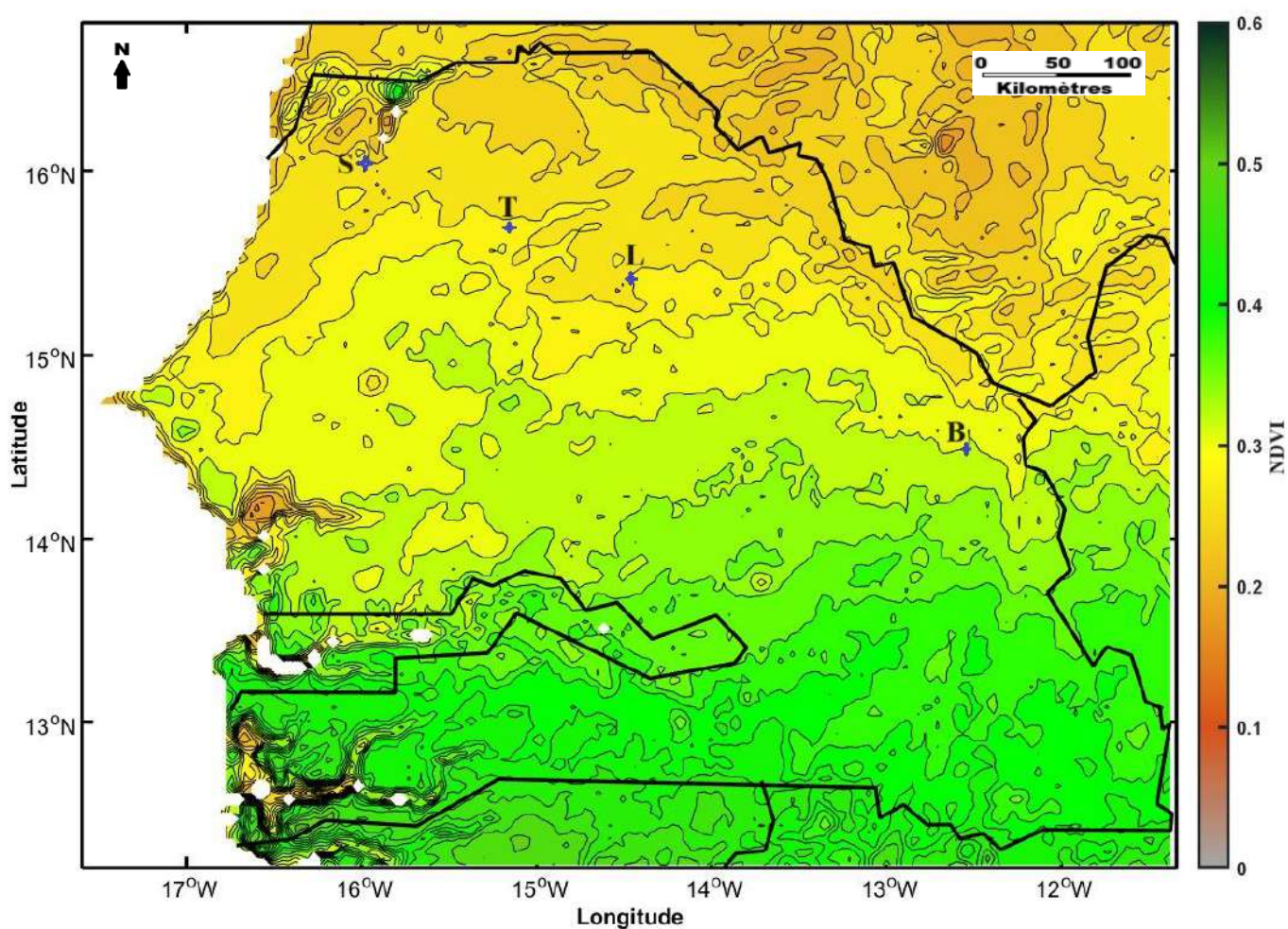


Figure III.1: Climatologie spatiale annuelle de l'indice de végétation (NDVI) au Sénégal (S : SYER ; T : TESSEKERE ; L : LOUGHERE ; B : BALLOU) sur la période 1991-2020.

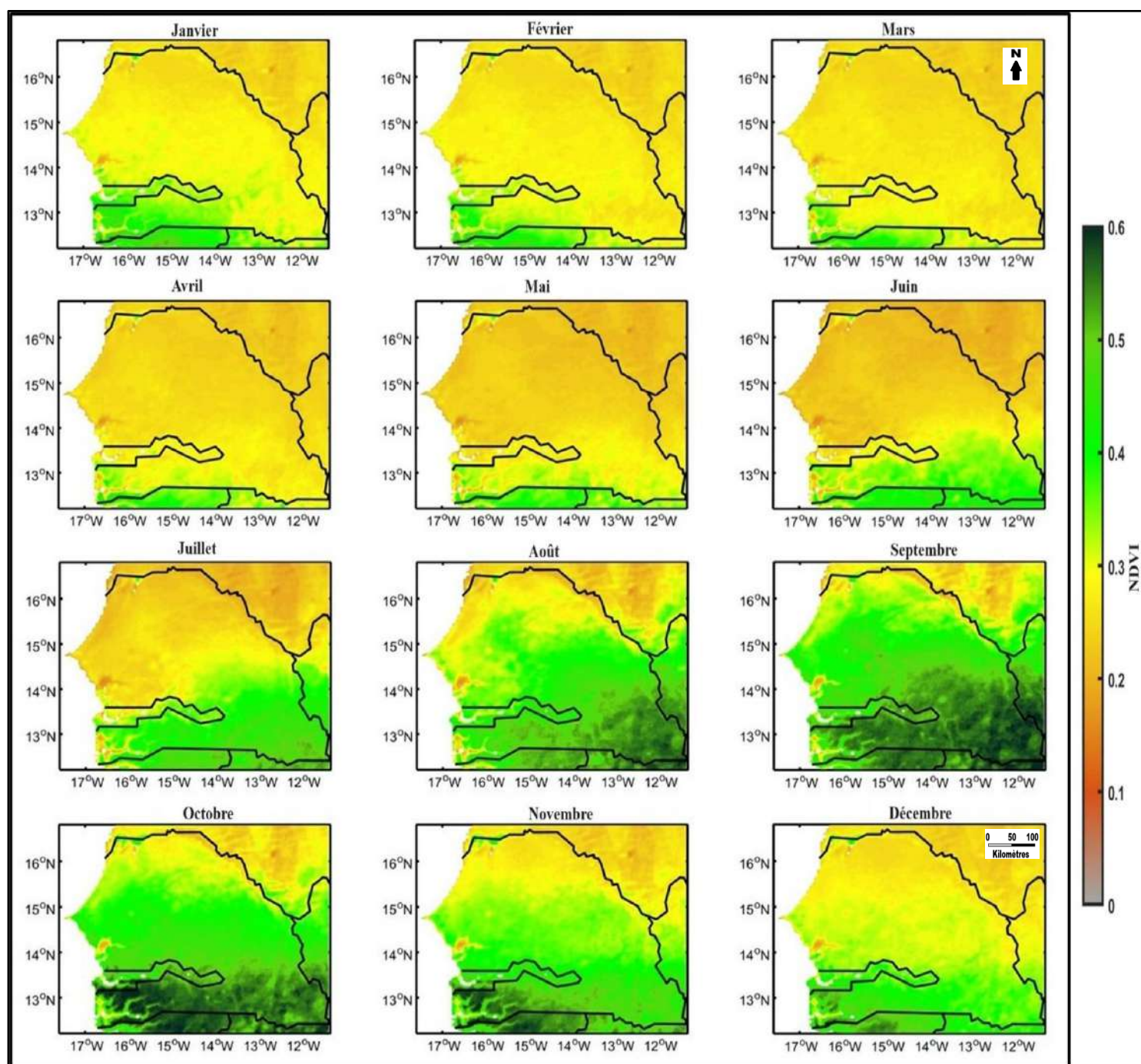


Figure III.2: Climatologie spatiale mensuelle de l'indice de végétation (NDVI) au Sénégal sur la période 1991-2020

III.1.1.2. Evolution temporelle du couvert végétal au sein de la GMV de 1982 à 2020

L'analyse des anomalies de l'indice de végétation (Figure III.3) entre 1982 et 2020 révèle des variations temporelles significatives dans la dynamique du couvert végétal. Ces variations se caractérisent par des alternances entre des périodes de reverdissement et régression de la couverture végétale, observées dans toutes les régions étudiées. Les courbes de tendance à long terme (LOESS-100%) permettent de distinguer deux principales périodes pour certaines localités (comme Téssékéré et Loughéré-Thioly) et trois périodes pour d'autres (comme Syer et Ballou). Ces différences reflètent des écarts dans la durée, le début et la fin des périodes de dynamique végétale, mettant en évidence des comportements distincts selon les zones géographiques.

Les tendances à long terme des localités de Syer (Louga) et Ballou (Tambacounda) révèlent des états de stress du couvert végétal de 1982 à 1997 pour Syer et de 1982 à 1999 pour Ballou. Ensuite, un reverdissement de 1998 à 2017 à Syer et 2000 à 2019 à Ballou. Et entre 2019 et 2020, une seconde période de stress du couvert est observée.

Pour les localités de Téssékéré et Loughéré-Thioly, l'observation des tendances à long terme montre un changement de régime à partir de 1999 (transition de dégradation à reverdissement).

En somme, toutes ces localités présentent une dynamique de stress végétale allant de 1982 à la fin de la décennie 1990 (1998 ; 1999).

L'analyse des tendances à court terme (LOESS-25%) confirme ces changements de régime, tout en mettant en lumière des fluctuations pluriannuelles plus marquées (Figure III.3). Cette seconde tendance détecte également les différents changements de régimes. Par exemple, pour Syer, la transition de stress à régénération du couvert végétal est observée en 1999 (1997 avec LOESS-100%), et la transition inverse (reverdissement à régression) en 2016 (2018 avec LOESS-100%). Pour Ballou, la transition régression-reverdissement a lieu en 2002 (2000 avec LOESS-100%), et la transition reverdissement à régression en 2018 (2019 avec LOESS-100%). Enfin, pour Téssékéré et Loughéré-Thioly, le passage à une dynamique d'accroissement de l'indice de végétation est observé en 2004/2005 (1999 avec LOESS-100%).

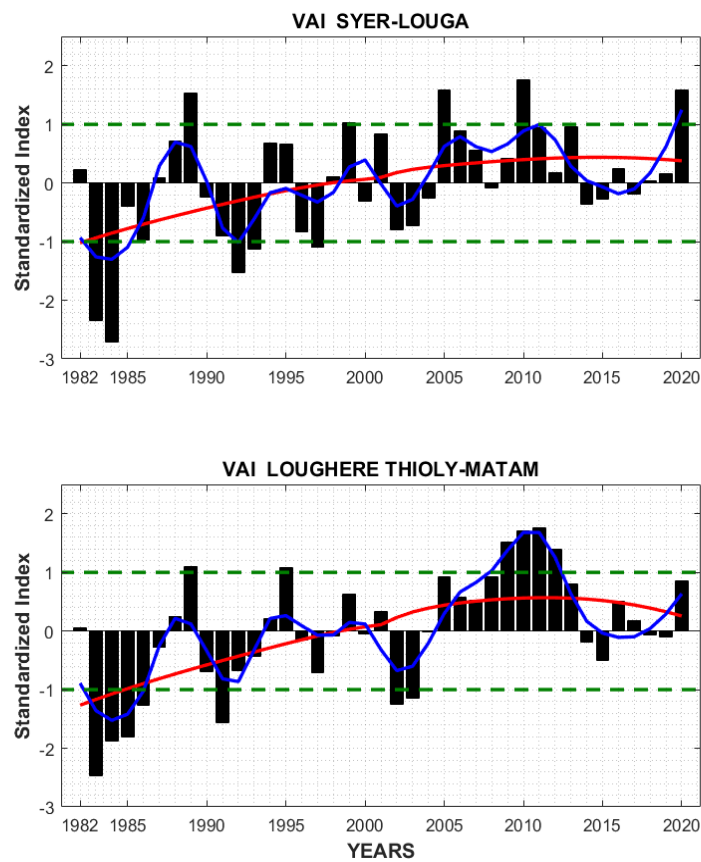
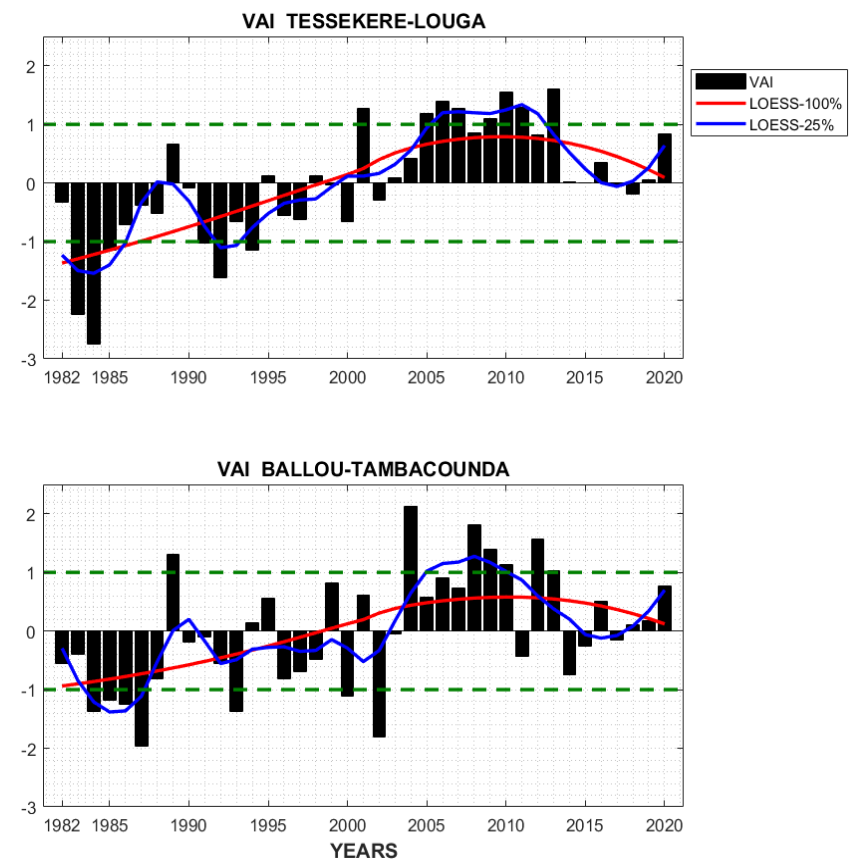
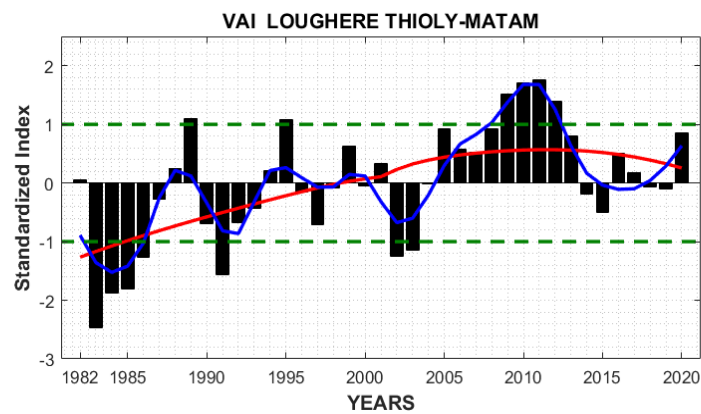
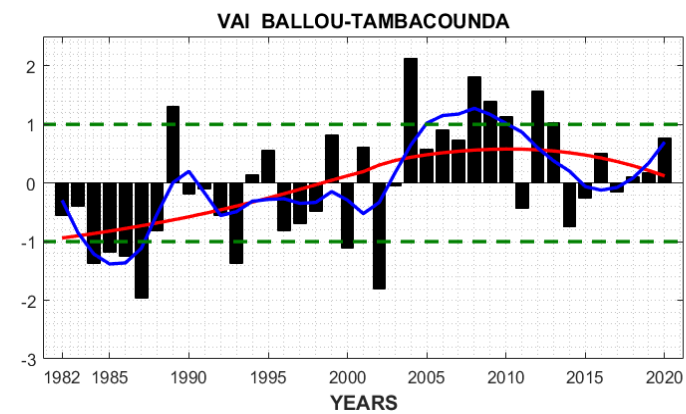


Figure III.3 : Evolution des anomalies de l'indice de végétation (VAI) entre 1982-2020 sur les sites de GMV Sénégal (Syer, Tessékéré, Loughéré-Thioly et Ballou).

III.1.1.3. Statistique de l'évolution de la végétation sur les différentes périodes d'évolution

a) Evolution mensuelle (intra-annuelle) de l'indice NDVI de 1982 à 2020.

Le tableau III.1 et la figure III.4 qui suivent, nous résume l'évolution de l'indice NDVI au pas de temps mensuel de 1982 à 2020 dans notre zone d'étude. Sur toutes les localités d'étude, l'activité végétative montre une tendance à la hausse depuis 1982. Par contre, pour la localité de Syer le LOESS-100% montre une augmentation de l'activité de la végétation de 1982 à 2013. Ensuite, une légère baisse de l'évolution de l'indice sera constatée de 2014 à 2020. La courbe de variabilité saisonnière (LOESS-25%) suit quasiment la courbe de tendance LOESS-100% sur l'ensemble des localités. Les plus faibles valeurs d'indices mensuelles sont enregistrées aux périodes suivantes : 1982–1985, 1991–1993, 2002 et 2018 (Syer) ; 1983–1985, 1991–1993 et 2014 (Téssékéré) ; Pour Loughéré-Thioly entre 1993–1985, 1991–1992 et 2002–2004 ; enfin, en 1984, 1993 pour Ballou. Les valeurs maximales mensuelles des séries de NDVI sont respectivement enregistrées au cours de la période 2009–2013 (Tableau III.1).

Tableau III.1: Statistiques mensuelles du comportement de la végétation (NDVI) des localités de Syer, Téssékéré, Loughéré-Thioly et Ballou de la GMV-Sénégal.

Dynamique de la végétation (NDVI)		Syer (Louga)	Téssékéré (Louga)	Loughéré Thioly (Matam)	Ballou (Tambacounda)
Négative	Période	1982–1997	1982–1999	1982–1999	1982–1999
	Maxi,	0,33	0,40	0,38	0,43
	Moy,	0,21	0,23	0,23	0,26
	Mini,	0,15	0,16	0,15	0,17
Positive	Période	1998–2018	2000–2020	2000–2020	2000–2019
	Maxi,	0,40	0,45	0,42	0,43
	Moy,	0,24	0,25	0,26	0,27
	Mini,	0,18	0,18	0,17	0,18
Négative	Période	2019–2020			2020
	Maxi,	0,30			0,37
	Moy,	0,23			0,26
	Mini,	0,18			0,20

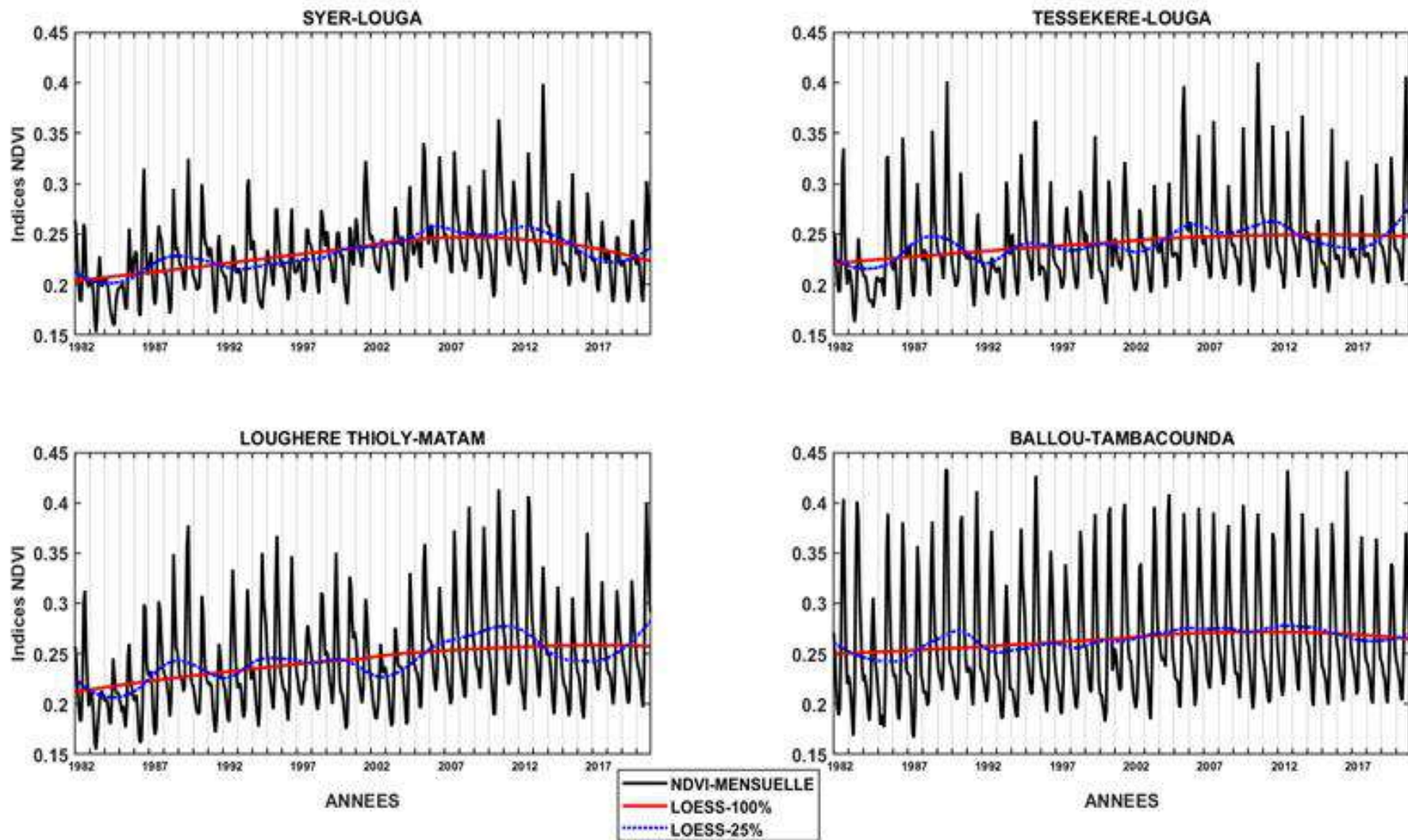


Figure III.4: Evolution mensuelle de l'activité de végétation (NDVI) dans les localités de Syer (Louga), Tessékéré (Louga), Loughéré-Thioly (Matam) et Ballou (Tambacounda) Sénégal de 1982 à 2020.

b) Evolution interannuelle de l'indice de végétation NDVI de 1982–2020

Le tableau III.2 et la figure III.5 présentent respectivement les statistiques moyennes et l'évolution interannuelle de l'indice NDVI au cours des quatre dernières décennies pour les sites de Syer, Tèssékéré, Loughéré-Thioly et Ballou, situés dans les localités de la Grande Muraille Verte (GMV) au Sénégal. En analysant ces données de NDVI, on constate que le NDVI moyen annuel oscille entre les valeurs 0,18 et 0,3. Les plus faibles valeurs sont observées au cours de la période 1982–1989, et les plus fortes valeurs d'indice entre 2005–2015.

Tableau III.2 : Statistiques annuelles du comportement de la végétation (NDVI) des localités de Syer, Tèssékéré, Loughéré-Thioly et Ballou de GMV-Sénégal.

Dynamique de la végétation (NDVI)		Syer (Louga)	Tèssékéré (Louga)	Loughéré Thioly (Matam)	Ballou (Tambacounda)
Négative	Période	1982–1997	1982–1999	1982–1999	1982–1999
	Maxi.	0,23	0,29	0,26	0,28
	Moy.	0,22	0,26	0,23	0,26
	Mini.	0,18	0,22	0,19	0,23
Positive	Période	1998–2018	2000–2020	2000–2020	2000–2019
	Maxi.	0,27	0,30	0,28	0,29
	Moy.	0,24	0,27	0,25	0,27
	Mini.	0,22	0,25	0,22	0,25
Négative	Période	2019–2020			2020
	Maxi.	0,23			0,26
	Moy.	0,226			0,26
	Mini.	0,22			0,26

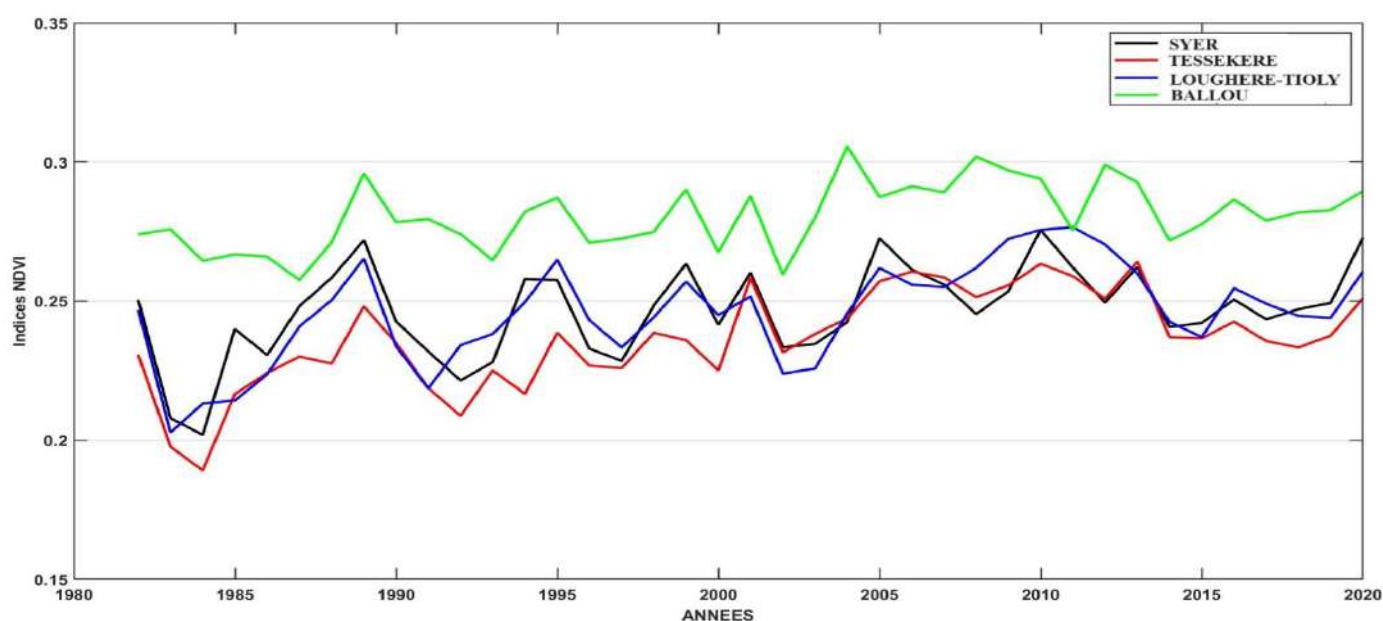


Figure III.5: Evolution annuelle de l'indice NDVI dans les localités de Syer, Tessékéré, Loughéré-Thioly et Ballou de 1982 à 2020

III.1.2. Analyse de l'évolution de la pluviométrie au sein de la GMV du Sénégal

III.1.2.1. Tendances et variabilité des précipitations de 1981 à 2020

La représentation graphique de l'évolution d'anomalies de précipitations standardisées de 1981 à 2020 indique une alternance d'années sèches et humides dans toutes nos régions d'étude.

La figure III.6 présente l'évolution du SPI dans les localités de Syer, Tébékéré, Lougéré-Thioly et Ballou ; on note que deux (2) à trois (3) phases d'évolutions y sont observées à l'aide de la tendance LOESS-100%. Sur l'ensemble de ces localités, une première période sèche de 1981 à 1997/1998 est caractérisée par une sécheresse sévère d'une durée de 3 à 5 ans consécutifs (1981–1985 et 1990–1993) avec des anomalies de précipitations standardisées inférieures au seuil de -1,5 ($SPI \leq -1,5$). Une deuxième période est repérée à partir de 1998/1999. Cette seconde période connaît un regain pluviométrique (cumuls supérieurs à la normale). On observe au cours de celle-ci, des années consécutives très humides entre 2009–2012 présentant des indices de précipitations standardisées supérieurs au seuil de +1,5 ($SPI \geq 1,5$). Dans les communes de Syer, Tébékéré la période très humide se situe entre 2009–2011, et dans les communes de Lougéré-Thioly et Ballou entre 2009 à 2012. Ensuite, une baisse de la pluviométrie est observée après 2018 mais proche de la normale dans les localités de Syer, Tébékéré (2018–2020) et Lougéré-Thioly (2019–2020).

L'analyse du LOESS-25% (fluctuation interannuelle) dans les localités de Syer, Tébékéré et Lougéré-Thioly, permet d'observer une première sous-période humide de 3 ans (1987–1989) au cours de la période sèche de 1981–1998. Ce même constat est observé au cours de la période humide de 1999–2020 (2015–2018 sous-période sèche).

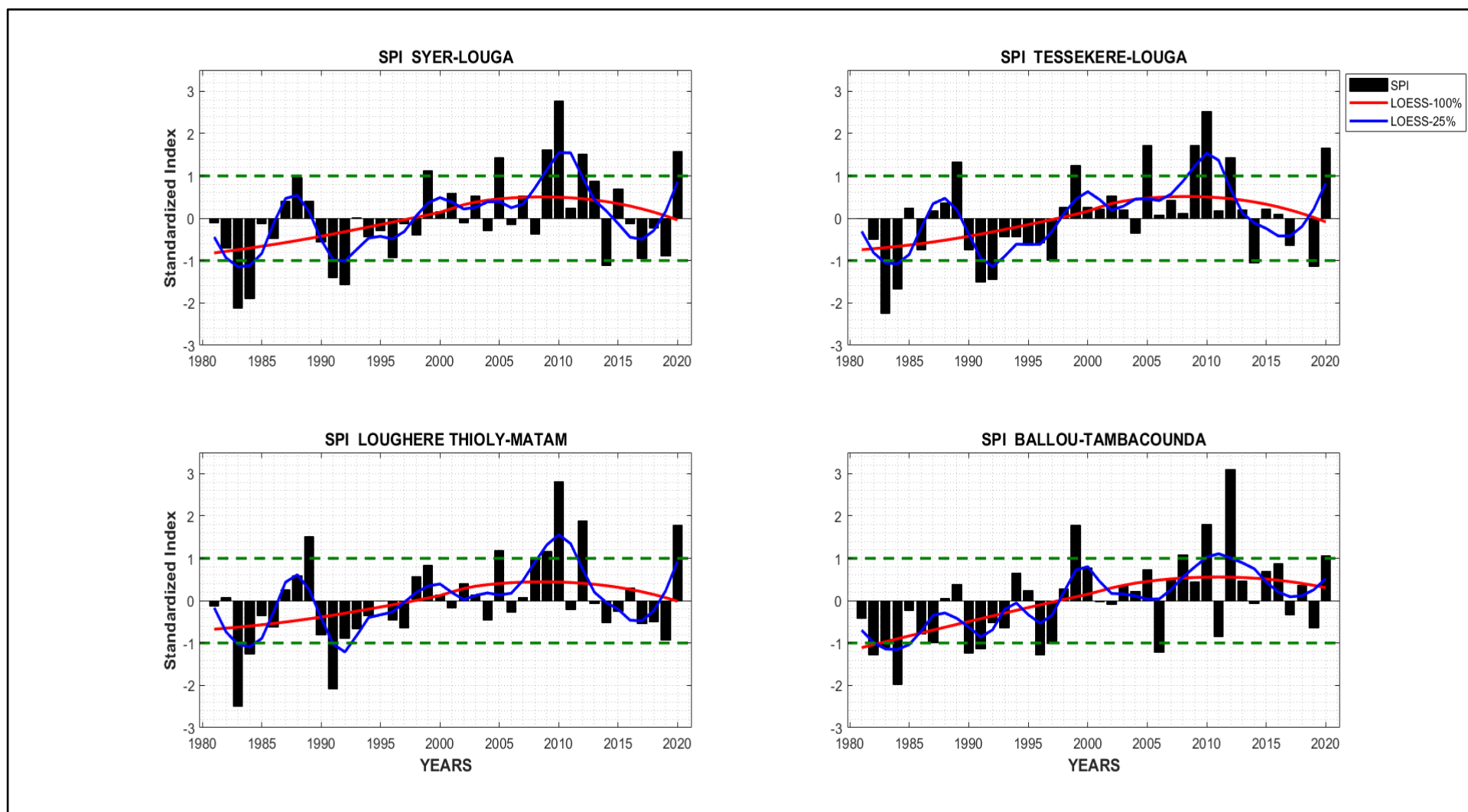


Figure III.6: Evolution des anomalies de précipitations dans les localités de Syer, Tessékéré, Loughéré Thioly et Ballou GMV-Sénégal de 1981 à 2020

III.1.2.2. Statistiques de l'évolution de la pluviométrie de 1981 à 2020

L'analyse des cumuls annuels des précipitations et des anomalies des différents sites sur la période 1981 à 2020 montre que les plus faibles valeurs de précipitations sont enregistrées entre 1982 et 1984 (Syer : 119mm en 1983 ; Téssékéré : 120mm en 1983 ; Loughéré-Thioly : 168mm en 1983 ; Ballou : 369mm en 1984;). Les cumuls annuels les plus importants sont enregistrés entre 2009–2012 (Syer : 456mm en 2010 ; Téssékéré : 487mm en 2010 ; Loughéré-Thioly : 578mm en 2010 ; Ballou : 804mm en 2012).

Les précipitations moyennes ont augmenté de 19 à 29 % selon les sites entre les périodes 1981–1997/98 et 1998–2020, avec des gains pluviométriques variant de 61 mm (Loughéré-Thioly) à 99 mm (Ballou).

Tableau III.3 : Valeurs caractéristiques de la pluviométrie des localités de Syer, Téssékéré (Louga), Loughéré-Thioly (Matam), Ballou (Tambacounda) de la GMV-Sénégal entre 1981-2020.

Dynamique de la pluviométrie (mm)		Syer (Louga)	Téssékéré (Louga)	Loughéré Thioly (Matam)	Ballou (Tambacounda)
Normale (1991-2020)		274,4	302,5	368,7	560,5
Sèche	Période	1981-1997	1981-1996	1981-1998	1981-1997
	Maxi.	330,1	395,0	477,3	594,5
	Moy.	228,0	250,1	327,0	481,9
	Ecart-type	57,7	68,3	72,6	60,1
	Mini.	118,7	119,7	167,5	369,5
Humide	Période	1998-2020	1997-2018	1999-2018	1998-2020
	Maxi.	456,0	487,4	577,6	804,0
	Moy.	291,7	321,9	387,1	580,9
	Ecart-type	66,6	67,7	68,8	79,5
	Mini.	188,1	211,4	318,5	434,4
Sèche	Période		2019-2020	2019-2020	
	Maxi.		420,6	497,1	
	Moy.		312,4	392,5	
	Ecart-type		153,0	148,0	
	Mini.		204,2	287,8	

III.1.2.3. Dynamique des pluies hors saison de 1981 à 2020

Dans le Sahel, les orages organisés dont le passage se manifeste par une accélération de la vitesse du vent, sont responsables de la plupart des pluies enregistrées avec plus de 60 % du total annuel enregistré selon Courel (1984), voire une proportion de 80 % du total des précipitations d'après Sagna (1988). Cette saison (JAS) correspond à la présence de la Mousson sur le Sahel. Pour mieux évaluer la contribution de la végétation sur les précipitations de nos sites d'étude, nous avons analysé la dynamique des pluies hors saison (octobre à juin) de 1981 à 2020. Ces pluies hors saison pourront mieux renseigner de l'influence de facteurs locaux autres que la Mousson, en particulier l'action de la végétation sur la pluviométrie.

La figure III.7 qui représente les diagrammes en moustache et tendances des pluies enregistrées en saison sèche sur les différentes périodes trouvées avec l'évolution des anomalies standardisées et les tendances, montre une augmentation des cumuls de pluie. Ces gains de pluie sont de l'ordre de 11 mm. Il est noté un gain de pluie hors saison à Syer de +10 mm, à Tèssékéré de +9 mm, à Loughéré de +8 mm et à Ballou de +17 mm.

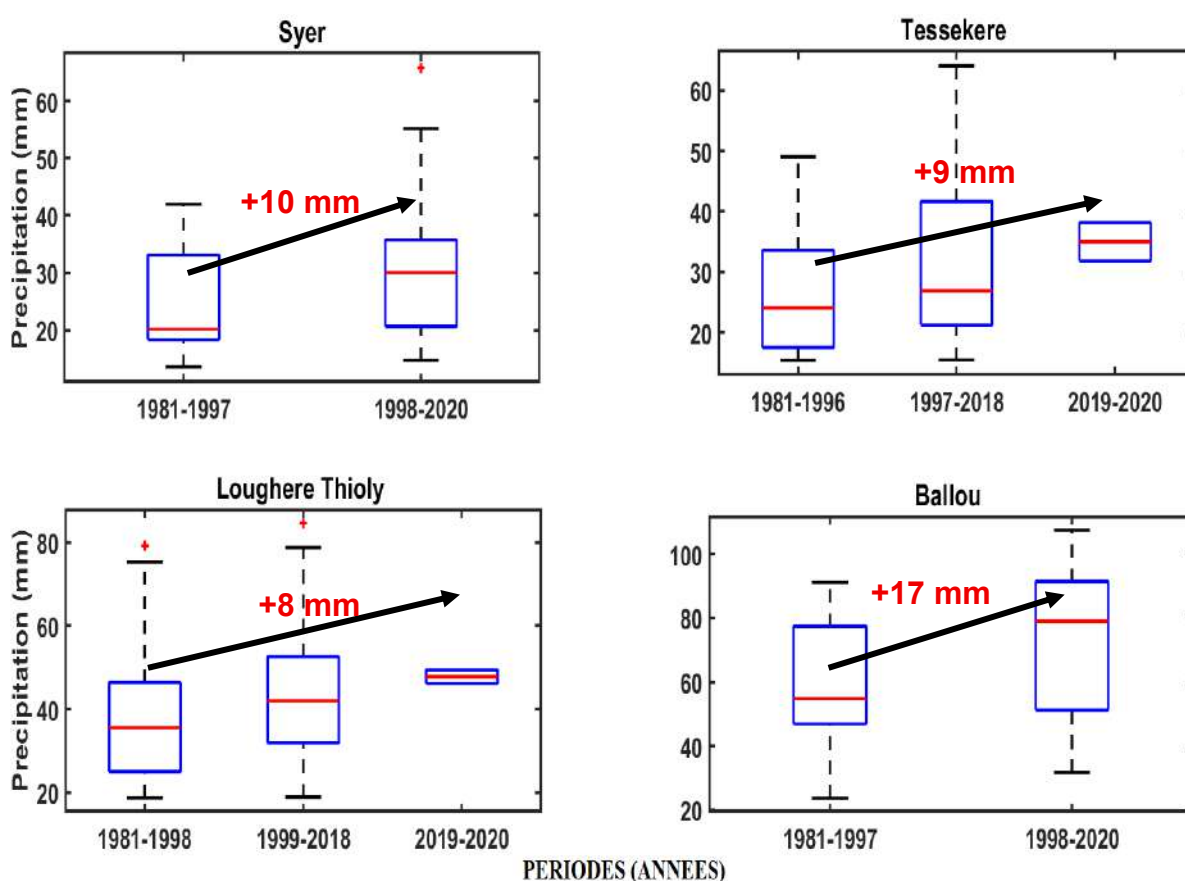


Figure III.7: Evolution des cumuls annuels des pluies hors saison et tendances de Syer, Tèssékéré (Loug), Loughéré-Thioly (Matam), Ballou (Tambacounda) de 1981 à 2020

Les figures III.8 et III.9 évaluent l'évolution des pluies hors saison pour chaque mois. Il en ressort une forte variabilité des pluies d'un mois à un autre. Les plus fortes valeurs sont recueillies aux mois d'octobre, mai et juin. Aussi, on remarque dans les communes de Syer, Téssékéré et Loughéré-Thioly, une hausse mensuelle des pluies hors saison pour les mois d'octobre, novembre et mars-avril-mai-juin. De décembre à février, nous avons une baisse des quantités de pluie (ces quantités sont faibles et inférieures à 5 mm). A Ballou, la hausse de la pluviométrie, de la période 1981-1997 à la période 1998-2020, se situe au cours des mois d'octobre et avril-mai-juin. Les mois de novembre, décembre, janvier, février, mars enregistrent par contre une baisse des pluies mensuelles.

[Gaye et al. \(2022\)](#) avaient montré que sur le Sénégal 76 % des précipitations des pluies de la saison DJFM (pluie de heug) n'atteignent 1 mm. Pour [Hamza et al. \(2016\)](#) et [Gaye et al. \(2022\)](#), l'importance des systèmes nuageux qui donnent naissance aux pluies hors saison dépendent de l'intensité de l'air extratropicale (tempéré, polaire) advecté et de la présence d'air tropical chaud et humide sur les régions du Sahel, et au Sénégal en particulier. Lorsque celle-ci est très forte, elle occasionne des précipitations importantes. En effet en saison sèche, l'air extratropical est advecté le long des thalwegs d'altitude jusque dans les régions du Sahel. Quand cet air froid entre en interaction avec de l'air local chaud et humide, il se forme des nuageux denses et instables dans les couches moyenne et supérieure qui donnent ainsi naissance à ces pluies.

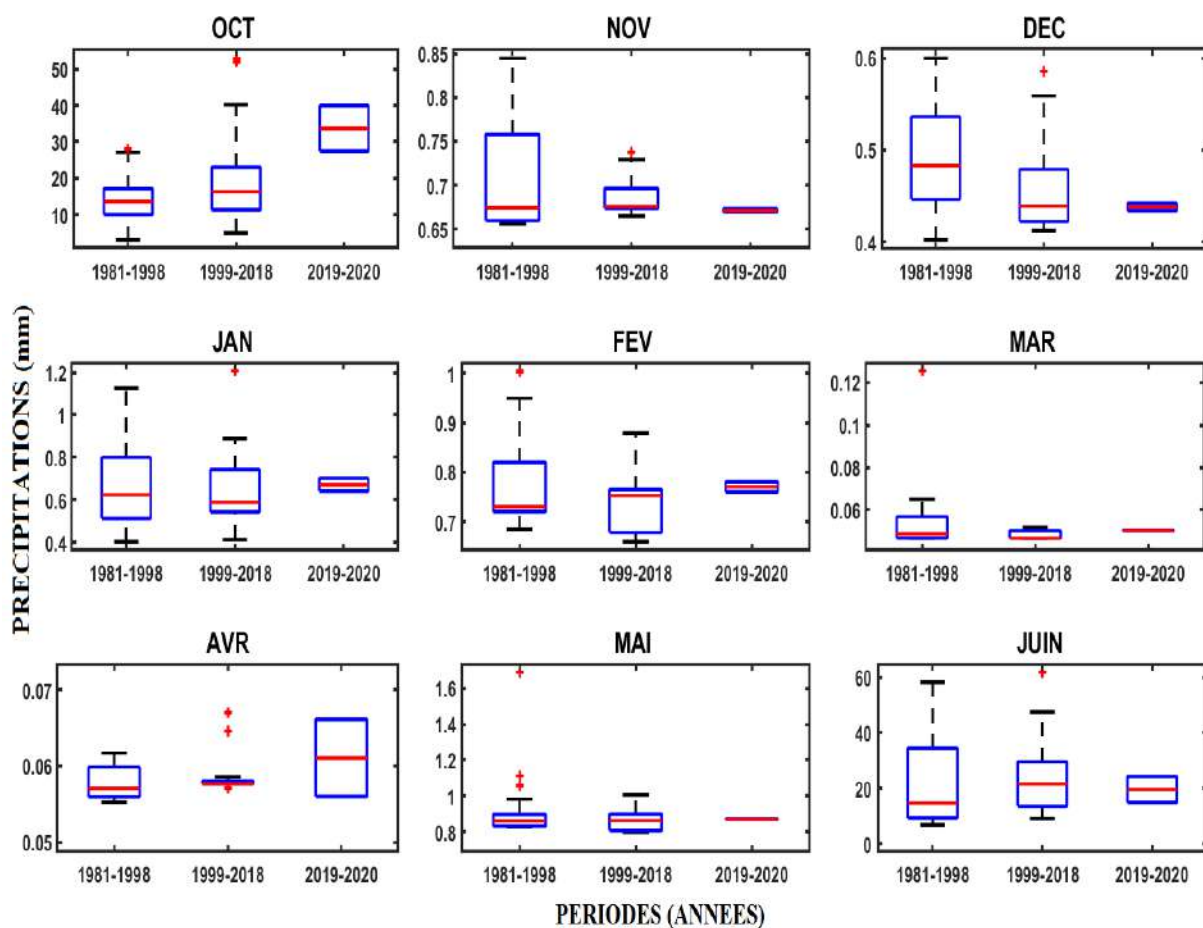


Figure III.8: Evolution mensuelle des pluies hors saison de Loughéré-Thioly (Matam) de 1981 à 2020.

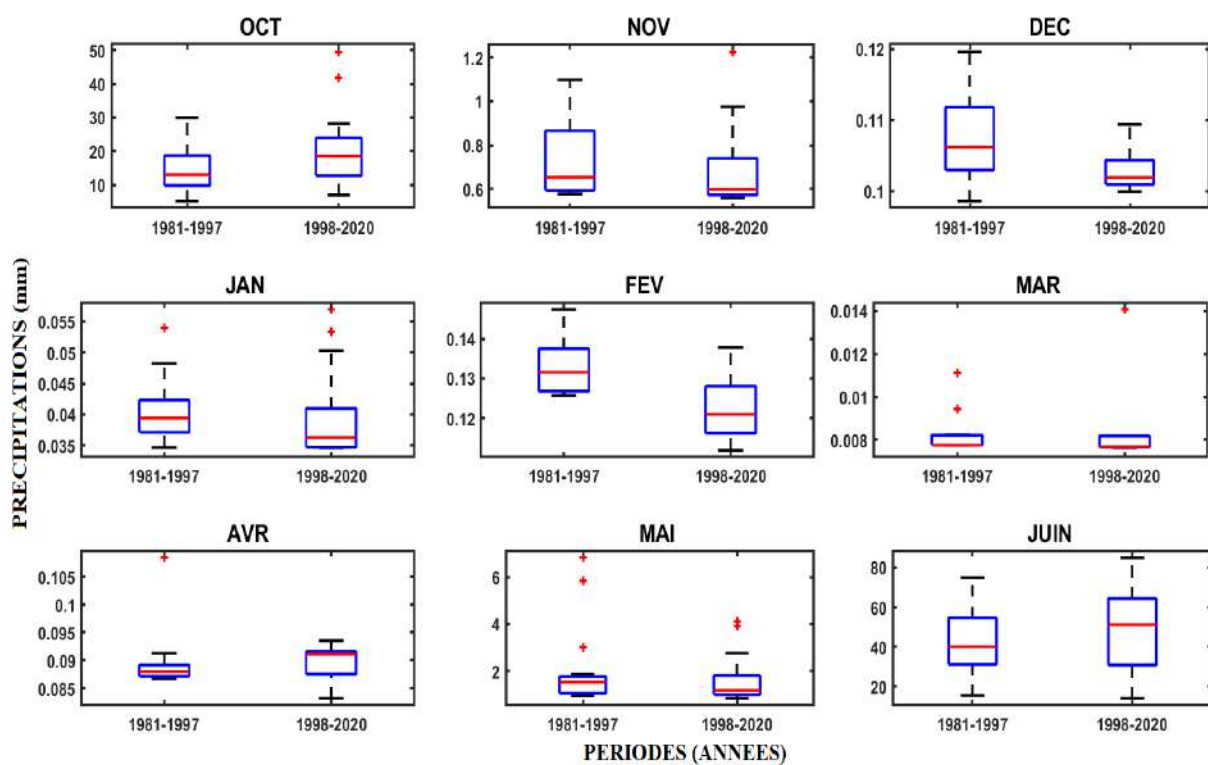


Figure III.9: Evolution mensuelle des pluies hors saison de Ballou (Tambacounda) de 1981 à 2020.

III.1.3. Analyse en ondelette et recherche de modes d'évolution du couvert végétal et de la pluviométrie au sein de la GMV du Sénégal

Dans ce paragraphe, l'étude vise à analyser la variabilité de la végétation au niveau des différentes régions d'étude et à comprendre les relations avec les fluctuations des paramètres climatiques (représentés dans cette étude par les précipitations). Afin de mieux comprendre l'évolution temporelle de la variabilité de la végétation dans les régions d'étude, nous utilisons la transformée en ondelettes continues afin de pouvoir distinguer les éventuelles périodicités, ruptures ou discontinuités temporelles susceptibles d'être analysées avec les séries de précipitations.

Les spectres en ondelettes sont réalisés sur des signaux bruts et des signaux débarrassés de leur tendance, et montrent la distribution de la puissance du signal au cours de la période d'étude. Pour décrire correctement ces fluctuations, il est donc nécessaire d'identifier des pics d'énergies (variances) aux différentes échelles de temps dans la transformée en ondelettes. Cette méthode constitue donc un outil particulièrement adapté à l'étude des variables non-stationnaires, comme les paramètres climatiques. Les analyses en ondelettes continues sont donc ici utilisées pour identifier les principaux modes de variabilité du couvert végétation, des précipitations au niveau des localités de la GMV et pour détecter d'éventuelles ruptures temporelles dans la structuration de ces variabilités.

III.1.3.1. Signaux mensuels des séries NDVI de janvier 1982 à décembre 2020

L'observation des spectres en ondelettes des séries mensuelles de NDVI met en évidence plusieurs échelles de variabilité pour les différentes localités (Figures III.10 à III.13). Une échelle saisonnière significative de 6 mois et 1 an. Les variabilités interannuelle (2–4 ans et 4–8 ans) et quasi-décennale (8–10 ans) sont non significatives au seuil de confiance de 95%.

La période sèche (1982 à début 2000) est caractérisée par plusieurs ruptures dans le mode de variabilité 6 mois. Ces ruptures ont en moyenne une périodicité de 5 ans. Et, les discontinuités qui ressortent dans les différents spectres sont repérées en 1983/1984, 1985/1986, 1991/1992, 1995 et 1997/1998. On observe aussi le mode saisonnier 1 an, qui apparaît avec des discontinuités et devient non significative entre 1982 et 2005.

La période humide est caractérisée par une forte variance de l'échelle du mode 1 an (cycle annuel). Ce renforcement de la variabilité annuelle est quasi-continue entre 2005–2020 pour les localités de Syer et Téssékéré, continue de 1986 à 2020 pour Loughéré-Thioly et absence de rupture dans ce mode dans la localité de Ballou de 1982 à 2020. Ce mode annuel présente un pic de variance entre 2008–2013 dans les localités de Syer, Téssékéré et Loughéré-Thioly. Le

mode saisonnier 6 mois de la période humide est moins interrompu et perdure plus dans le temps comparé à la période sèche.

III.1.3.2. Signaux mensuels des séries de précipitations de janvier 1981 à décembre 2020

L'hétérogénéité du contenu spectral des séries pluviométriques mensuelles de nos sites d'étude de la GMV fait apparaître trois bandes d'énergie. Une échelle saisonnière de 3–4 mois qui est localisée dans les localités de Syer et Téssékéré (Louga). Une échelle saisonnière de 6 mois et une échelle de 1 an (cycle annuel) sont repérées sur l'ensemble des transformées en ondelette continue des localités étudiées.

Les modes saisonniers 3–4 mois et 6 mois sont localisés au cours de quelques années de la période sèche et deviennent non-significatifs durant cette période sèche. Au cours de la période humide, ces modes deviennent permanents après l'année 2005. Le mode annuel 1 an des séries de précipitations, présente peu de discontinuité (1983, 1985, 1990/1991 et 1993) en période sèche lorsqu'il est détecté et devient continue avec absence de rupture après 1993 dans les localités de Syer, Téssékéré, Loughéré-Thioly. A Ballou, le mode annuel 1 an est bien marqué et ne présente pas de discontinuité sur toute la période d'étude 1981 à 2020.

L'exploitation de l'analyse spectrale par ondelette continue, sur les séries mensuelles de précipitations et d'indice de végétation NDVI, indique que le cycle annuel (mode 1 an) est le mode dominant dans les séries. Ce cycle traduit le contraste entre les saisons sèches (octobre à juin) et humides (JAS), et apparaît lié à l'évolution saisonnière de la mousson (migration saisonnière de la ZCIT en Afrique de l'Ouest). Par ailleurs, ce cycle annuel présente des fluctuations d'année en année. En période sèche des discontinuités apparaissent. La baisse de fréquence est particulièrement observée dans les communes de Syer, Téssékéré et Loughéré-Thioly. Les modes saisonniers s'affaiblissent (se renforcent) lors des années sèche (humides) (Dieppoï, 2011).

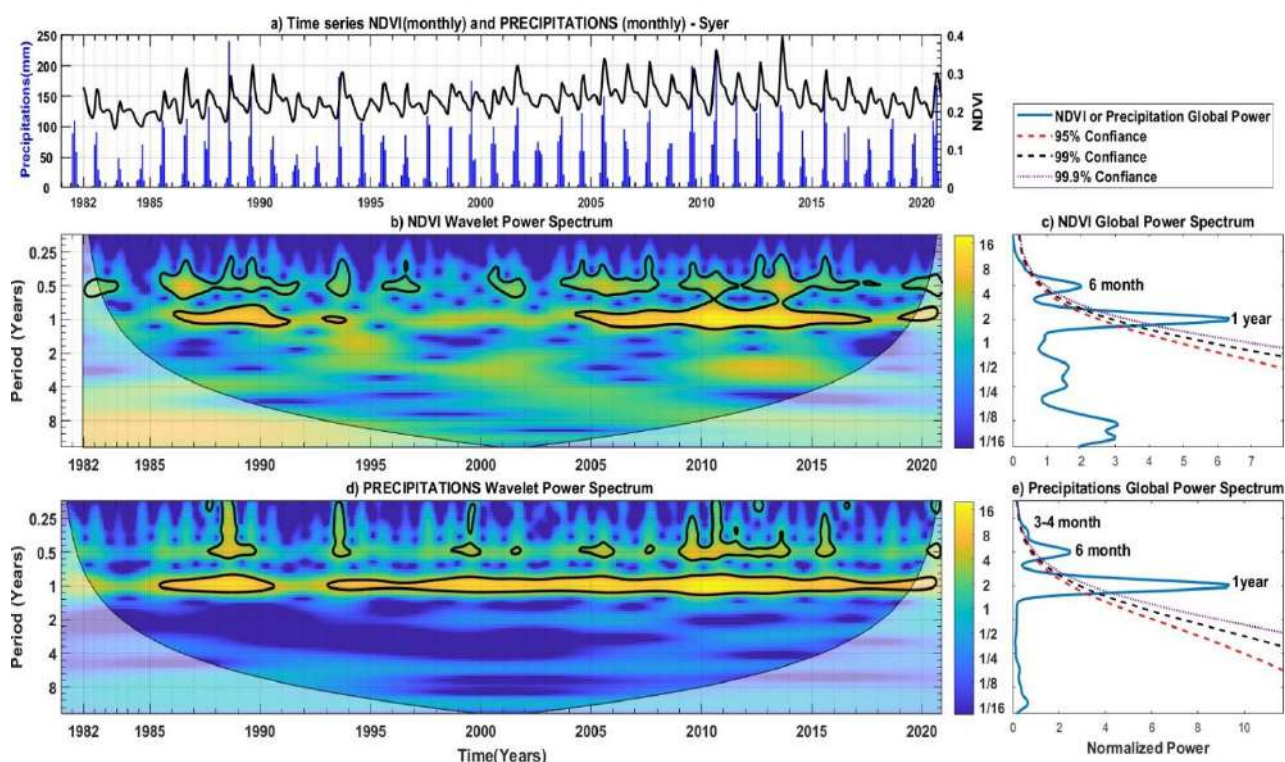


Figure III.10: Spectres de l'analyse en ondelettes continues et de puissances de l'indice NDVI et des précipitations de Syer (Louga), trait noir fin : cône d'influence ; traits noirs gras : limite de confiance 95%.

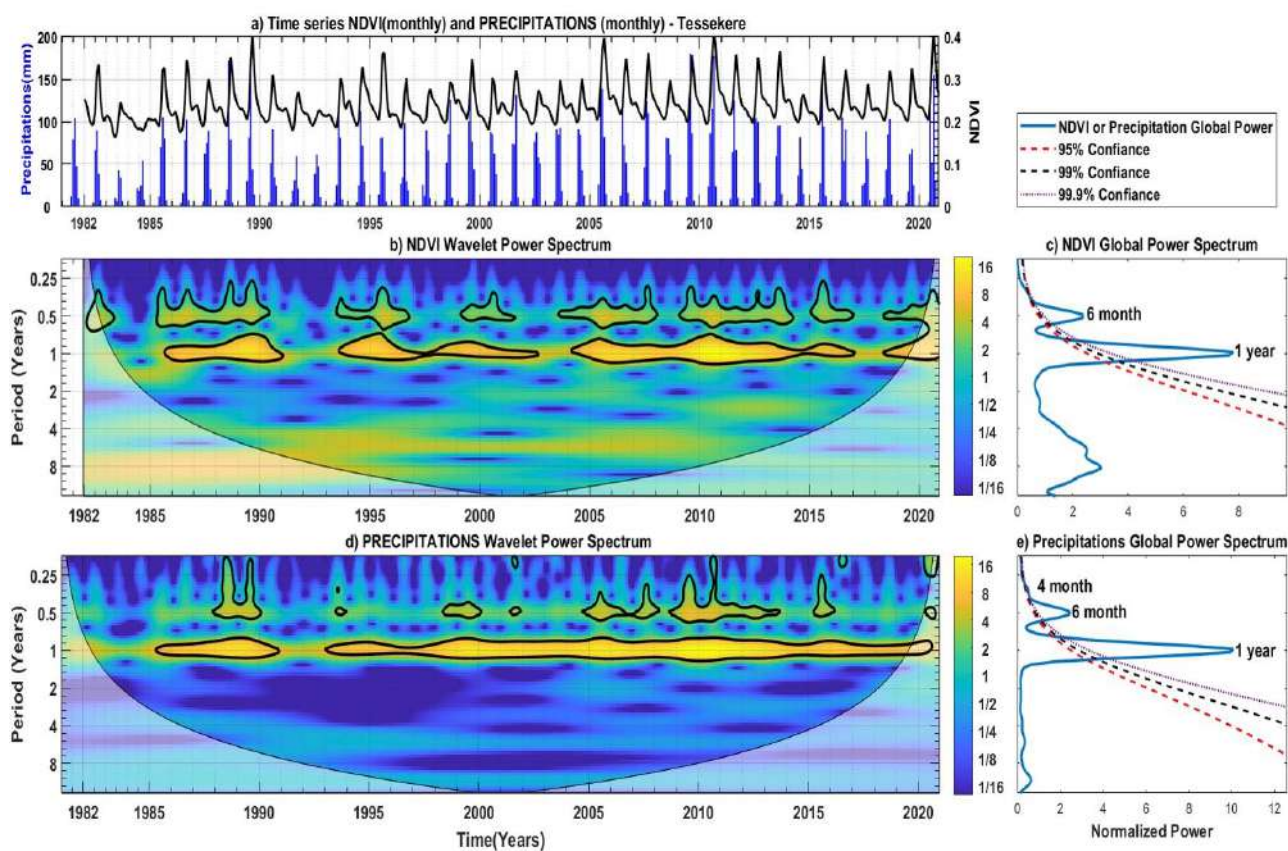


Figure III.11: Spectres de l'analyse en ondelettes continues et de puissances de l'indice NDVI et des précipitations de Tèssékéré (Louga), trait noir fin : cône d'influence ; traits noirs gras : limite de confiance 95%.

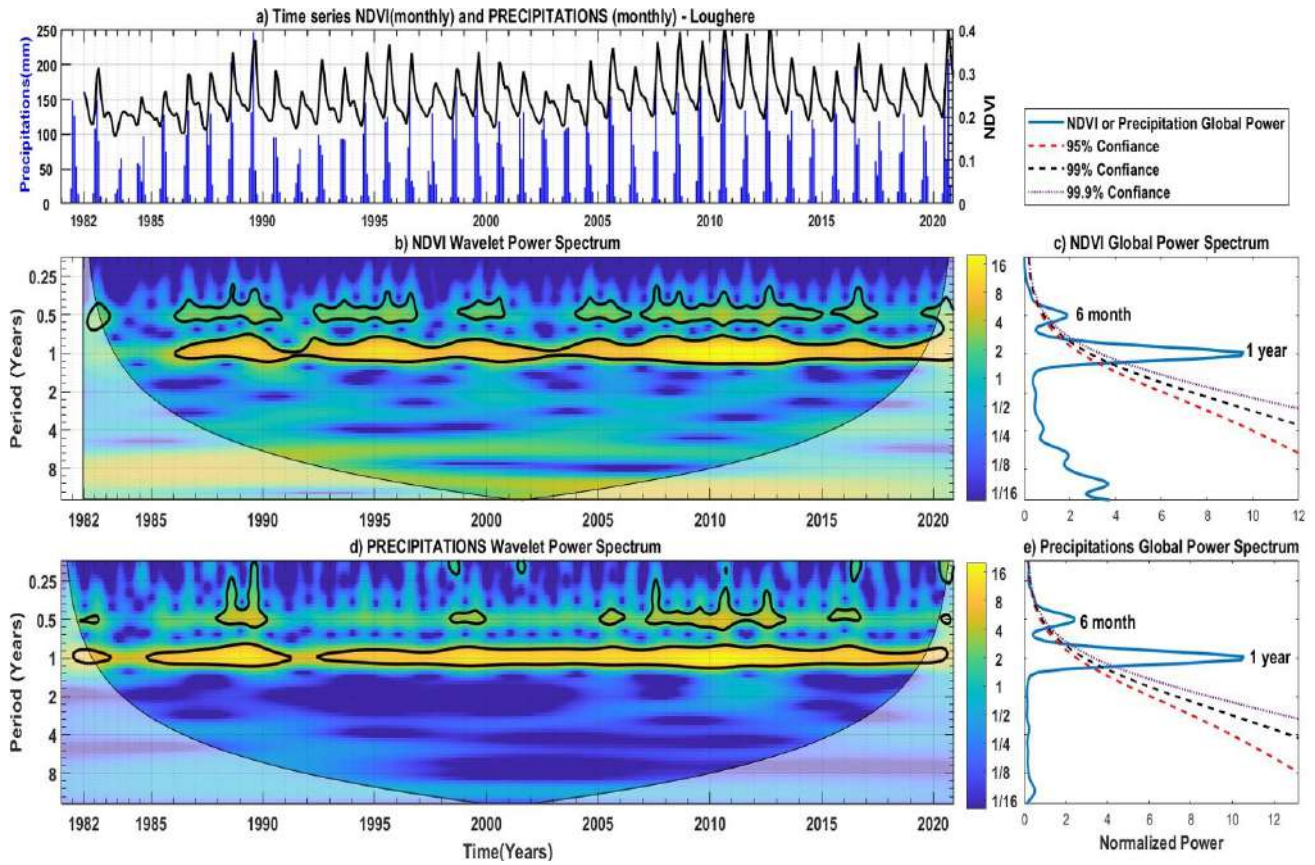


Figure III.12: Spectres de l'analyse en ondelettes continues et de puissances de l'indice NDVI et des précipitations de Loughéré-Thioly (Matam), trait noir fin : cône d'influence ; traits noirs gras : limite de confiance 95%.

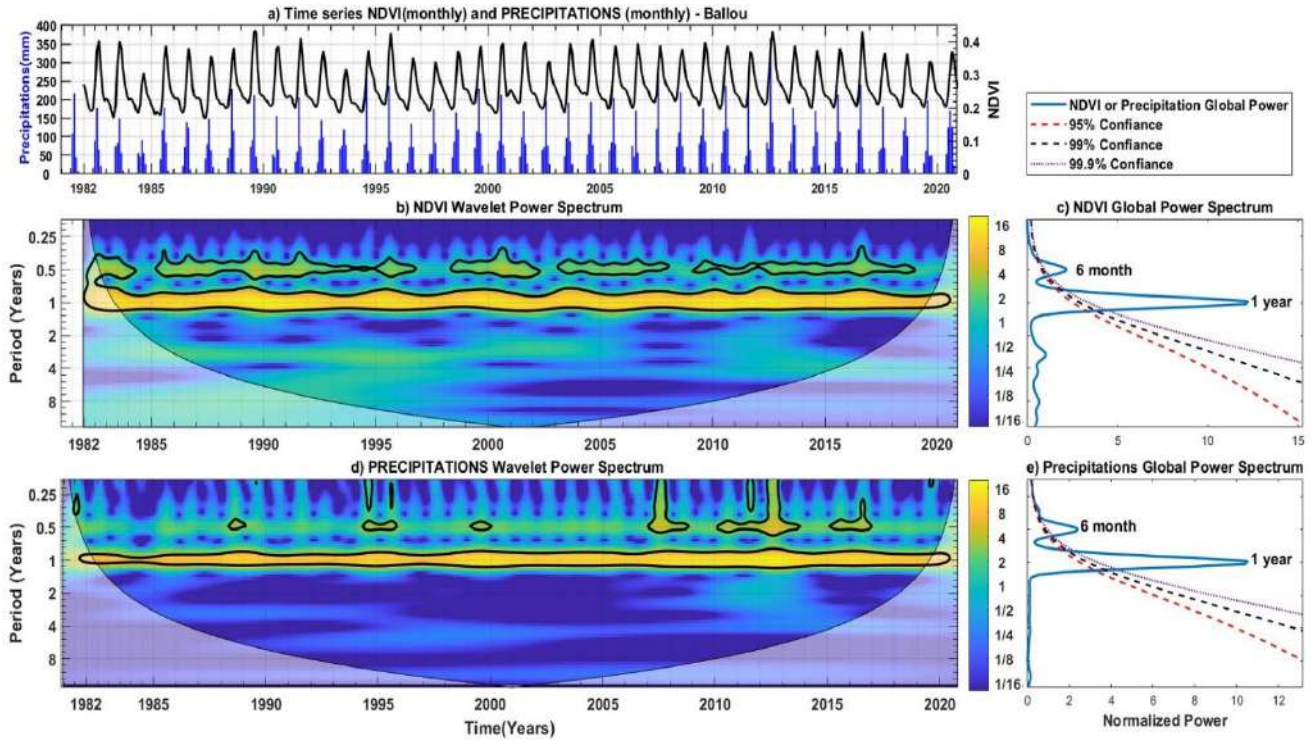


Figure III.13: Spectres de l'analyse en ondelettes continues et de puissances de l'indice NDVI et des précipitations de Ballou (Tambacounda), trait noir fin : cône d'influence ; traits noirs gras : limite de confiance 95%.

III.1.3.3. Modes de variabilités des anomalies mensuelles des séries d'activités de végétation et de précipitations de 1981 à 2020

Les spectres en ondelettes des figures III.14 et III.15 qui ont été réalisés sur des données mensuelles NDVI et de Précipitations débarrassés de leur tendance, montrent plusieurs modes de distribution de la puissance des signaux au cours de la période d'étude.

Les spectres d'ondelettes des anomalies de précipitations et d'indice NDVI (Figures III.14 et III.15) présentent plusieurs bandes de fréquences, saisonnières aux fréquences interannuelles significatives.

Pour les différentes séries d'anomalies, les modes saisonniers (3–4 mois, 6 mois et 1 an), les modes interannuels (1–2 ans, 2–3 ans, 3–4 ans, 4–6 ans) sont identifiés dans les différents spectres. Les modes saisonniers 3–4 mois et 6 mois, qui correspondent à l'alternance saisonnière, sont les plus exprimés sur l'ensemble des sites étudiés. La localité de Ballou est la seule à enregistrer le mode interannuel 4–6 ans au cours de la période 2004–2010. Dans les transformées en ondelettes continues de séries de végétation, des spots de forte puissance sont identifiés en 1993–1995 à Syer (mode 1–2ans), 1995–2000 à Tèssékéré (mode 1–2ans), 1999–2001 à Loughéré-Thioly (mode 1–2ans) et à Ballou entre 1994–1997 pour la variabilité interannuelle 3–4 ans.

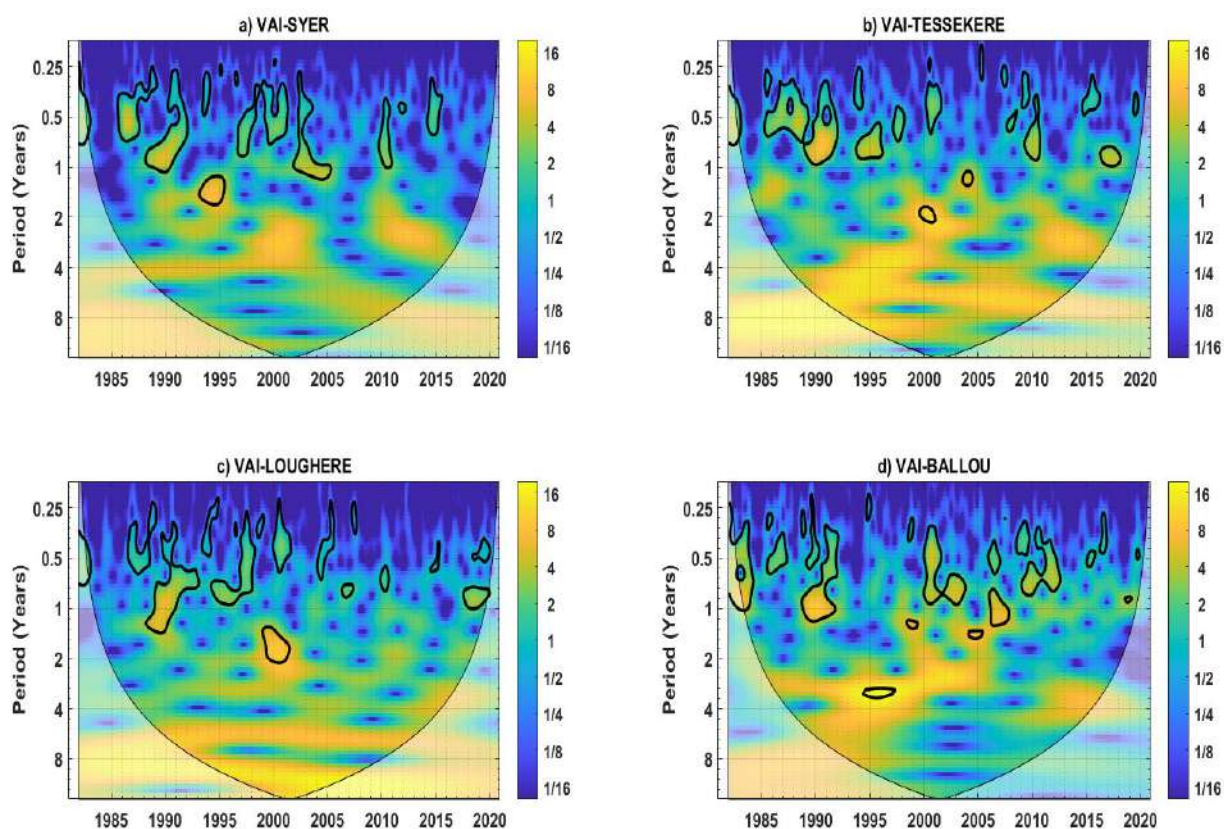


Figure III.14: Spectres de l'analyse en ondelettes continues de l'indices d'anomalie de végétation (VAI) localité Syer, Téssekéré (Lougá), Loughéré-Thioly (Matam), Ballou (Tambacounda), trait noir fin : cône d'influence ; traits noirs gras : limite de confiance 95%.

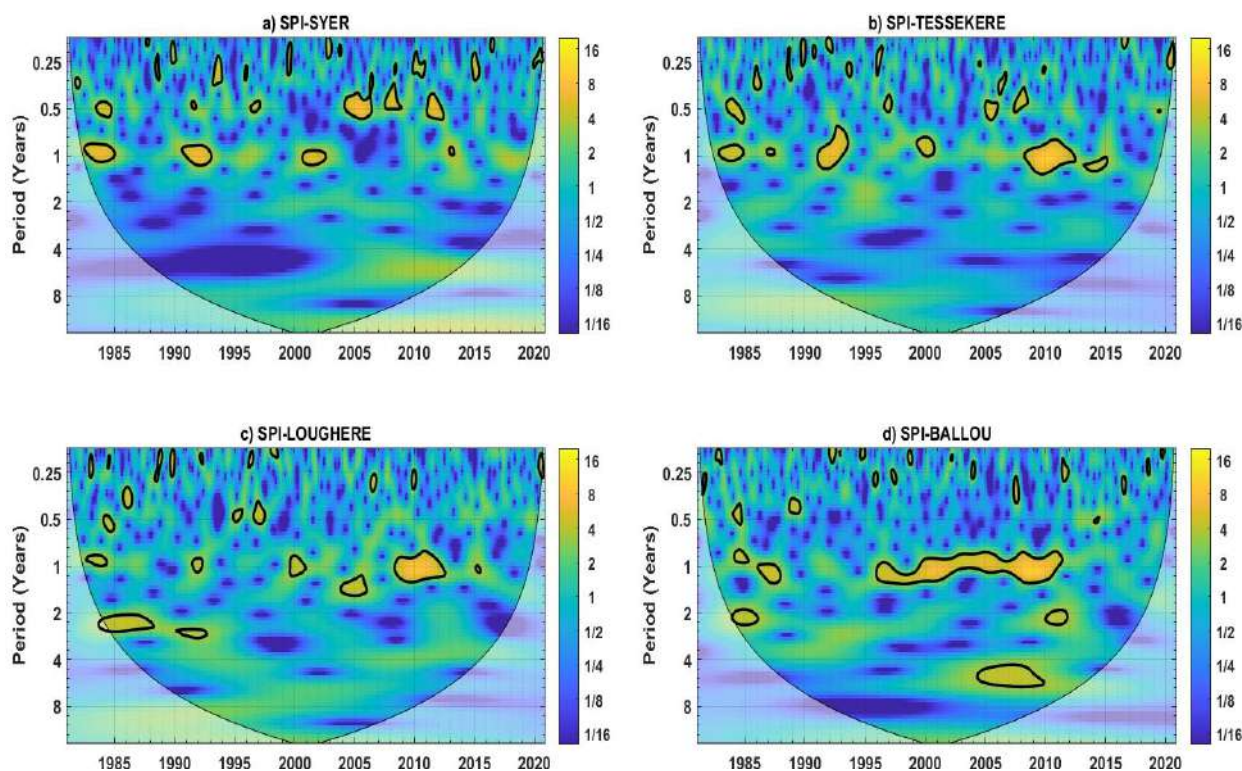


Figure III.15: Spectres de l'analyse en ondelettes continues de l'indice de précipitations normalisé (SPI) localité Syer, Téssekéré (Lougá), Loughéré-Thioly (Matam), Ballou (Tambacounda), trait noir fin : cône d'influence ; traits noirs gras : limite de confiance 95%.

III.1.4. Analyse des ruptures des séries d'indices de végétation et de paramètres climatiques aux échelles annuelle et saisonnière au sein de la GMV du Sénégal

L'approche statistique par l'application des tests de détection de rupture a été utilisée pour analyser les séries chronologiques des précipitations, d'indices de végétation (NDVI et VHI), d'évapotranspirations et d'humidité du sol. Une « Rupture » traduit un changement dans la loi de probabilité de la série chronologique à un instant donné, le plus souvent inconnu. Le test de Pettitt est adapté à la détermination de la rupture principale (rupture unique). Et, le test Bayésien BEAST permet de détecter plusieurs dates de rupture dans la série étudiée (Voir **Chapitre II**). Ces tests ont été utilisés dans plusieurs études menées sur la pluviométrie en Afrique ([Paturel et al., 1998](#) ; [Traoré et al., 2014](#)).

III.1.4.1. Analyse des ruptures par le test de Pettitt

La figure III.16 et les tableaux III.4, et III.5 donnent la synthèse des dates des principales ruptures des séries temporelles, les valeurs moyennes avant et après rupture et les statistiques de Pettitt des séries d'indices de végétation (NDVI, VHI), de précipitations et d'humidité du sol sur la période 1981–2020. Ainsi, Les résultats des tableaux III.4 et III.5 du test de Pettitt, révèlent pour les précipitations annuelles des ruptures significatives à très significative en 1997 dans les localités de Téssékéré et Loughéré-Thioly et en 1998 pour Syer et Ballou. Les données de précipitations de la saison humide sont aussi significatives à très significatives, et en saison sèche les ruptures sont peu significatives.

Pour les séries annuelles de NDVI, les ruptures très significatives sont observées à Syer (2000), Loughéré-Thioly (2004), Ballou (2002) et la rupture significative à Téssékéré (2004). À l'échelle saisonnière, les données NDVI présentent des ruptures significatives pour la saison végétative et très significatives pour la saison sèches. Les résultats des tests de ruptures pour la série de santé de végétation (VHI) montrent des ruptures qui apparaissent plus tôt que la série d'indice NDVI (Syer en 1997, Loughéré-Thioly en 2003) ou à la même date que le NDVI (Téssékéré 2004 et Ballou 2002). Les ruptures significatives de la saison végétative de la série VHI apparaissent en Octobre 1997 à Syer, Téssékéré, Loughéré-Thioly et Octobre 2002 à Ballou.

Concernant les séries d'humidité du sol, la rupture dans la série annuelle apparait en 2007 dans les localités de Syer, Téssékéré et Loughéré-Thioly, à l'exception de Ballou où la rupture intervient en 2002 et elle est non significative.

Notons qu'après les différentes ruptures, toutes les moyennes des différents indices de végétation et paramètres climatiques sont en hausse. L'indice NDVI connaît une hausse de 5 à 10%, l'indice de santé de la végétation VHI de 8 à 26%, la pluviométrie annuelle de 20 à 31%. Et, l'humidité du sol enregistre la hausse la plus significative comprise entre 26 à 37%.

L'évapotranspiration, qui est le processus par lequel l'eau est transférée de la surface terrestre vers l'atmosphère, à la fois par l'évaporation de l'eau de surface (plans d'eau, des sols humides, des surfaces végétalisées) et par la transpiration des plantes, est une variable importante dans le cycle de l'eau. Elle est étudiée à travers l'évapotranspiration potentielle (ETP qui représente la quantité maximale d'eau qui pourrait s'évaporer et être transpirée dans des conditions idéales, c'est-à-dire sans limitation d'eau disponible pour les plantes) et l'évapotranspiration réelle (ETR qui représente la quantité réelle d'eau qui s'évapore des surfaces terrestres et transpirée par les plantes).

Le suivi de ces paramètres est résumé dans le tableau III.6 ci-dessous. Plusieurs dates de rupture ont été enregistrées aux niveaux de l'ETR et de l'ETP sur la période 1981-2020. L'évapotranspiration réelle présente des ruptures très significatives ($P_v < 0,01$) et à la hausse de l'échelle annuelle à l'échelle saisonnière. Pour l'ETR, les dates de ruptures se situent entre 1998 et 2004. Les données annuelles de l'ETR, nous indiquent que la hausse moyenne de l'eau évaporée sur les différents sites de GMV est de 16,7% à 33%, soit respectivement 69mm à 82mm d'eau (16% à Ballou ; 27% à Loughéré-Thioly ; 28% à Syer et 33% à Téssékéré). En saison humide, l'ETR enregistre un gain moyen mensuel très significatif de 14,8 % à 29% dans les localités de Syer, Téssékéré et Loughéré-Thioly. Par contre, dans à Ballou le gain de 6,4% est non significatif. Ce constat est observé au cours de la période sèche avec une hausse allant de 32% à 62%.

Pour l'évapotranspiration potentielle, les ruptures s'observent entre 1995 et 2001 pour les séries annuelles et entre 1993 à 2006 pour l'analyse saisonnière. Les moyennes après ruptures de l'ETP annuelles sont à la hausse, mais elles ne sont pas toujours significatives. Et elles sont comprises entre 19,32mm à Ballou et 7mm à Syer ce qui correspond à une hausse de 0,8% à 2,1%. A l'échelle saisonnière, les ruptures de l'ETP présentent deux dynamiques (hausse ou baisse). À Syer et Loughéré-Thioly, nous observons une baisse moyenne de l'ETP au cours de la saison humide (-1%).

Tableau III.4 : Résultat du test de Pettitt - Années de ruptures et statistiques de la végétation (NDVI, VHI).

Test de Pettitt		NDVI			VHI			
Localités	Date de Rupture	Moyenne avant Rupture	Moyenne après rupture	Statistique de Pettitt (U et Pvaleur)	Date de Rupture	Moyenne avant Rupture	Moyenne après rupture	Statistique de Pettitt (U et Pvaleur)
Séries annuelles								
Syer	2000	0,22	0,25	U=324 Pv=6,3.10 ⁻⁵	1997	42,47	53,66	U=304 Pv=2,23.10 ⁻⁴
Téssékéré	2004	0,24	0,26	U=192 Pv=0,05	2004	46,50	50,52	U=112 Pv=0,58
Loughéré-Thioly	2004	0,24	0,26	U=236 Pv=0,80.10 ⁻²	2003	41,82	52,01	U=202 Pv=0,03
Ballou	2002	0,27	0,29	U=256 Pv=3,1.10 ⁻³	2002	45,81	51,15	U=162 Pv=0,15
Saison Végétative								
Syer	08/2003	0,26	0,30	U=1826 Pv=8,34.10 ⁻⁶	10/1997	41,67	54,88	U=1576 Pv=1,90.10 ⁻⁴
Téssékéré	10/2004	0,30	0,32	U=870 Pv=0,12	10/1997	44,91	54,68	U=892 Pv=0,10
Loughéré-thioly	08/2004	0,29	0,32	U=1150 Pv=0,01	10/1997	41,86	54,57	U=1272 Pv=4,91.10 ⁻³
Ballou	08/2003	0,38	0,40	U=760 Pv=0,23	10/2002	45,82	59,07	U=1690 Pv=4,92.10 ⁻⁵
Saison sèche								
Syer	07/1997	0,21	0,23	U=14372 Pv=7,7.10 ⁻¹³	03/1998	42,79	53,38	U=16216 Pv=3,1.10 ⁻¹⁶
Téssékéré	07/1997	0,219	0,23	U=9199 Pv=1,6.10 ⁻⁵	11/2004	46,14	48,96	U=9494 Pv=0,12
Loughéré-Thioly	07/2003	0,218	0,236	U=10864 Pv=1,6.10 ⁻⁷	07/2003	40,98	50,59	U=12222 Pv=2,1.10 ⁻⁹
Ballou	06/2003	0,23	0,251	U=8172 Pv=1,9.10 ⁻⁴	06/2003	45,44	49,07	U=5694 Pv=0,02

Tableau III.5: Résultat du test de Pettitt - Années de ruptures et statistiques des Précipitations et de l'Humidité du Sol.

Test de Pettitt	PRECIPITATIONS				HUMIDITE DU SOL			
Localités	Date de Rupture	Moyenne avant Rupture (mm)	Moyenne après rupture (mm)	Statistique de Pettitt (U et Pvaleur)	Date de Rupture	Moyenne avant Rupture (mm)	Moyenne après rupture (mm)	Statistique de Pettitt (U et Pvaleur)
Séries annuelles (« Pluie(mm/an) » et « Humidité du sol (mm/mois) »)								
Syer	1998	228,53	294,12	U=212 Pv=0,03	2007	86,42	108,89	U= 195 Pv=6,17.10 ⁻²
Téssékéré	1997	248,15	325,65	U=231 Pv=0,01	2007	85,49	121,24	U= 253 Pv=5,7.10 ⁻³
Loughéré-Thioly	1997	322,46	388,30	U=195 Pv= 0.06	2007	88,39	117,32	U= 229 Pv=1,6.10 ⁻²
Ballou	1998	481,89	580,90	U=273 Pv=0,2.10 ⁻²	2002	133,33	154,72	U= 142 Pv=0.32
Saison humide (mm/mois)								
Syer	07/1997	66,41	87,50	U=1179 Pv=0,01	07/2005	102,41	136,13	U=997 Pv=6,5.10 ⁻²
Téssékéré	08/1998	71,09	96,63	U=1481 Pv=10 ⁻³	07/2007	110,58	161,37	U=1200 Pv=1,4.10 ⁻²
Loughéré-Thioly	09/1997	93,58	114,36	U=1017 Pv=0,05	08/2004	115,35	152,10	U=1049 Pv=4,52.10 ⁻²
Ballou	07/1998	133,51	162,22	U=1140 Pv=0,02	07/2003	185,97	232,72	U=1021 Pv=5,52.10 ⁻²
Saison sèche (mm/mois)								
Syer	10/1999	2,87	3,31	U=3653 Pv=0,36	06/2007	79,09	101,10	U=5464 Pv=0,0435
Téssékéré	05/2012	4,06	4,12	U=1258 Pv=1	06/2007	75,98	108,96	U=8248 Pv=3,2.10 ⁻⁴
Loughéré-Thioly	10/1997	4,69	4,98	U=1747 Pv=1	06/2007	78,07	104,69	U=6772 Pv=5,6.10 ⁻³
Ballou	03/2012	9,91	10,07	U=940 Pv=1	06/2003	113,39	132,65	U=3794 Pv=0,31

Tableau III.6: *Années de ruptures et statistiques de l'Evapotranspiration réelle et de Evapotranspiration potentielle*

Test de Pettitt	EVAPORATION REELLE (ETR)				EVAPORATION POTENTIELLE (ETP)			
Localités	Date de Rupture	Moyenne avant Rupture (mm)	Moyenne après rupture (mm)	Statistique de Pettitt (U et Pvaleur)	Date de Rupture	Moyenne avant Rupture (mm)	Moyenne après rupture (mm)	Statistique de Pettitt (U et Pvaleur)
Séries annuelles (mm/an)								
Syer	1998	267,04	344,07	U=342 Pv=4,51.10 ⁻⁴	1995	886,28	893,33	U=179 Pv=0,11
Téssékéré	1999	247,00	328,61	U=339 Pv=5,45.10 ⁻⁵	1999	822,50	832,93	U=253 Pv=5,7.10 ⁻³
Loughéré-Thioly	2003	306,44	388,24	U=333 Pv=7,87.10 ⁻⁵	1996	863,61	881,03	U=288 Pv=10 ⁻³
Ballou	1998	414,67	483,73	U=360 Pv=1,42.10 ⁻⁵	2001	939,21	958,53	U=271 Pv=2,4.10 ⁻³
Saison humide (mm/mois)								
Syer	07/1998	46,88	60,34	U=1394 Pv=2,5.10 ⁻³	09/2006	90,62	89,70	U=608 Pv=0,56
Téssékéré	07/2001	51,64	62,31	U=1305 Pv=5,7.10 ⁻³	07/2001	84,23	85,10	U=561 Pv=0,67
Loughéré-Thioly	07/2004	59,01	67,74	U=1018 Pv=5,6.10 ⁻²	08/1993	85,96	85,09	U=407 Pv=1,00
Ballou	08/1999	69,47	73,95	U=740 Pv=0,30	08/2001	81,39	82,75	U=296 Pv=1,00
Saison sèche (mm/mois)								
Syer	04/1999	13,64	18,41	U=11350 Pv=1,34.10 ⁻⁷	02/1993	67,95	69,27	U=1774 Pv=1,34
Téssékéré	06/2000	10,08	16,30	U=15805 Pv=2,4.10 ⁻¹⁴	03/1998	63,01	64,36	U=2818 Pv=0,72
Loughéré-Thioly	06/2003	13,93	21,09	U=14314 Pv=7,7.10 ⁻¹²	03/1997	67,36	69,55	U=4571 Pv=0,13
Ballou	05/2003	23,09	30,54	U=9877 Pv=7,4.10 ⁻⁶	03/2003	77,05	79,27	U=4491 Pv=0,15

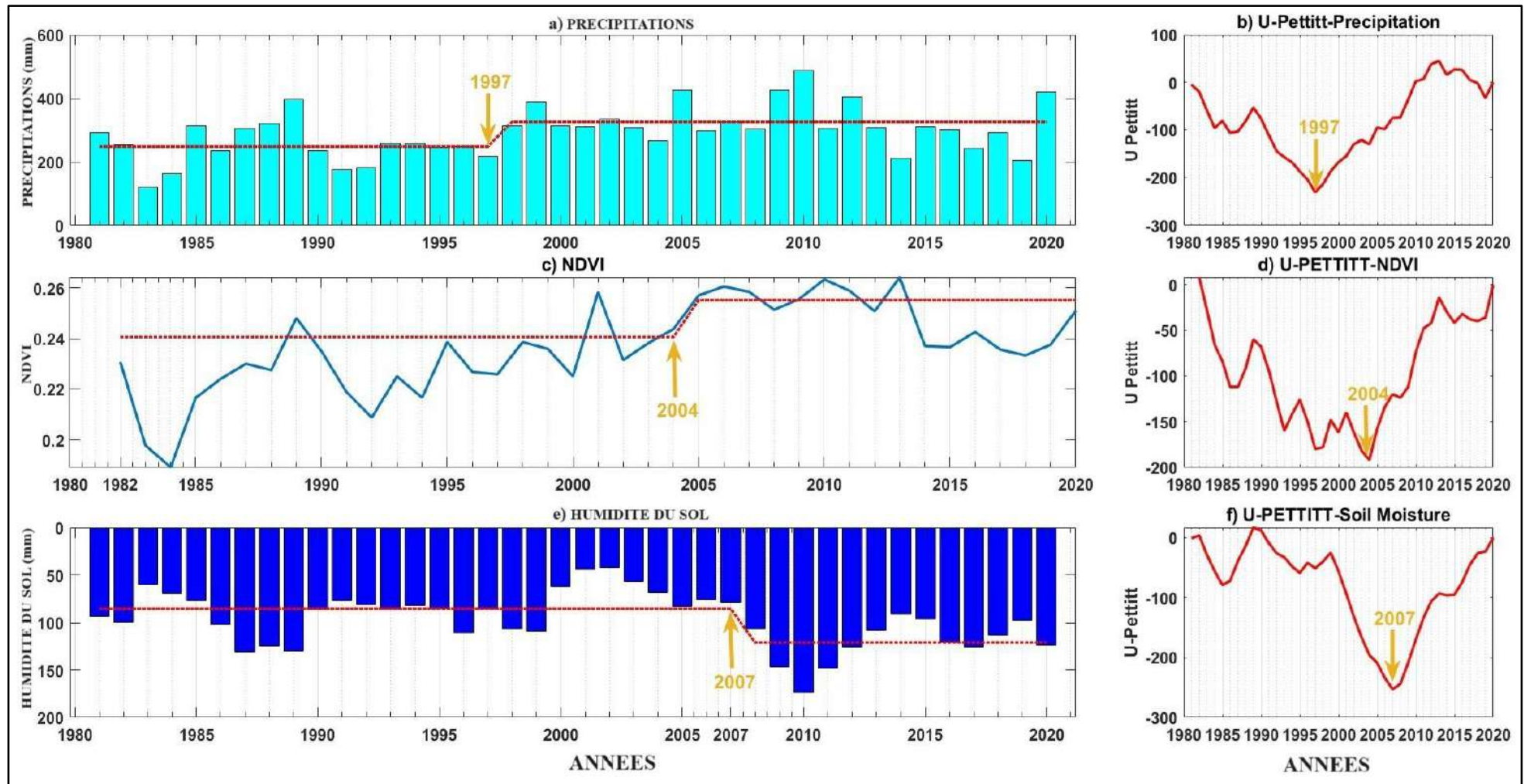


Figure III.16: Evolution interannuelle : a) des Précipitations, c) de l'indice NDVI, e) de l'humidité du sol et le test U de Pettitt (b, d, f) de Tésékéré (Louga) sur la période 1981-2020.

III.1.4.2. Analyse des ruptures par le test bayésien BEAST

La figure III.17 et les tableaux III.7, III.8 donnent la synthèse du test de rupture bayésien BEAST appliqué aux séries temporelles de végétation et de paramètres climatiques. Il s'agit des dates de ruptures, les probabilités d'occurrence des ruptures, les pentes des tendances des données annuelles d'indices de végétation (NDVI), de précipitations, d'humidité du sol et d'évapotranspirations (ETP, ETR) sur la période 1981–2020.

Les résultats de l'algorithme bayésien BEAST révèlent pour les précipitations des ruptures avec des pentes positives en 1991/1992, 1998/1999, 2005/2006, 2008/2009 et 2010. Dans les localités de Syer et Téssékéré, il est enregistré une rupture avec pente négative en 2012.

Pour les séries annuelles de NDVI, les ruptures significatives avec pentes positives sont observées en 1987 (Loughéré-Thioly), 1989 (Syer, Téssékéré, Ballou), 2001 (Syer), 2004/2005, 2008, 2010 et 2014. La rupture dans la tendance avec une pente négative s'observe en 2014 dans la localité de Ballou. Quant à la localité de Téssékéré, elle présente des ruptures à pentes positives.

Les séries temporelles d'humidité du sol sont caractérisées par des ruptures qui sont associées à des valeurs de pentes élevées. Ainsi, les ruptures avec les pentes positives sont repérées en 1985/1986, 2002, 2008 (Téssékéré), 2009 (Loughéré-Thioly), 2010 (Syer) et 2013. Et, les ruptures à pentes négative en 1990/1991 et 2000 (Syer, Téssékéré, Loughéré-Thioly). Notons que la série d'humidité du sol de Ballou ne présente que des ruptures à pentes positives.

À l'échelle annuelle, l'évapotranspiration réelle présente des ruptures à pentes positives dans l'ensemble. Les ruptures avec de fortes probabilités d'occurrences sont localisées après 1998 à Syer (1999), Téssékéré (1998), Loughéré-Thioly (1998) et les années 2000 (Syer 2014 ; Téssékéré et Loughéré-Thioly 2010 ; Ballou 2004). En 2017, nous constatons une rupture à pente négative à Ballou.

L'analyse des ruptures des séries d'évapotranspiration potentielle des localités de Syer, Téssékéré et Loughéré-Thioly, fait apparaître des ruptures à pente positive peu prononcée avant l'année 2005. Et à partir de l'année 2007, toutes les pentes détectées dans ces localités sont négatives (2007 à Téssékéré ; 2010 à Loughéré-Thioly et 2013 à Syer). Par contre à Ballou, les ruptures observées sont toutes à pentes positives.

Les ruptures observées dans les différentes séries temporelles représentent les dates de changements et de transition entre différentes dynamiques de l'état du couvert végétal (présence

ou absence de stress) ou de la pluviométrie (période sèche ou humide). Dans cette partie, les résultats obtenus sur la détection des dates de rupture dans les séries temporelles sont conformes aux analyses d'anomalies standardisées associées au NDVI et précipitations, à l'analyse en ondelette continue de l'ensemble des données de notre zone d'étude.

Tableau III.7 : Résultat du test Bayésien BEAST- Années de ruptures, probabilité d'occurrence de ruptures et pente des tendances des données annuelles de précipitations, NDVI et humidité du sol de Syer, Téssekéré (Louga), Loughéré-Thioly (Matam) et Ballou (Tambacounda).

Paramètres	PRECIPITATIONS			NDVI			HUMIDITE DU SOL		
Localités	Année	Probabilité	Pente	Année	Probabilité	Pente	Année	Probabilité	Pente
SYER	2009	0,15	0,73	2014	0,41	$6,25.10^{-3}$	2010	0,20	0,40
	1992	0,12	0,41	2001	0,29	$4,90.10^{-3}$	2002	0,17	0,12
	2012	0,11	-0,20	2005	0,20	$1,93.10^{-3}$	1991	0,05	$-0,14.10^{-2}$
	1999	0,09	1,20	1989	0,13	$1,44.10^{-3}$			
				1992	0,07	$6,22.10^{-4}$			
TESSEKERE	1992	0,13	0,38	2005	0,16	$4,40.10^{-4}$	2008	0,67	18,88
	2012	0,12	-0,47	1989	0,13	$1,56.10^{-4}$	2000	0,42	-7,43
	1998	0,11	2,04	2010	0,12	$9,39.10^{-5}$	1986	0,29	4,07
				1992	0,11	$7,66.10^{-5}$	2013	0,25	4,53
				1998	0,07	$1,43.10^{-4}$	1990	0,24	-3,03
LOUGHERE THIOLY	2010	0,17	0,27	2005	0,21	$2,33.10^{-3}$	2009	0,53	12,38
	1991	0,16	0,12	2014	0,18	$1,27.10^{-3}$	2000	0,44	-11,76
	1998	0,08	0,65	1987	0,17	$1,42.10^{-3}$	1986	0,38	9,08
	2005	0,07	0,43	1994	0,11	$0,70.10^{-3}$	1990	0,34	-7,04
							2013	0,30	5,95
BALLOU	1999	0,31	9,87	2004	0,47	$4,11.10^{-3}$	2002	0,19	0,24
	2010	0,14	1,34	1989	0,26	$1,48.10^{-3}$	1997	0,18	0,05
	2006	0,12	1,07	2014	0,14	$-0,61.10^{-3}$	1985	0,05	0,09
	1994	0,09	2,71	2008	0,10	$3,86.10^{-5}$			
				1994	0,07	$0,13.10^{-3}$			

Tableau III.8: Résultat du test Bayésien BEAST- Années de ruptures, probabilité d'occurrence de ruptures et pente des tendances des données annuelles d'évapotranspiration réelle, évapotranspiration potentielle de Syer, Téssekéré (Louga), Loughéré-Thioly (Matam) et Ballou (Tambacounda).

Paramètres	ETR			ETP		
Localités	Année	Probabilité	Pente	Année	Probabilité	Pente
SYER	1999	0,37	14,04	2003	0,14	$0,80.10^{-2}$
	2014	0,31	13,09	2000	0,12	$6,50.10^{-2}$
	1992	0,08	2,56	1992	0,11	0,02
	1985	0,04	2,52	2013	0,05	$-0,31.10^{-2}$
TESSEKERE	1998	0,18	6,56	1998	0,14	0,33
	2010	0,10	3,61	1985	0,13	0,01
	2005	0,08	4,42	1992	0,12	0,05
	1989	0,03	2,61	2007	0,11	-0,01
LOUGHERE THIOLY	2005	0,51	17,00	1997	0,49	4,63
	2010	0,19	3,20	2004	0,17	0,65
	1998	0,14	3,66	1988	0,09	-0,25
	1989	0,07	1,64	2010	0,03	-0,07
BALLOU	2004	0,46	17,39	2004	0,27	2,04
	2000	0,24	6,36	1996	0,12	0,93
	1987	0,10	3,12	2017	0,07	0,15
	2017	0,07	-0,65	2013	0,04	0,34
	2008	0,06	1,56	1987	0,042	0,32

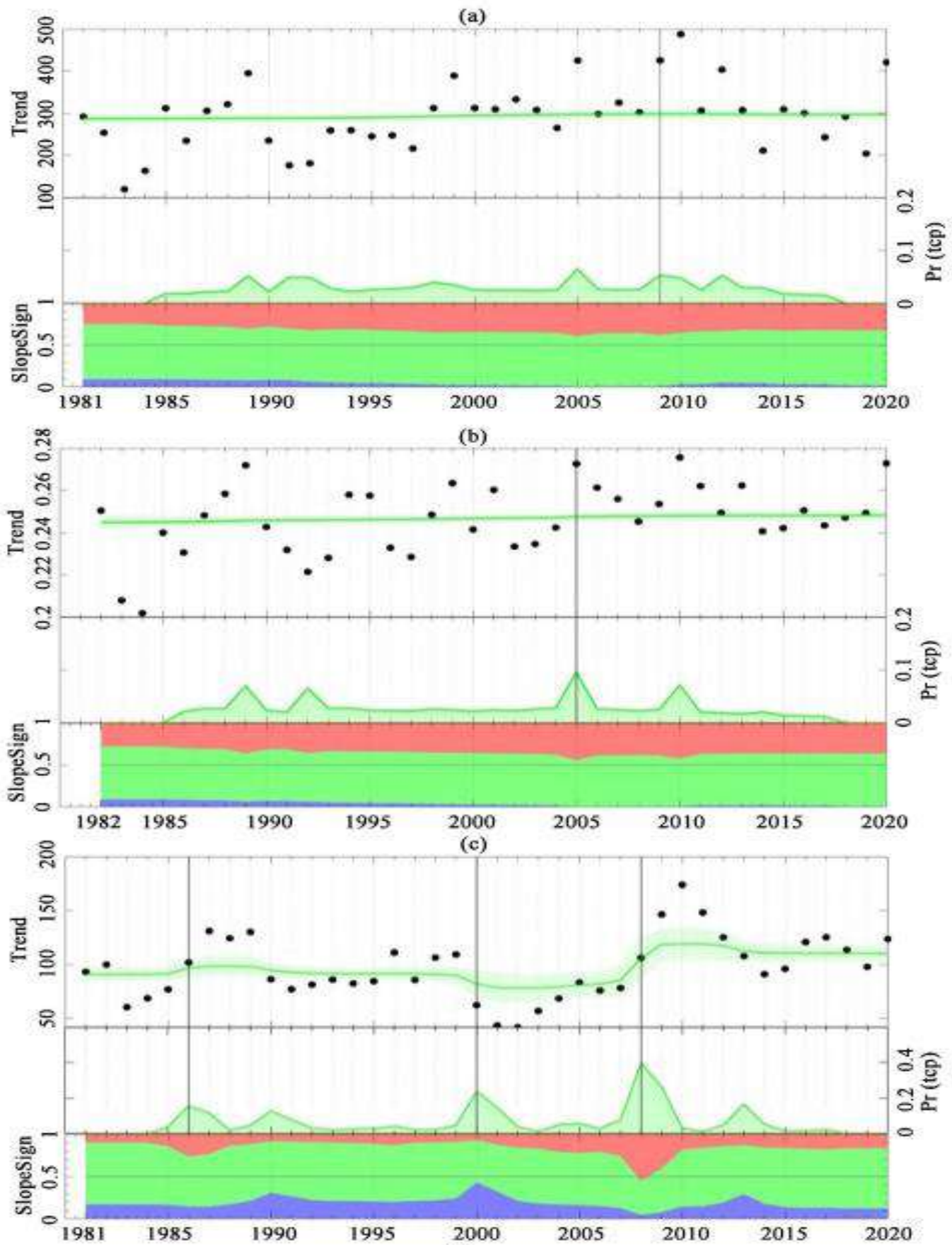


Figure III.17: Décomposition BEAST des séries annuelles de (a) Précipitations, (b) NDVI et (c) Humidité du sol de 1981-2020 – Tèssékéré (Louga).

III.1.5. Analyse comparée des évolutions interannuelle et intra saisonnière de 2000 à 2020 du couvert végétal et les paramètres climatiques au sein de la GMV du Sénégal

III.1.5.1. Tests de normalités des séries temporelles de végétation et paramètres climatiques

Les tableaux ci-dessous (Tableaux III.9 et III.10) résument les résultats des tests de normalités appliquées aux données NDVI, VHI, précipitations, humidité du sol et d'évaporations sur la période 1981-2020 aux pas de temps annuel et mensuel (Cas de la localité de Syer-Louga). La distribution des séries annuelles des indices de végétation, précipitations, humidité du sol et d'évaporations (ETR, ETP) suivent une loi normale. Par contre, les distributions des séries mensuelles des différents paramètres ne seront pas assimilées à des données normales. Alors, l'application du test de comparaison de Student (test paramétrique) a été utilisé pour évaluer les moyennes des séries annuelles. Et, le test de comparaison Mann Whitney-Wilcoxon (test non-paramétrique) a été choisi pour comparer les moyennes mensuelles.

Tableau III.9: Résultats des tests de Normalité de séries NDVI annuelle et mensuelle de la localité de Syer.

	Données (NDVI)	Nom du test	Statistiques des test	P value	Décision (1 : Normal, 0 : Not Normal)
1	Annuelle (Nombre années 39)	Kolmogorov-Smirnov	0,58	0,88	1
2		Shapiro-Wilk	0,96	0,18	1
3		Jarque-Bera	1,77	0,41	1
4		D'Agostino & Pearson	2,59	0,27	1
5	Mensuelle (Nombre de mois 468)	Kolmogorov-Smirnov	1,90	0,001	0
6		Shapiro-Wilk	0,96	$3,40 \cdot 10^{-10}$	0
7		Jarque-Bera	63,48	$1,64 \cdot 10^{-14}$	0
8		D'Agostino & Pearson	49,74	$1,59 \cdot 10^{-11}$	0

Tableau III.10: Résultats des tests de Normalité de série de Précipitations de la localité de Syer

	Données (Précipitations)	Nom du test	Statistiques des test	P value	Décision
1	Annuelle (Nombre année 40)	Kolmogorov-Smirnov	0,73	0,65	1
2		Shapiro-Wilk	0,98	0,76	1
3		Jarque-Bera	0,78	0,67	1
4		D'Agostino & Pearson	1,56	0,46	1
5	Mensuelle (Nombre de mois 480)	Kolmogorov-Smirnov	6,74	0	0
6		Shapiro-Wilk	0,63	0	0
7		Jarque-Bera	721,24	0	0
8		D'Agostino & Pearson	209,32	0	0

III.1.5.2. Evolution interannuelle du couvert végétal et les paramètres climatiques

Les tableaux III.11, III.12 présentent respectivement les statistiques moyennes annuelles et saisonnières (en particulier la saison humide JAS) des indices de végétation et d'éléments climatiques sur les périodes 2000-2020, 2000-2008 et 2009-2020 dans les localités de la GMV-Sénégal.

L'indice NDVI présente une hausse de la période 2000-2008 à la période 2009-2020 de l'ordre de 2 à 8%. Au cours de la saison de pluie (JAS), l'on peut noter une augmentation de la valeur de l'indice NDVI de 1,5 à 7 %. La période 2009-2020 enregistre une amélioration de l'activité végétative pendant la période sèche (3,33% à Téssékéré ; 0,83% à Syer et 4,12% à Loughéré-Thioly). Il s'en suit une augmentation de l'indice de végétation (VHI) sur l'ensemble des localités d'étude au cours de la période 2009-2020. Ce gain varie de +0,5 à +5,5 soit une évolution de +0,92% (Syer) et +10,52% (Loughéré Thioly). En somme, l'analyse interannuelle et intrasaisonnière des indices de végétation montre une évolution positive des indices NDVI et VHI au cours de la période 2009-2020 (après reboisement). De plus, les représentations spatiales des indices de végétation et d'évolution entre les périodes 2009-2020 et 2000-2008 montrent une évolution positive et significative à l'extrême nord du Sénégal, dans la région de la Casamance (sud Sénégal) et le long du tracé de la GMV-Sénégal (Figure III.18).

Les précipitations annuelles de la période 2000-2020 sont supérieurs à la normale climatologique de 1991-2020 sur l'ensemble de nos sites d'étude de la GMV-Sénégal (à Syer-Louga : 291,85mm en 2000-2020 et 284,8mm en 1991-2020 ; Téssékéré-Louga : 323,27mm en 2000-2020 et 274,1 en 1991-2020 ; Loughéré Thioly-Matam : 385,82mm en 2000-2020 et 366,8mm en 1991-2020 ; Ballou-Tambacounda 576,49mm en 2000-2020 et 446,0mm pour la normale 1991-2020). Ainsi, l'analyse comparée des précipitations pour les périodes 2000-2008 et 2009-2020, montre une hausse de la pluviométrie annuelle après 2009. Ces excédents de pluviométrie annuelle représentent 2 à 5% de la valeur moyenne 2000-2020. Et aussi, une amélioration de la saison de pluie (JAS) de 4 à 9% est observée.

L'évolution interannuelle moyenne de l'humidité du sol présente une hausse de 2000-2008 à 2009-2020 dans les localités de Syer, Téssékéré (Louga) et Loughéré-Thioly (Matam). L'on observe une hausse de l'humidité du sol comprise entre +25% à +55% sur ces sites, ce qui représente une hauteur d'eau dans le sol de +24mm à +54mm. De plus, l'on constate une augmentation de l'humidité au cours des saisons de pluie et de la saison sèche. Une évolution positive en saison de pluie (JAS) de 24 à 50% soit un surplus d'eau dans le sol de 26,37mm à Syer, 65,95mm à Téssékéré et 69,6mm à Loughéré Thioly. La saison sèche présente un gain de

21 à 57% de la valeur moyenne 2000-2020 qui représente une hausse de 17,49mm à Syer, 49,93mm à Téssékéré et 52,49mm à Loughéré Thioly. Cependant, le site de Ballou enregistre une baisse de l'humidité du sol de 2000-2008 à 2009-2020. Cette perte d'infiltration d'eau dans le sol représente -1,76% à l'échelle annuelle et -6,06% pendant la saison humide JAS.

La plage d'augmentation annuelle de l'évapotranspiration réelle de nos différentes localités est comprise entre 6mm à 47mm d'eau évaporée. Comparé à la période 2000-2020, la hausse de l'ETR enregistrée au cours de 2009-2020 est de 2% à 13%. Les gains les plus significatifs sont observés dans les communes de Téssékéré et Loughéré-Thioly avec respectivement 36,8mm/an (+10.9%) et 47,3mm/an (+12,54%). Au cours de la saison de pluie, la période 2009-2020 note une hausse moyenne mensuelle de 3mm/mois à 8mm/mois, soit un gain mensuel de +1,5% à +4%. En saison sèche, les hausses les plus significatives de la période 2009-2020 sont toujours observées à Téssékéré et Loughéré-Thioly avec des gains de +22% (33mm à Téssékéré et 40mm à Loughéré-Thioly).

L'analyse de l'évapotranspiration potentielle annuelle entre les périodes 2000-2008 et 2009-2020 présente deux dynamiques. Une baisse (-0,05% à -0,3%) de l'ETP est observée à Syer, Téssékéré et Loughéré-Thioly. Par contre, le site de Ballou enregistre une hausse de l'ETP de plus de +0.4% au cours de la période 2009-2020. Cependant, la comparaison de l'ETP en saison humide nous montre une seule dynamique à la baisse de l'ensemble des sites d'étude.

Tableau III.11: Statistiques moyennes annuelles de l'évolution de l'activité de la végétation et des paramètres climatiques des localités de la GMV-Sénégal de 2000-2020 (Test de comparaison de moyennes de Student aux seuils $\alpha=0,05(*)$ et $\alpha=0,01(**)$).

LOCALITES DE GMV	PARAMETRES	PERIODES			Différence (2009-2020) et (2000-2008)	Évolution en % (2009-2020) et (2000-2008)
		2000-2020	2000-2008	2009-2020		
TESSEKERE (LOUGA)	NDVI	0,25	0,24	0,26	0,02	7,94%
	VHI	49,04	47,90	49,89	1,98	4,06%
	Précipitations	323,27	319,83	325,84	6,01	1,86%
	Humidité du Sol	99,38	68,57	122,50	53,93**	54,27%
	Evapotranspiration réelle	328,61	308,14	343,97	35,83*	10,90%
	Evapotranspiration potentielle	832,93	833,10	832,81	-0,29	-0,04%
SYER (LOUGA)	NDVI	0,24	0,24	0,25	0,01	4,04%
	VHI	53,31	53,03	53,52	0,49	0,92%
	Précipitations	291,85	282,20	299,08	16,88	5,78%
	Humidité du Sol	98,74	84,49	109,43	24,94**	25,26%
	Evapotranspiration réelle	344,37	341,02	346,89	5,87	1,71%
	Evapotranspiration potentielle	893,07	894,69	891,86	-2,83	-0,32%
LOUGHERE-THIOLY (MATAM)	NDVI	0,25	0,25	0,26	0,01	4,00%
	VHI	49,62	46,64	51,86	5,22	10,52%
	Précipitations	385,82	377,77	391,85	14,08	3,65%
	Humidité du Sol	97,23	68,71	118,62	49,91**	51,33%

BALLOU (TAMBACOUNDA)	Evapotranspiration réelle	377,34	350,30	397,62	47,32**	12,54%
	Evapotranspiration potentielle	881,42	882,56	880,56	-2,00	-0,23%
	NDVI	2,85.10 ⁻¹	2,86.10 ⁻¹	2,85.10 ⁻¹	-10 ⁻³	-0,35%
	VHI	49,19	48,53	49,68	1,15	2,34%
	Précipitations	576,49	561,15	588	26,85	4,66%
	Humidité du Sol	150,24	151,75	149,1	-2,65	-1,76%
	Evapotranspiration réelle	484,83	473,82	493,08	19,25	3,97%
	Evapotranspiration potentielle	956,87	954,92	958,33	3,41	0,36%

Tableau III.12: Statistiques moyennes en saison de pluie « JAS » de l'évolution l'activité de la végétation et des paramètres climatiques des localités de la GMV-Sénégal de 2000-2020 (Test de comparaison de Mann whitney-Wilcoxon aux seuils $\alpha=0,05()$ et $\alpha=0,01(**)$).*

LOCALITES GMV	DE	PARAMETRES	PERIODES « Saison JAS »			Différence (2009-2020) et (2000-2008)	Évolution en % (2009- 2020) et (2000-2008)
			2000-2020	2000-2008	2009-2020		
TESSEKERE (LOUGA)		NDVI	0,287	0,287	0,29	0,003	1,05%
		VHI	51,00	51,37	50,72	-0,66	-1,28%
		Précipitations	285,73	279,178	290,65	11,472	4,01%
		Humidité du Sol	132,45	94,77	160,71	65,94**	49,78%
		Evapotranspiration réelle	185,10	183,54	186,28	2,74	1,48%
		Evapotranspiration potentielle	255,00	255,95	254,28	-1,67	-0,66%
SYER (LOUGA)		NDVI	0,264	0,266	0,27	0,004	1,52%
		VHI	54,27	54,15	54,36	0,21	0,39%
		Précipitations	261,78	250,5	270,25	19,75	7,54%
		Humidité du Sol	109,06	93,99	120,36	26,37*	24,18%
		Evapotranspiration réelle	180,59	178,11	182,44	4,33	2,40%
		Evapotranspiration potentielle	271,22	272,84	270,01	-2,83	-1,04%
LOUGHERE- THIOLY (MATAM)		NDVI	0,282	0,27	0,29	0,02	7,09%
		VHI	50,09	47,91	51,71	3,8	7,59%
		Précipitations	339,86	329	348,01	19,01	5,59%
		Humidité du Sol	142,7	102,93	172,53	69,6**	48,77%
		Evapotranspiration réelle	197,73	193,46	200,93	7,47	3,78%
		Evapotranspiration potentielle	256,79	258,41	255,57	-2,85	-1,11%
BALLOU (TAMBACOUNDA)		NDVI	0,369	0,374	0,366	-0,008	-2,17%
		VHI	51,93	52,67	51,37	-1,3	-2,50%
		Précipitations	480	454,68	499	44,32	9,23%
		Humidité du Sol	221,52	229,2	215,77	-13,43	-6,06%
		Evapotranspiration réelle	221,27	219,47	222,61	3,141	1,42%
		Evapotranspiration potentielle	247,44	247,46	247,42	-0,05	-0,019%

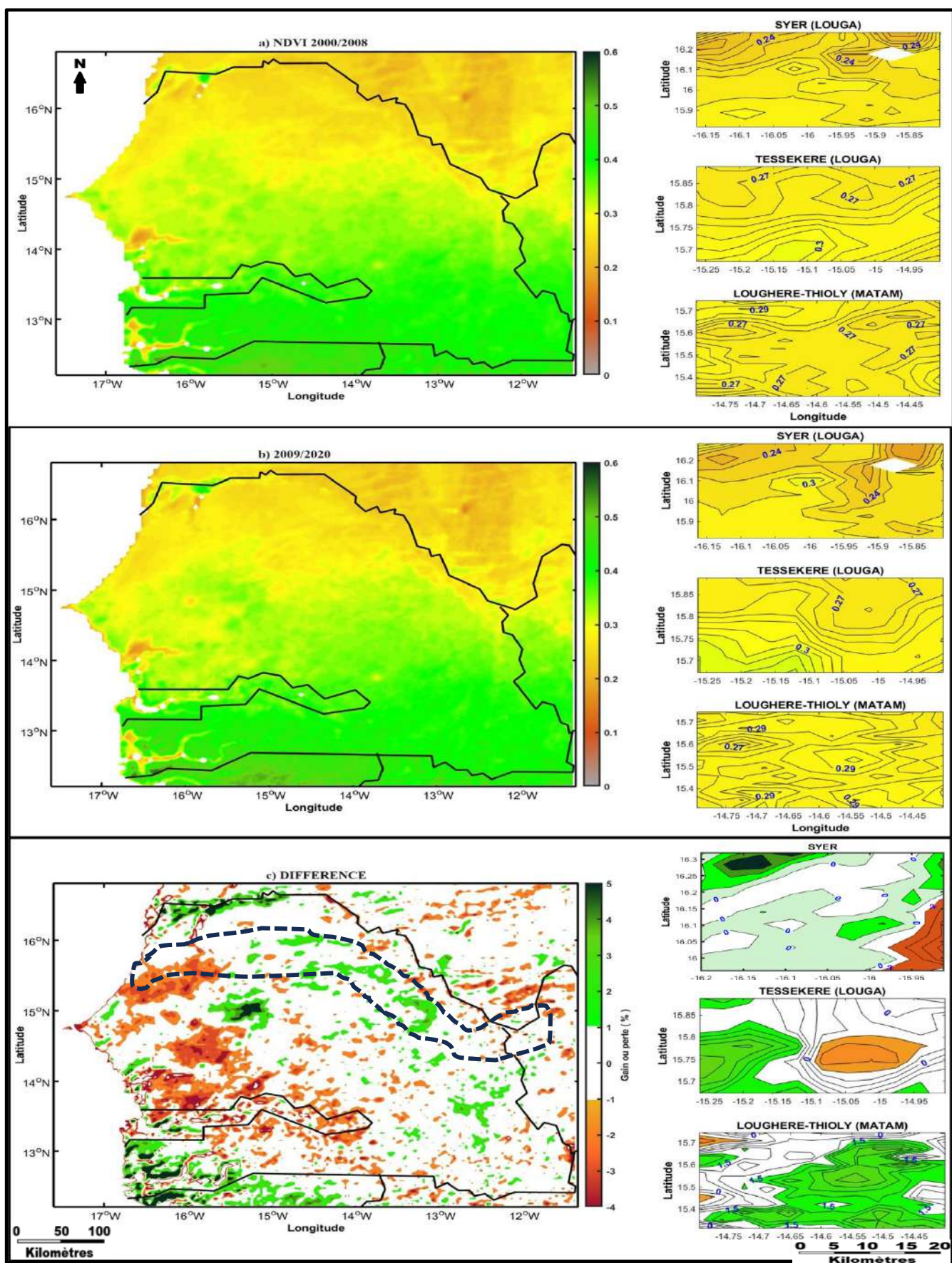


Figure III.18: Distributions spatiales de la végétation avant et après le reboisement et la différence (%) entre les deux périodes 2009-2020 et 2000-2008, région significative avec test de significativité $p=0,01$ (test de Student).

III.1.5.3. Evolution intra saisonnière du couvert végétal et les paramètres climatiques de 2000 à 2020

Les variabilités saisonnières du NDVI et VHI sur les localités de Téssékéré, Syer (LOUGA), Loughéré-Thioly (MATAM) et Ballou (TAMBACOUNDA) pour les périodes 2000-2008 et 2009-2020 sont présentées sur la figure III.19. L'évolution saisonnière du NDVI est unimodale avec un pic en Septembre et les plus faibles valeurs observées au mois de Juin. Les pics de la période 2009-2020 sont supérieurs à ceux de la période 2000-2008 (pics supérieurs à 0,35 pour Téssékéré et Loughéré-Thioly en 2009-2020). Sur les localités de Téssékéré et Loughéré-Thioly, les signaux saisonniers de la période 2009-2020 restent quasi supérieurs à la période 2000-2008. Dans la localité de Syer, nous observons une légère baisse des valeurs du NDVI uniquement sur la période hivernale pour la période 2009-2020 comparée à celle de 2000-2008. L'évolution saisonnière est quasi-constante pour la localité de Ballou sur les deux périodes de comparaison. Par contre, l'indice de santé de la végétation VHI présente une allure bimodale avec les maximas observés en Février et Septembre. Les valeurs maximales du mois de septembre pour la période 2009-2020 sont supérieures à celles de 2000-2008 (supérieures à 55 voire 60). A Loughéré-Thioly, les valeurs mensuelles du signal saisonnier de 2009-2020 demeurent supérieures à celles de 2000-2008.

La figure III.20 illustre les régimes saisonniers des précipitations et de l'humidité du sol pour les périodes 2000-2008 et 2009-2020. Ces cycles sont unimodaux pour les précipitations et l'humidité du sol. Le pic des précipitations observé en Août au cours de la période 2000-2008 est décalé en Septembre pour la période 2009-2020. De plus, la moyenne mensuelle (mm/mois) des précipitations JAS de 2009-2020 est supérieure à celle de 2000-2008. A Téssékéré et Syer, ces précipitations sont supérieures de 100mm/mois en 2009-2020 et inférieures à 100mm/mois avant la période de reboisement. Les valeurs mensuelles du cycle saisonnier de l'humidité du sol de la période 2009-2020 sont supérieures aux valeurs de la période 2000-2008 pour les localités de Syer, Téssékéré et Loughéré-Thioly. Dans ces localités, la période 2009-2020 enregistre des gains allant de 50mm à plus de 100mm au cours des mois Septembre-Octobre. Comparés à la période 2000-2008, les mois d'Août à Novembre (voire Décembre) de la période 2009-2020 marquent une humidité du sol supérieure à 150mm/mois. Le signal saisonnier du site de Ballou présente une légère baisse de l'humidité sur la période 2009-2020.

De manière générale, au cours de l'année, les variations mensuelles de l'ETR et ETP sont unimodales et caractérisées par des valeurs fortes qui se situent pendant la saison humide et les valeurs faibles au cours de la saison sèche (Figure III.21). Cependant, la comparaison des cycles mensuels de l'ETR entre la période 2000-2008 et 2009-2020 présente des différences les plus

remarquables au cours de la saison sèche. Dans les localités de Téssékéré et Loughéré-Tioly les pics des gains sont localisés entre mars et avril (+7mm/mois à Téssékéré et 8mm/mois à Loughéré-Thioly). Ceci témoigne d'un couvert en bonne santé hydrique et de la disponibilité de l'eau dans les sols de ces localités même en saison sèche. La comparaison des cycles mensuels de l'ETP de Syer, Téssékéré et Loughéré, nous indique que la période 2000-2008 conserve des valeurs élevées au cours de la saison JASO. Par contre, l'évapotranspiration potentielle de Ballou est plus élevée pendant la période 2009-2020 et le pic s'observe en mai traduisant une forte demande climatique en vapeur d'eau et un couvert végétal en stress hydrique continue au cours de cette période.

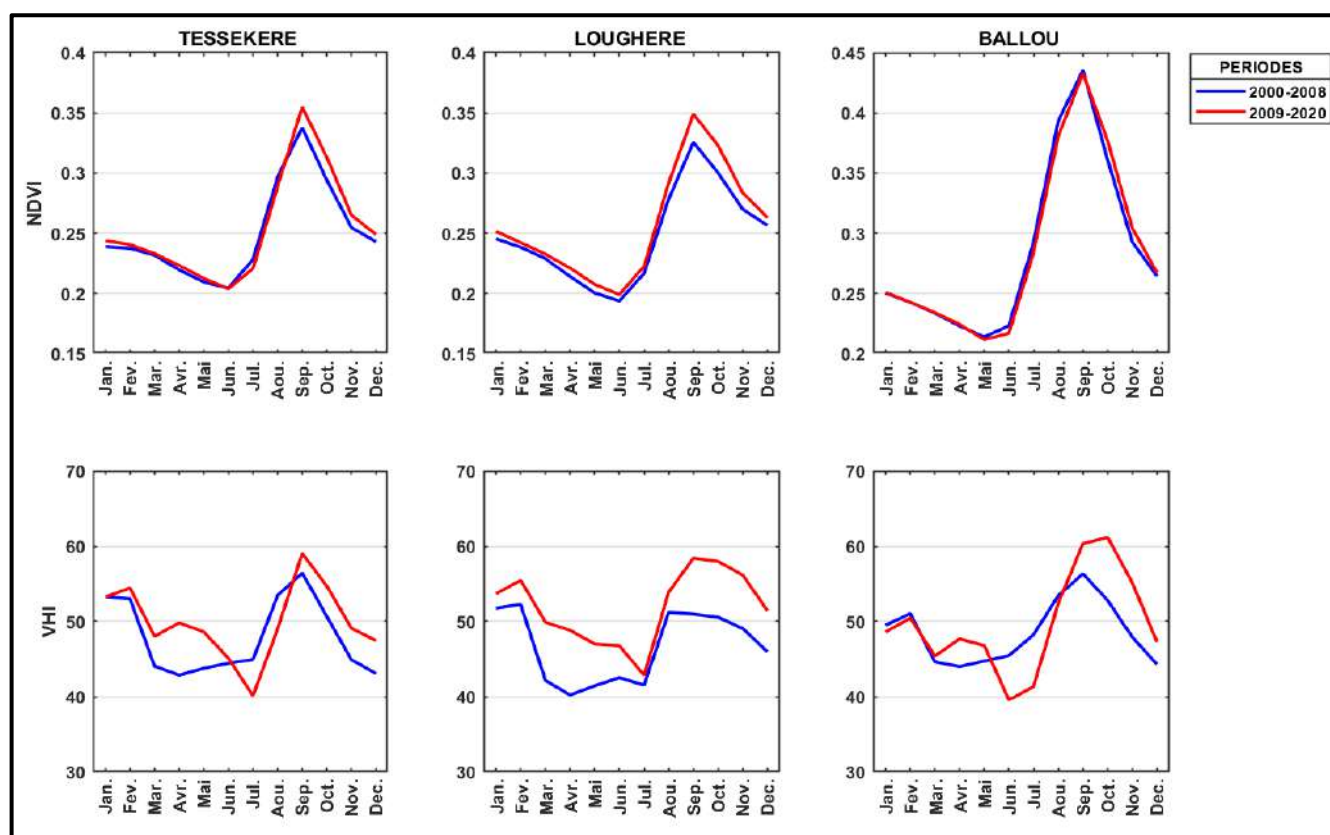


Figure III.19: Cycle saisonnier des indices de végétation NDVI et VHI des localités de Téssékéré, Syer (Louga), Loughéré-Thioly (Matam), Ballou (Tambacounda) GMV-Sénégal pour les périodes 2000-2008 et 2009-2020.

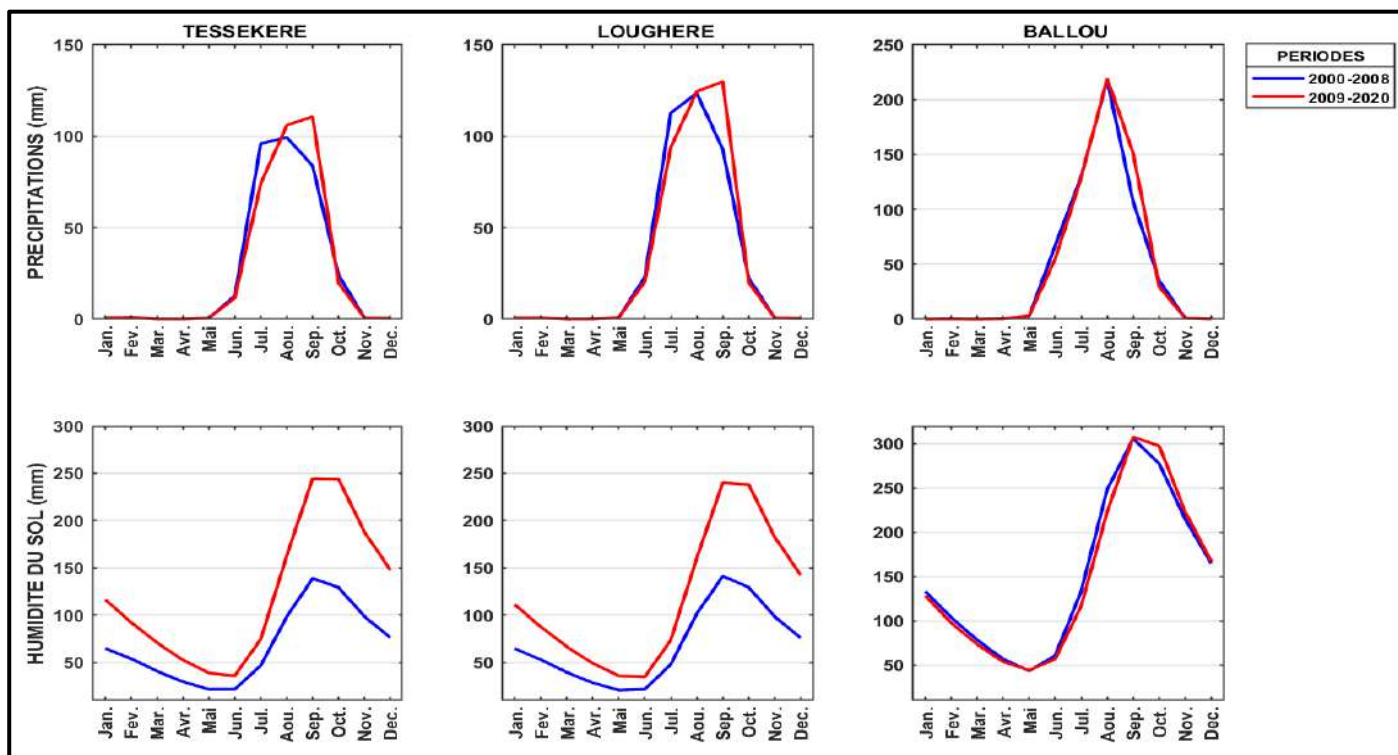


Figure III.20: Cycle saisonnier des précipitations et humidité du sol des localités de Tèssékéré, Syer (Louga), Loughéré-Thioly (Matam), Ballou (Tambacounda) GMV-Sénégal pour les périodes 2000-2008 et 2009-2020

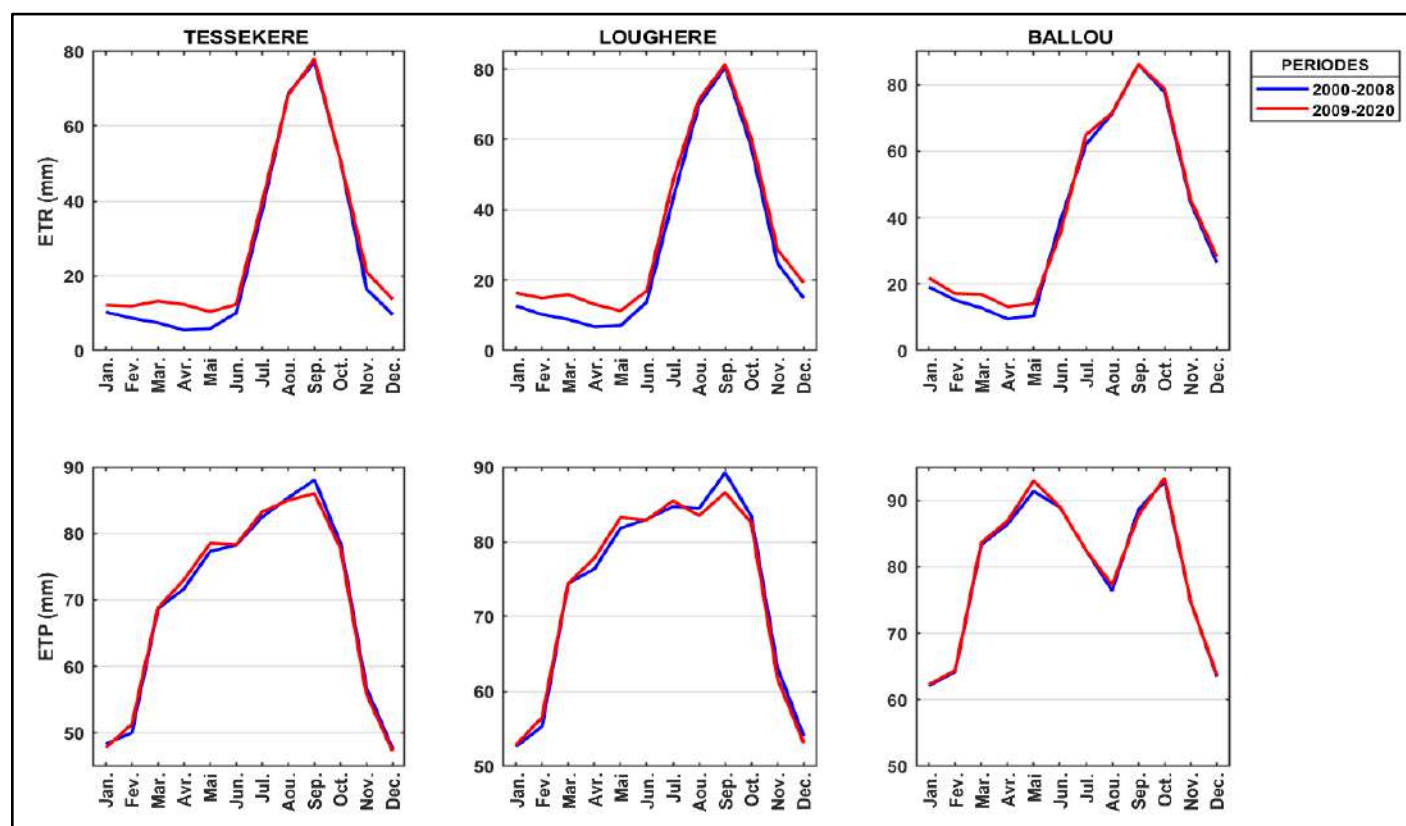


Figure III.21: Cycle saisonnier de l'évapotranspiration réelle et évapotranspiration potentielle des localités de Tèssékéré, Syer (Louga), Loughéré-Thioly (Matam), Ballou (Tambacounda) GMV-Sénégal pour les périodes 2000-2008 et 2009-2020.

III.1.5.4. Evolution de la relation dynamique de la végétation et paramètres climatiques dans la GMV-Sénégal

Pour apprécier le lien entre la végétation et les différents paramètres climatiques, les coefficients de corrélation entre les indices de végétation et les paramètres climatiques sont calculés et présentés sur les figures III.22 et tableaux III.13 ci-dessous.

La figure III.22 représente les corrélations spatiales interannuelles entre l'indice de végétation NDVI et les précipitations pour les périodes 2000-2008, 2009-2020 et 2000-2020 au Sénégal et un zoom sur les sites de Syer, Téssékéré et Loughéré-Thioly (GMV-Sénégal). En ce qui concerne la relation interannuelle entre les précipitations et le NDVI, les corrélations inférieures à zéro ont été masquées. Ainsi, au cours de la période 2000-2008, les corrélations entre l'indice de végétation et la pluviométrie sont quasi inférieures à 0,40 et non significatives sur la majorité des régions du Sénégal. Néanmoins, des corrélations de 0,60 sont observées sur de petites régions (extrême nord-ouest 16°N et à 14°N). Les localités de Syer, Téssékéré et Loughéré-Thioly ont tous des corrélations inférieures à 0,4 et sont non significatives. Pendant la période de reboisement (2009-2020), les régions à fortes corrélations et significatives ont vu leurs superficies s'accroître (en 14°N et 17°N de Latitude et 16°W et 12°W de Longitude). Les plus fortes valeurs de corrélations ($\geq 0,60$) sont repérées au SW de la commune de Syer, au N et SE de Téssékéré, NW, W et E de la commune de Loughéré-Thioly. Le calcul des corrélations spatiales sur la période 2000-2020 met en évidence des corrélations significatives (entre 0,40 et 0,50) dans le nord-ouest et sur le tracé de GMV (16°N-17°N et à 14°N).

Le tableau III.13 présente les corrélations interannuelles de l'indice NDVI et les éléments climatiques (Précipitations, d'humidité du sol, ETR et ETP) pour les localités de Syer, Téssékéré (Louga), Loughéré-Thioly (Matam) et Ballou (Tambacounda) GMV-Sénégal. La relation interannuelle du NDVI et les précipitations connaît une amélioration de la période 2000-2008 à la période 2009-2020. Dans la commune de Syer (Louga), cette corrélation qui était de 0,29 en 2000-2008 passe à 0,75 en 2009-2020 avec un seuil significatif de 0,01. Cette observation est identique dans les localités de Téssékéré (0,54 en 2000-2008 à 0,72 en 2009-2020 au seuil $\alpha=0,01$), Loughéré-Thioly (de 0,28 en 2000-2008 à 0,71 en 2009-2020 au seuil de $\alpha=0,05$) et Ballou (de 0,06 en 2000-2008 à 0,72 en 2009-2020).

Au cours de la période allant de 2000 à 2020, le calcul du coefficient de corrélation entre le NDVI et l'humidité du sol est supérieur à 0,40 sur l'ensemble des sites d'étude. En effet, cette relation connaît une amélioration entre les sous-périodes 2000-2020 à 2009-2020. Dans la commune de Syer, la corrélation passe de -0,07 en 2000-2008 à 0,78 en 2009-2020 au seuil de

$\alpha=0,05$. A Tèssékéré, ce lien va de 0,35 en 2000-2020 à 0,69 en 2009-2020 (avec un seuil $\alpha=0,05$). Et, à Loughéré-Thioly, la corrélation passe de 0,76 à 0,85 entre les périodes 2000-2008 à 2009-2020 (seuil $\alpha=0,01$). Par contre dans la localité de Ballou, le lien entre l'indice NDVI et humidité du sol régresse. Cette relation passe de 0,55 en 2000-2008 à 0,46 en 2009-2020.

Le calcul de corrélation entre l'indice de végétation et l'évapotranspiration réelle sur la période 2000 à 2020, nous indique que le NDVI et l'ETR sont positivement corrélés. Et ces coefficients évoluent entre 0,30 à 0,73. Durant la période 2000 à 2008, cette relation est dans la plage de valeur -0,25 (à Syer) à 0,63. Au cours de la deuxième période 2009-2020, le lien entre le NDVI et l'ETR progresse dans l'ensemble (0,36 à 0,73). Dans la commune de Syer par exemple, le lien entre NDVI-ETR devient très significatif et passe de -0,25 (en 2000-2008) à 0,65 (pour la période 2009-2020). Cependant à Ballou, cette relation régresse de 0,53 (2000-2008) à 0,36 (en 2009-2020).

La relation entre l'indice NDVI et l'évapotranspiration potentielle est tantôt positive ou négative selon les sites d'étude et les périodes considérées. A Syer, le lien NDVI-ETP est corrélé négativement et significative (-0,73) au cours de la période 2000 à 2008 pour devenir positive et non significative (0,17). Pour Ballou, c'est une situation contraire qui est observée. Nous passons d'une corrélation de 0,36 entre 2000-2008 à -0,62 et significative pour la période 2009-2020.

Tableau III.13: *Corrélations interannuelles entre l'indice NDVI et les Précipitations, Humidité du sol, l'évapotranspiration des localités GMV-Sénégal pour les périodes 2000-2020 ; 2000-2008 et 2009-2020 (avec les seuils $\alpha=0,05(*)$ et $\alpha=0,01(**)$).*

SITE GMV-Sénégal	Indice de végétation	Paramètres climatique	Périodes		
			2000-2020	2000-2008	2009-2020
TESSEKERE (LOUGA)	NDVI	PLUIE	0,62**	0,54	0,72**
		Humidité SOL	0,47*	0,35	0,69*
		ETR	0,59**	0,56*	0,63*
		ETP	-0,03	-0,19	0,17
SYER (LOUGA)	NDVI	PLUIE	0,56**	0,29	0,75**
		Humidité SOL	0,41	-0,07	0,78**
		ETR	0,30	-0,25	0,65**
		ETP	-0,36	-0,73	0,17
LOUGHERE-THIOLY(MATAM)	NDVI	PLUIE	0,56**	0,28	0,71*
		Humidité SOL	0,75**	0,76*	0,85**
		ETR	0,73**	0,63*	0,76*
		ETP	0,10	0,13	0,16
BALLOU (TAMBACOUNDA)	NDVI	PLUIE	0,38	0,06	0,72**
		Humidité SOL	0,50*	0,55	0,46
		ETR	0,45*	0,53	0,36
		ETP	-0,06	0,36	-0,62*

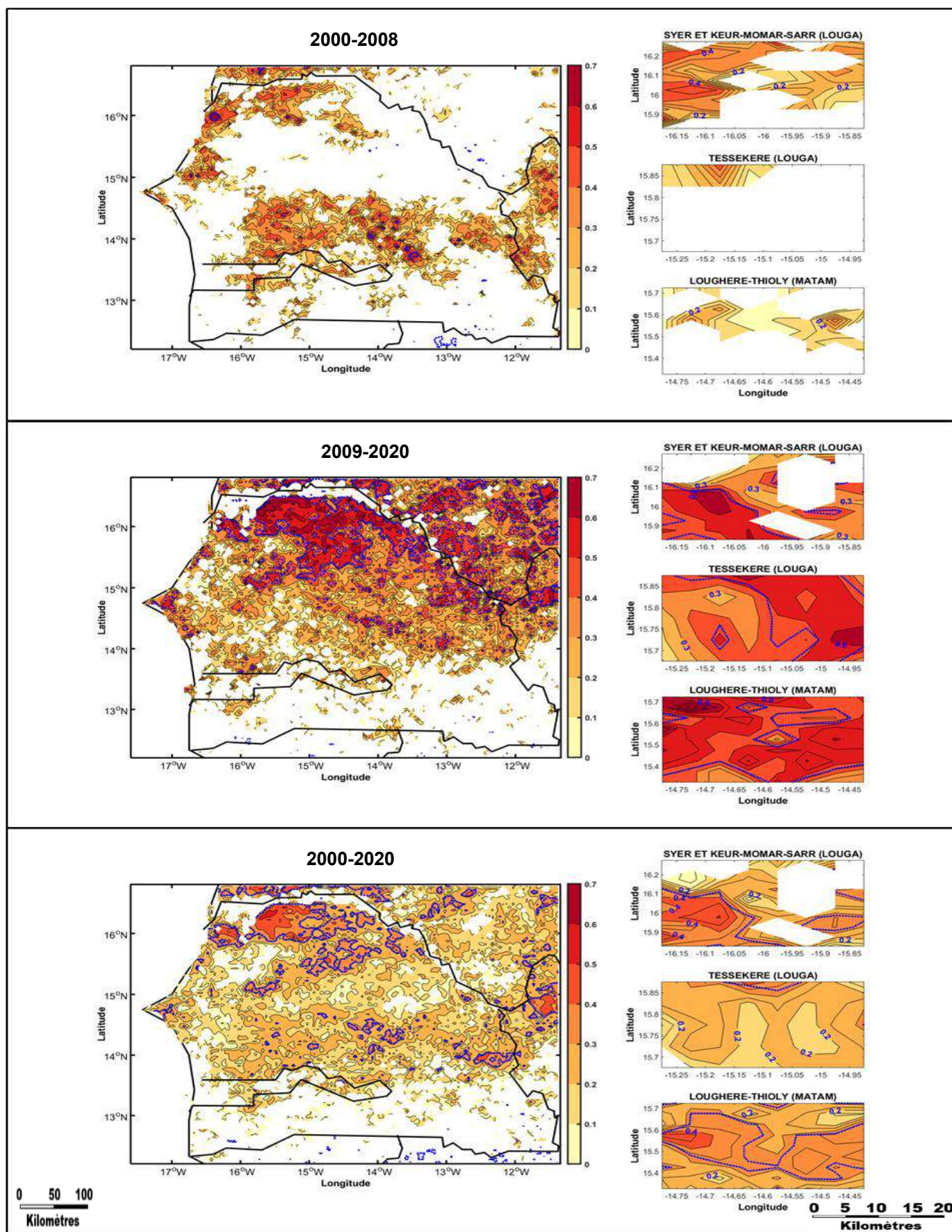


Figure III.22: Corrélations spatiales entre l'indice NDVI et les précipitations pour les périodes 2000-2008 ; 2009-2020 et 2000-2020 sur le Sénégal et les localités de Syer, Tèssékéré (Louga) et Loughéré-Thioly (Matam), les pointillés bleus indiquent les zones significatives à $p=0,05$.

III.1.6. Discussion

Les résultats de la variabilité de l'indice de végétation NDVI, des précipitations et l'étude de ruptures pendant 4 décennies, mettent en évidence une dynamique négative avec stress du couvert végétal entre 1981 et la fin de la décennie 1990 et une autre période plus humide à partir de la décennie 2000. En effet, les différentes méthodes utilisées pour la recherche de ruptures convergent pratiquement vers l'identification de mêmes périodes dans l'évolution de la pluviométrie et de l'état du couvert végétal. Les ruptures significatives détectées par le test bayésien BEAST et le test de Pettitt sont similaires à celles trouvées lors de l'analyse d'anomalies standardisées d'indice NDVI et de précipitations. Ces résultats sont en accord avec l'analyse du SPI sahélien réalisés sur les données de 600 stations de suivies du Centre Régional AGRHYMET. [Traoré et al. \(2014\)](#) mentionnent deux périodes distinctes lors de cette analyse : la première période de 1950–1969 a été caractérisée par une persistance d'années humides et la seconde période de 1970 à 1993, par une persistance de plus d'une vingtaine d'années sèches.

Au nord du Sénégal, la période allant de 1981 au début des années 2000, a été marquée par des épisodes de sécheresse des années 1970, 1980 et 1990 sur le Sahel ([Luxereau, 1997](#) ; [Ali, 2009](#) ; [Lebel, 2009](#) ; [Sarr, 2009](#) ; [Ozer et al., 2010](#) ; [Bakhoun, 2013](#) ; [Descroix et al., 2015, 2018](#) ; [Aman et al., 2019](#)). La surexploitation des terres combinée avec le manque de précipitations ont occasionné une réduction des superficies de forêts et savanes arborées aux cours des décennies 80, 90 et le début des années 2000. Le déficit pluviométrique des sites que nous avons étudié se chiffre entre 11 et 20% de la normale 1991-2020. Sur le sahel, cette baisse des pluies représente entre 15 à 25% par rapport à la moyenne 1900-2015 et de 25 à 50% par rapport à la période humide 1950–1967 ([Descroix et al., 2018](#)). La perte de l'activité de la végétation est quant à elle de 4 à 8,5%.

D'après l'étude menée par [Marega et al. \(2021\)](#) dans le Ferlo (Téssékéré) entre 1973 et 1999, la végétation spontanée a subi une forte régression. [Sylla et al. \(2019\)](#) montrent que les pertes de superficies dans les aires protégées du Ferlo sont faibles pour les steppes et élevées pour les savanes boisées et arborées. Et, cette dégradation du couvert végétal (extension des steppes au profit de la savane) s'explique par la pression démographique (sédentarisation de la population agro-pasteurs, croissance très forte de la population et du cheptel) et le manque des précipitations ([Sarr, 2009](#) ; [Ozer et al., 2010](#) ; [Bodian, 2011](#) ; [Bakhoun, 2013](#) ; [Dendoncker et al., 2015](#) ; [Descroix et al., 2015, 2018](#)).

Cette faible activité de la végétation et le manque de précipitation a réduit la capacité des sols et du couvert végétal à humidifier les différents sites par évapotranspiration. En effet,

l'évapotranspiration réelle est influencée par les conditions climatiques, mais aussi par la disponibilité en eau du sol, qui peut être limitante en fonction de facteurs tels que la pluviométrie, l'humidité du sol et la couverture végétale. Ces résultats sont en phase avec ceux de différents auteurs (Lu *et al.*, 2016, Ndiaye *et al.*, 2022), qui ont noté une baisse de l'évaporation à partir des années 1990. Les tests de Pettitt et le test bayésien BEAST mettent globalement en évidence une baisse significative de l'évapotranspiration et des tendances variées avec des pentes négatives au cours de cette période. Ces résultats confirment l'hypothèse de la baisse de l'évaporation notée après les sécheresses des années 1970 (Zeng *et al.*, 2019 ; Chapman *et al.*, 2021 ; Ndiaye *et al.*, 2022).

L'évapotranspiration potentielle qui représente la quantité maximale d'eau qui pourrait s'évaporer et être transpirée dans des conditions idéales est à la hausse. Ce paramètre d'évapotranspiration potentielle dépend principalement des conditions climatiques telles que la température, l'humidité de l'air, la radiation solaire et la vitesse du vent. Plus l'air est sec, plus le potentiel d'évaporation augmente dans l'atmosphère. En outre, les résultats obtenus corroborent ceux de Fu *et al.* (2009), qui ont noté qu'une baisse de l'évaporation n'était pas forcément accompagnée par une baisse de l'évapotranspiration de référence. Et, l'étude de Ndiaye *et al.* (2020) au Sénégal montre une forte corrélation négative entre l'évapotranspiration potentielle et l'humidité relative. La baisse de cette dernière entraîne donc une hausse de l'évaporation et de l'évapotranspiration de référence (Ndiaye *et al.*, 2020).

Entre 2000 et 2020, la dynamique de la végétation est positive. Le reverdissement de ces localités est observé une à deux années après la reprise des précipitations (début de la période humide 1997/1998). L'activité végétative connaît une hausse moyenne annuelle de 1,5 à 3%. En effet, Le reverdissement de ces régions s'explique dans un premier temps, par la hausse de la pluviométrie (+3 à 7% de la normale 1991–2020) après la période sèche des années 1980 et 1990. Et aussi par les actions de gestions durables des ressources naturelles qui ont été mises en œuvre dans ces régions. Parmi ces actions, nous pouvons citer les actions de reboisement de l'Initiative de la Grande Muraille Verte, le Programme d'Appui au Développement Agricole et à l'Entreprenariat Rural (PADAER 2011) et d'autres campagnes (Ruster, 2009 ; Sylla *et al.*, 2019, 2020 ; Brandt *et al.*, 2018, 2020 ; Descroix *et al.*, 2018, 2021). Ainsi, pour Sylla *et al.* (2019 et 2020) la progression du couvert végétal dans la commune de Téssékéré était due à la conversion de 4000ha de zones nues sous l'action du projet Modèle d'Aménagement Sylvopastoral des terres (Sénégal-Allemand GTZ) implanté depuis 1986. Cette mise en œuvre de ce projet pourrait expliquer la rupture à pente positive des série NDVI que nous avons détecté dans les localités Syer, Téssékéré de 1989 et Loughéré-Thioly de 1987. Et, la progression des zones de culture est

liée à la plantation d'arbres de l'initiative Grande Muraille Verte à partir de 2007 dans la commune de Tébékéré.

Les résultats de l'analyse comparée de la dynamique récente sur la période humide 2000–2020 (humide par rapport à la normale 1991–2020) du couvert végétal et des conditions climatiques, au sein des sites reboisés de la GMV-Sénégal, montrent une hausse de l'activité de la végétation (NDVI et VHI), une hausse des précipitations, de l'humidité des sols et de l'évapotranspiration réelle des période 2000–2008 à 2009–2020. Les résultats ont aussi révélé l'amélioration du lien entre l'indice de végétation NDVI et les différents paramètres climatiques.

En effet, ce chapitre montre l'impact du reboisement (débuté en 2005 dans certaines localités de la GMV-Sénégal), sur la hausse de l'indice NDVI de 4 à 8% et de 4 à 10% pour l'indice de santé de végétation (VHI) à l'échelle interannuelle. Ces résultats corroborent ceux de [Wu et al. \(2020\)](#) qui affirment que le taux de contribution des activités humaines à la hausse de la végétation, dans la zone de transition Désert/Prairie sur la période 1982–2015, était de 97,7% et les facteurs climatiques (température et précipitations) contribuaient à hauteur de 47,5%. Pour [Descroix et al. \(2018, 2021\)](#), le reverdissement du sahel est aussi à mettre au compte des populations locales qui plantent et entretiennent ces arbres.

La hausse de l'évapotranspiration réelle dans les localités de Syer, Tébékéré et Loughéré-Thioly témoigne des conditions climatiques plus favorables et un couvert végétal plus développé après reboisement. Nous notons un regain de la pluie de 2 à 8% et des sols plus humides de plus de 25%. L'amélioration de ces paramètres climatiques ont engendré une amélioration de la relation NDVI-ETR au cours de la période 2009-2020. Pour [Ndiaye et al. \(2020 ; 2022\)](#), la hausse de l'évapotranspiration réelle serait due à une augmentation significative de l'humidité relative. Et, la baisse de l'évapotranspiration potentielle au cours de la période reboisée (2009–2020) confirme l'analyse faite plus haut (augmentation de l'humidité atmosphérique, conditions climatiques plus favorables). Cependant dans la localité de Ballou, l'évapotranspiration potentielle est à la hausse sur la période 2009–2020. Cette évolution traduit la dégradation du couvert végétal qui peut être observé à travers l'indice de végétation et l'humidité du sol. Ce constat rejoint ceux de [Chapman et al. \(2021\)](#) et [Ren et al. \(2021\)](#) qui ont noté que la baisse significative de l'évapotranspiration réelle peut être liée à l'environnement (aménagements, urbanisation, etc.). Ainsi, [Ren et al. \(2021\)](#) ont étudié l'impact de l'urbanisation sur la tendance de l'évaporation dans les grands bassins fluviaux de la Chine continentale sur la période 1961-2017. Leurs résultats ont montré que l'urbanisation contribue à 76 % à la baisse de l'évapotranspiration réelle aux échelles annuelle et saisonnière.

Les résultats des corrélations entre les périodes 2000–2008 et 2009–2020, montrent l'amélioration du lien entre la végétation et les précipitations. Ces résultats rejoignent ceux de [Bamba *et al.* \(2015\)](#) et [Wu *et al.* \(2020\)](#). L'étude menée par [Bamba *et al.* \(2015\)](#) avait montré qu'au cours la décennie 80, la corrélation NDVI et pluie était supérieure à 0,6 au Sénégal, Guinée et au sud du Mali. Il a observé par la suite une baisse de cette valeur aux cours des décennies 90 et 2000. Pour [Wu *et al.* \(2020\)](#), le coefficient de corrélation NDVI et précipitations, dans la zone de transition Désert/Prairie, variait de -0,55 à 0,83 avec un coefficient de corrélation de 0,24 sur la période d'étude 1982–2015. Les zones dans lesquelles le NDVI était positivement corrélé avec les précipitations représentaient 86,7% de la superficie totale de la zone de transition Désert/Prairie.

Les résultats de la dynamique positive de l'humidité du sol et du couvert végétal, confirment l'apport du reboisement sur l'infiltration des eaux sur les sites de la GMV-Sénégal. L'humidité du sol a enregistré une forte évolution de l'ordre de 22 à 50% de la moyenne de la période 2000–2020. Ce qui atteste de la capacité de ces sols à stocker plus de quantité d'eau ([Roose, 1983](#); [Giordano, 1994](#); [Hansson, 2006](#) ; [Jerome *et al.*, 2022](#)). Ainsi, les résultats de [Giordano \(1994\)](#) explique qu'un sol couvert d'arbres favorise l'infiltration de l'eau dans le sol plus qu'une autre occupation du sol. Pour [Roose \(1983\)](#), un sol à couvert forestier permet d'infiltrer la quasi-totalité des précipitations annuelles contre 2% de ruissellement. Dans l'ouest du Burkina, les travaux de [Hansson \(2006\)](#) montrent une très grande capacité d'infiltration de l'eau sous et entre les arbres.

La relation NDVI et humidité du sol, de la période 2000–2008 à 2009–2020, a enregistré une progression remarquable et significative de l'échelle interannuelle. Le reboisement a contribué à une disponibilité de l'eau dans les couches superficielles et la zone racinaire (nécessaire pour la croissance des plantes). L'étude menée par [Alo *et al.* \(2022\)](#), dans le sud-ouest du Nigeria, a révélé des relations étroites entre le volume des arbres et les indices d'humidité du sol (avec des coefficients de corrélation de 0,75 à 0,91). Cette étude suggère que le volume des arbres peut être prédit sur la base de la teneur en eau du sol. Et toute anomalie négative dans la teneur en eau du sol pourrait entraîner une régression de la végétation. La baisse de la relation NDVI et humidité du sol dans la localité de Ballou (Tambacounda) de 2000–2008 à 2009–2020 pourrait s'expliquer par l'absence de campagnes de reboisement et une forte urbanisation dans cette région. En effet, [Cissé *et al.* \(2016\)](#) avaient montré dans la région de Ferlo (Sénégal) que la variation de l'humidité du sol était plus corrélée et significative que la variation des précipitations sur la végétation en utilisant l'indice LAI (Leaf Area Index, ou indice foliaire) sur la période 2000–2010. Autrement dit, l'humidité du sol (SM) apparaît comme un meilleur indicateur pour détecter les anomalies

impactant le LAI. Ainsi pour [Nicholson *et al.* \(1990\)](#), la verdeur de la végétation dans les régions semi-arides est fortement liée à l'humidité du sol.

III.1.7. Synthèse

Ce premier point du chapitre trois, qui a pour objectif d'évaluer la dynamique du couvert végétal au sein de la Grande Muraille Verte du Sénégal au cours des quatre dernières décennies, a permis d'analyser l'évolution du couvert végétal et des paramètres climatiques sur la même période. Cette période révèle deux phases distinctes : une dégradation du couvert végétal jusqu'à la fin des années 1990, suivie d'un reverdissement à partir des années 2000, grâce à une augmentation des précipitations et aux efforts de reboisement et de restauration des sols.

Ensuite, l'analyse comparée du reboisement sur les paramètres climatiques a été explorée dans un premier temps par l'analyse spatio-temporelle de l'indice de végétation sur les périodes 2000–2008 (non reboisée) et 2009–2020 (reboisée). Après reboisement, l'activité de végétation montre une augmentation significative tant à l'échelle interannuelle (+2 à +8%) que saisonnière (+1 à +7%). L'on peut aussi noter des hausses significatives des précipitations (+2 à +8 %), de l'humidité du sol (+25 à +54 %) et de l'évapotranspiration réelle (+2 à +12%). Ces conditions climatiques favorables observées après reboisement, ont renforcé la corrélation entre le NDVI et les paramètres climatiques dans les zones reboisées. En revanche, dans les zones non reboisées, cette corrélation diminue, soulignant l'importance des actions de reboisement pour la résilience écologique.

Après avoir analysé la dynamique du couvert végétal et son évolution en lien avec les paramètres climatiques entre 1982 et 2020, il est essentiel de se pencher sur un autre aspect crucial pour la gestion des ressources naturelles : la dynamique de l'occupation du sol. En effet, si l'analyse du couvert végétal (NDVI, VHI) a permis de mettre en lumière les tendances de dégradation, de reverdissement et leur corrélation avec les conditions climatiques, il est tout aussi important de comprendre comment les sols sont utilisés et comment ces usages évoluent dans le temps. Cette analyse est d'autant plus pertinente dans le contexte de la Grande Muraille Verte (GMV) du Sénégal, où les actions de reboisement et de restauration des sols ont un impact direct sur l'occupation des terres.

III.2. Dynamique de l'occupation du sol dans la zone de la grande muraille du Sénégal de 1992 à 2020

La dynamique du couvert végétal constitue une importance capitale pour une meilleure gestion des ressources naturelles, économiques et environnementales. En Afrique de l'Ouest, particulièrement au Sénégal, ce suivi s'inscrit dans un contexte général de variabilité climatique. Au sahel, l'analyse d'images satellitaires à haute résolution spatiale et temporelle a révélé plusieurs dynamiques environnementales, telles que la déforestation, la dégradation des terres, le reverdissement et l'impact des activités humaines sur les écosystèmes. Cependant, quinze ans après le lancement du programme Panafricain de la Grande Muraille Verte (GMV), peu de recherches ont évalué l'évolution de l'occupation des sols et du stock de carbone organique dans les zones concernées (Figures III.23 à III.25).

Cette deuxième partie du chapitre III se propose d'analyser l'évolution de l'occupation du sol dans les communes de Syer, Téssékéré (région de Louga), Loughéré-Thioly (Region de Matam) et Ballou (Région Tambacounda) qui se trouvent sur la trace de la Grande Muraille Verte (GMV) du Sénégal durant les trois dernières décennies, à travers l'utilisation de séries spatiotemporelles de données d'occupation du sol ESACCI-LC allant de 1992 à 2020. Les objectifs spécifiques sont premièrement (i) d'inventorier les classes d'occupation du sol de la couverture végétale entre 1992–2020 et (ii) les changements intervenus de ces classes durant les trois décennies.

La cartographie de l'occupation du sol et des changements intervenus dans le couvert végétal est importante pour une analyse rétrospective des dynamiques spatiotemporelles. Les résultats de l'occupation du sol seront utilisés comme information essentielle à l'estimation de la séquestration du carbone des localités de la Grande Muraille Verte Sénégalaise (voir chapitre IV.1).



Figure III.23: Pépinière de la Grande Muraille Verte du site de Syer (Louga) Sénégal (source : <https://www.fondationcoeurvert.org/reforestation>).



Figure III.24 : Vue aérienne des activités de plantation à Loughéré-Thioly (Matam) Grande Muraille Verte Sénégal (source : <https://www.fondationcoeurvert.org/reforestation>).



Figure III.25: Vue aérienne de parcelle reboisée à Tèssékéré (Louga) Grande Muraille Verte Sénégal (source : <https://www.fondationcoeurvert.org/reforestation>).

III.2.1. Analyse de l'évolution de l'occupation du sol au sein de la GMV du Sénégal de 1992 à 2020.

Les différents traitements effectués sur les cartes d'occupation du sol LC ESA-CCI ont permis de cartographier l'état d'occupation et d'usage des sols des localités de Syer, Tèssékéré, Loughéré-Thioly et Ballou aux dates retenues.

III.2.1.1. Commune de Syer (Louga)

La réalisation et l'analyse des cartographies de l'occupation du sol entre 1992 et 2020 de la commune de Syer (Figure III.26 ; Tableau III.14 et Tableau III.18) montrent 14 classes d'occupation du sol. L'analyse des figures III.26, III.27 et le tableau III.14 permettent d'illustrer l'évolution de ces différentes classes en 1992 et 2020. Cette dynamique se présente comme suit : une augmentation des superficies des classes Culture pluviale +0,95% ; Culture irriguée +0,68% ; Mosaïque agriculture +1,55% ; Savane arborée à arbustive +8,25 ; Couvert forestier inondé d'eau saline +0,38%.

Ensuite, une régression des superficies des classes Savane arbustive à herbacées -0,04% ; Steppe arbustive -0,17% ; Steppe/Prairies -9,8% ; Végétation clairsemée -0,6% ; Zones nues -0,46% ; Végétation naturelle mosaïque -0,28%, Plan d'eau -0,06%. Et, les superficies de

classes Couvert forestier inondé d'eau douce et d'arbustes ou de couverture herbacée inondée restent inchangées de 1992 à 2020. Le Gradient d'évolution de l'occupation du sol est d'axe sud-ouest nord-est de la commune de Syer. Cet axe d'évolution correspond au tracé de la GMV dans cette localité.

Tableau III.14: Evolution des superficies, des taux d'évolution et de changement dans la commune de Syer (Louga).

Syer (Superficie 2000Km²)	Superficie (%)							
Classes d'occupation du sol	1992	2000	2005	2010	2015	2020	Différence 2020-1992 (%)	Différence 2020-2000 (%)
Culture pluviale	4,88	4,96	6,21	6,44	6,37	5,83	0,95	0,86
Culture irriguée	3,02	3,72	4,05	4,06	3,93	3,7	0,68	-0,01
Mosaïque agriculture	9,1	9,34	11,10	11,85	11,95	10,65	1,55	1,31
Végétation naturelle mosaïque	0,86	0,83	0,93	0,95	0,97	0,58	-0,28	-0,25
Savane arborée	43,97	44	44,00	44	45,02	52,22	8,25	8,22
Savane arbustive	0,12	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	-0,04	0
Steppe arbustives	0,72	0,72	0,72	0,72	0,68	0,54	-0,17	-0,17
Steppe/Prairies	22,73	22,01	18,75	17,71	16,89	12,93	-9,8	-9,08
Végétation clairsemée	1,32	1,21	1,18	1,16	1,13	0,72	-0,6	-0,48
Couvert forestier inondé d'eau douce	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0	0
Couvert forestier inondé d'eau saline	0,38	0,48	0,61	0,6	0,62	0,76	0,38	0,27
Arbuste ou couverture herbacée inondée	5,18	5,23	5,26	5,26	5,18	4,78	-0,4	-0,44
Zones nues	1,06	0,85	0,73	0,62	0,61	0,6	-0,46	-0,26
Plan d'Eau	6,5	6,41	6,24	6,38	6,42	6,44	-0,06	0,03

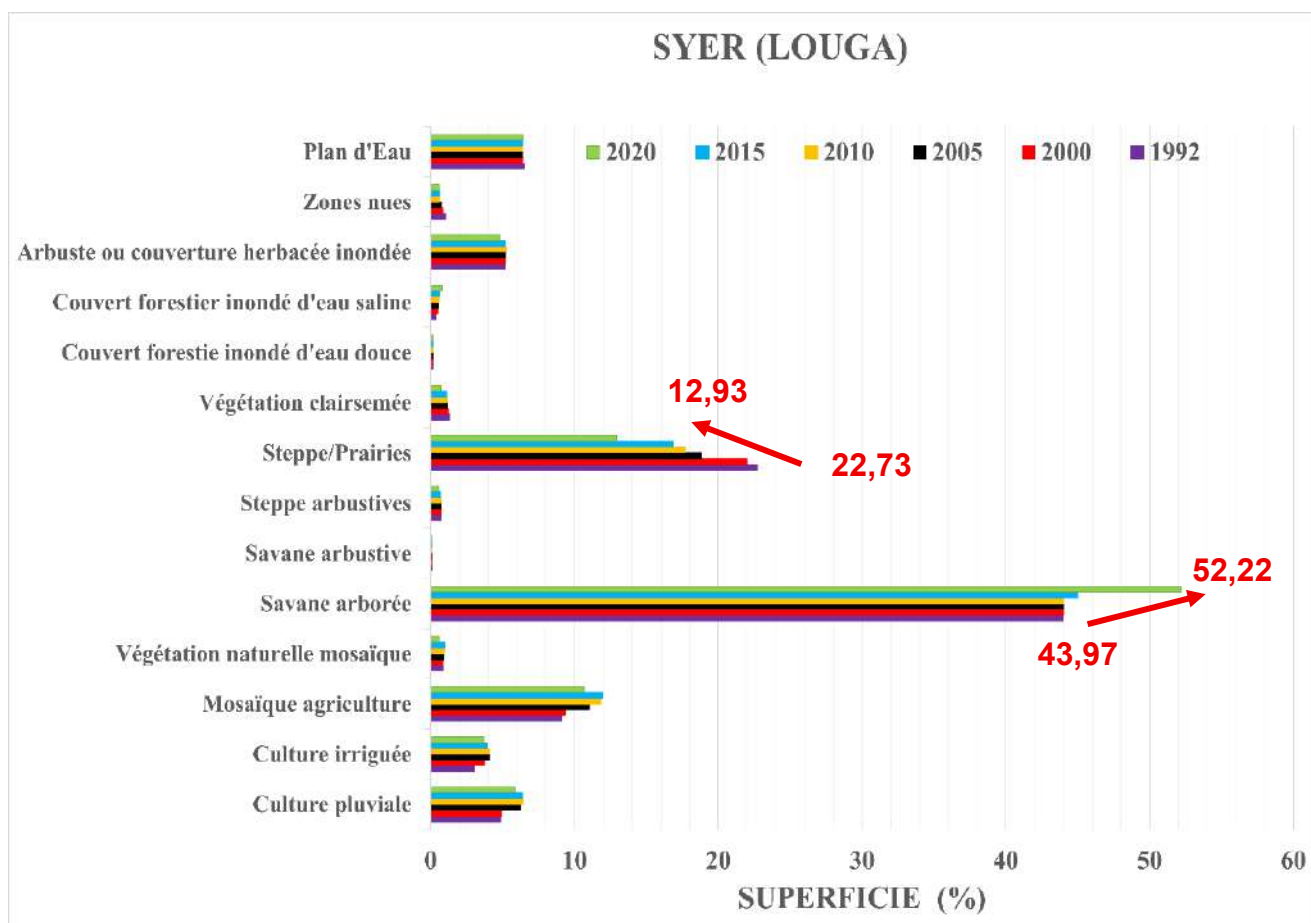


Figure III.26: Evolution des classes d'occupation du sol à Syer (Louga) de 1992 à 2020.

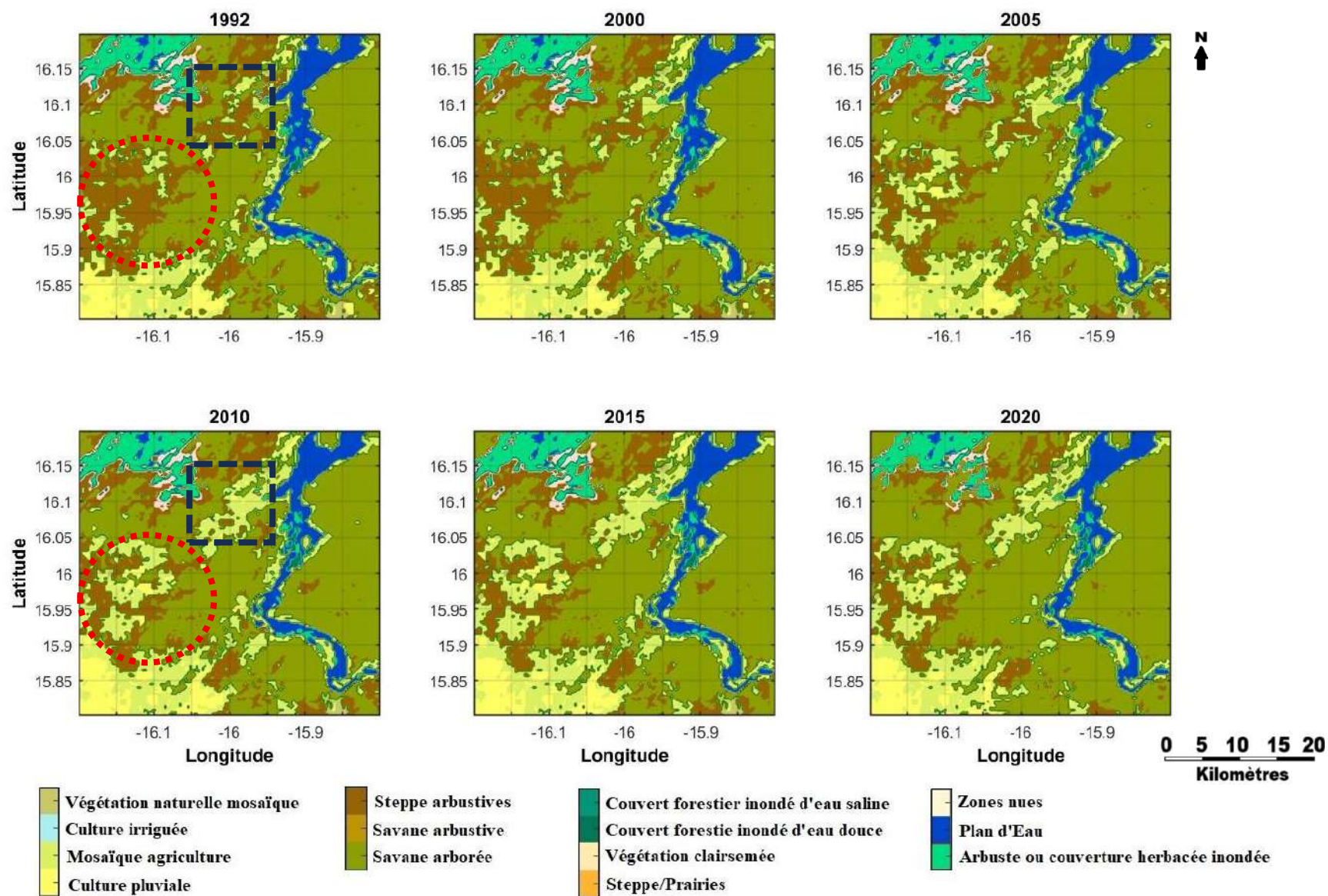


Figure III.27: Evolution de l'Occupation du sol de la commune de Syer de 1992 à 2020.

III.2.1.2. Commune de Téssékéré (Louga)

L'examen des cartographies de l'occupation du sol de la commune de Téssékéré permet de faire ressortir 09 classes d'occupation du sol (Figures III.28 et III.29). Dans cette localité, la classe dominante de 1992 à 2020 est la savane arborée. Les zones de culture sont localisées au sud-ouest de la localité et la steppe au nord-est et sud. Et, l'évolution de chaque classe est illustrée sur la figure III.28 et tableau III.15.

Les classes Steppe/Prairies, Culture pluviale, Mosaïque Agriculture, Végétation nature mosaïque, Steppe arbustive et Sols nus ont connu une régression de leurs superficies entre 1992 et 2020. Les diminutions des superficies des classes de Sols nus, Steppe, Culture pluviale sont respectivement de 95,74% ; 49,62% ; 38,76% ; ce qui correspond à des pertes annuelles respectives de 11,28% ; 2,45% ; 1,75% (Tableau III.15). Par contre, la superficie des Savane arborées et Savanes arbustives à arborées passe de 78,43% en 1992 à 89,82% en 2020 soit une hausse du taux de changement de 14,53%. Ce qui représente un gain annuel de 0,48% de la superficie de la savane. Les autres classes d'occupation du sol restent sans changement.

Tableau III.15: Evolution des superficies, des taux d'évolution et de changement dans la commune de Téssékéré (Louga).

Téssékéré (Superficie 2100Km²)	Superficie (%)							
Classes d'occupation du sol	1992	2000	2005	2010	2015	2020	Différence 2020-1992 (%)	Différence 2020-2000 (%)
Culture pluviale	1,81	1,81	1,81	1,81	1,24	1,11	-0,70	-0,70
Mosaïque agriculture	4,04	4,04	4,04	4,04	3,85	2,86	-1,18	-1,18
Végétation naturelle mosaïque	0,98	0,98	0,98	0,98	0,79	0,70	-0,27	-0,27
Savane arborée	78,43	78,53	78,58	78,63	84,74	89,82	11,40	11,30
Savane arbustive	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
Steppe arbustives	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,63	-0,19	-0,19
Steppe/Prairies	9,18	9,18	9,18	9,18	8,21	4,62	-4,55	-4,55
Végétation clairsemée	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,00	0,00
Zones nues	4,70	4,60	4,55	4,50	0,30	0,20	-4,50	-4,40

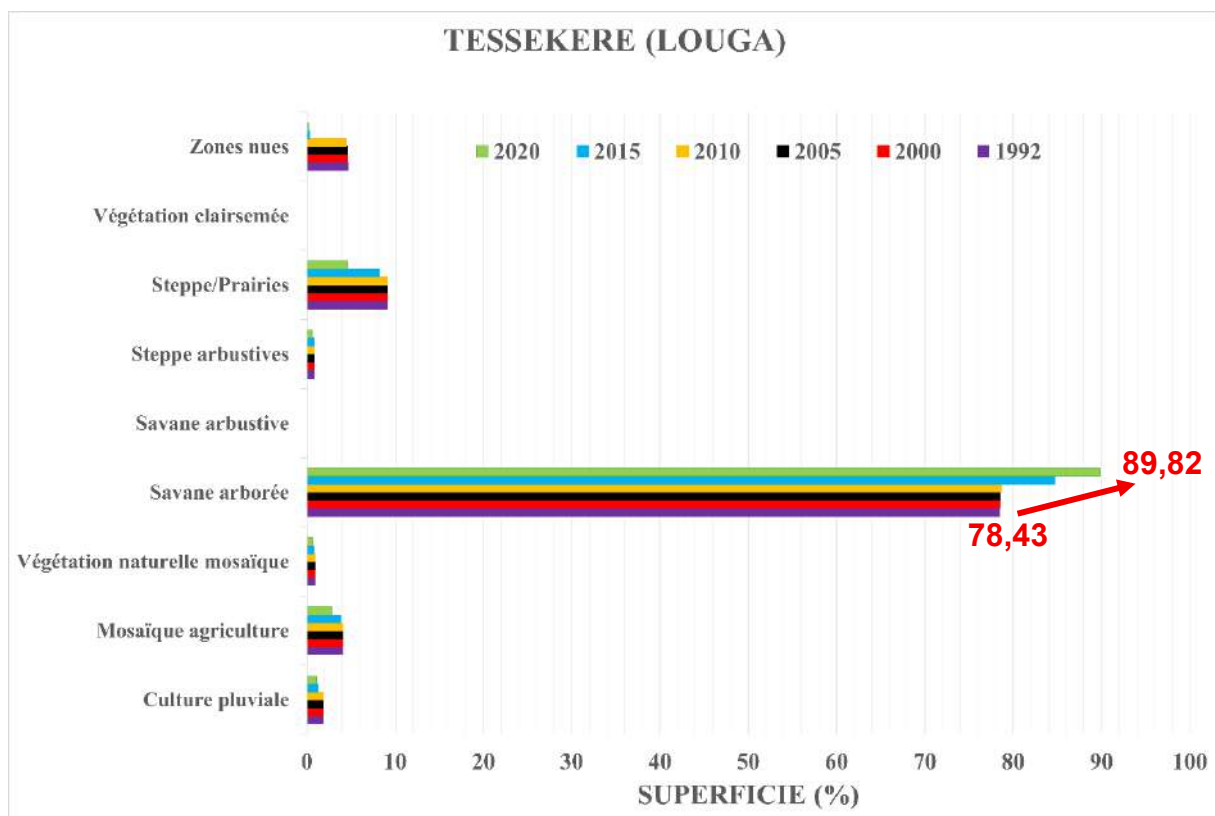


Figure III.28: Evolution des classes d'occupation du sol de Téssekéré (Louga) 1992 à 2020.

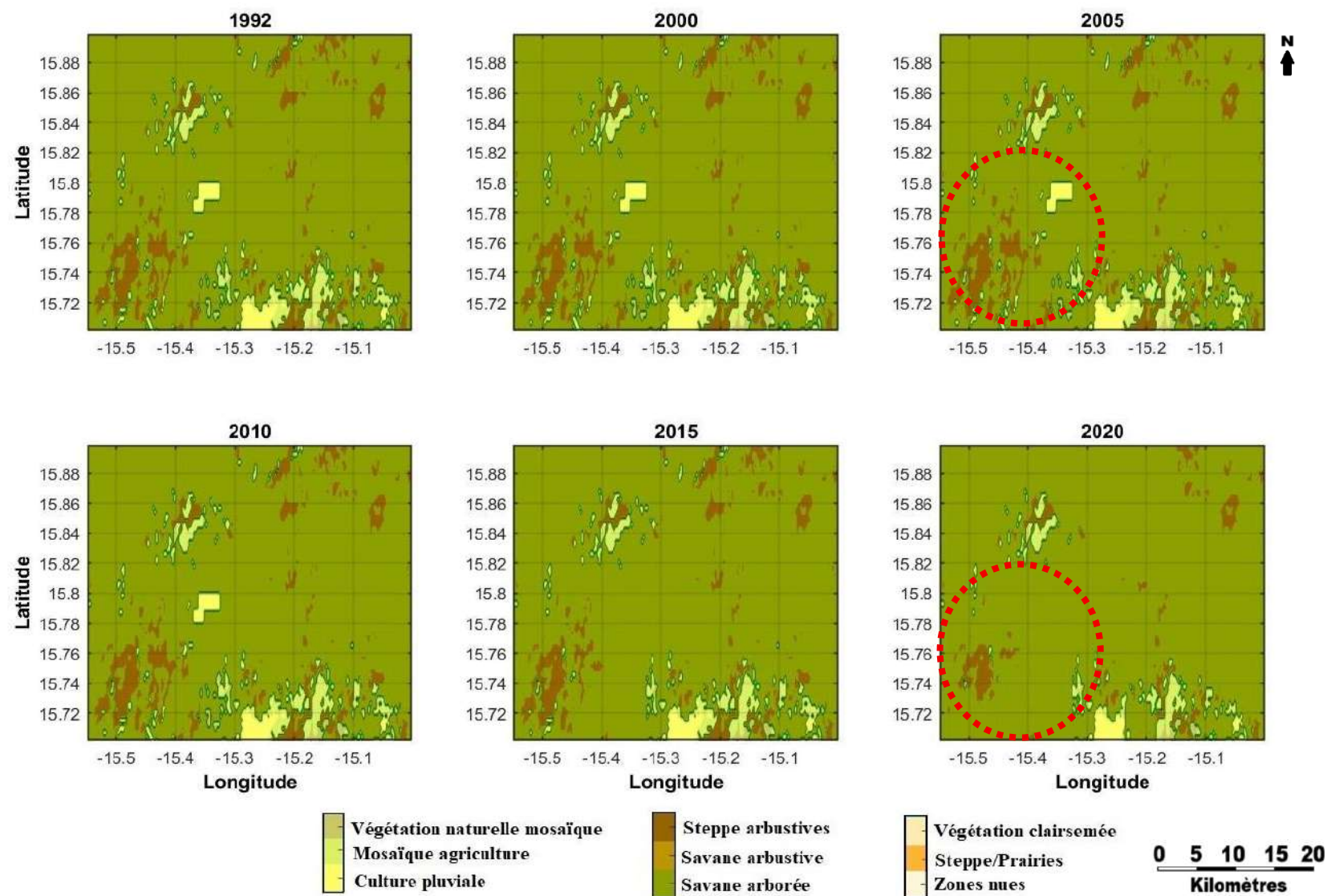


Figure III.29: Evolution de l'Occupation du sol de la commune de Tessékéré de 1992 à 2020.

III.2.1.3. Commune de Loughéré-Thioly (Matam)

La commune de Loughéré-Thioly se subdivise en 7 classes d'occupation du sol (Figures III.30; III.31; Tableaux III.16 et III.18). La dynamique de l'occupation du sol entre 1992 et 2020 se présente comme suit : une augmentation des superficies des classes d'occupation des sols Mosaïque agriculture +1,85% (6,03% en 1992 et 7,88% en 2020), Végétation naturelle mosaïque +1,91% (9,59 % en 1992 et 11,50% en 2020) et Savane arborée +0,76 (28,04% en 1992 et 28,80% en 2020). Les classes qui connaissent une régression de leurs superficies sont : Culture pluviale -0,10% (1,32 % en 1992 et 1,22% en 2020) ; Steppe/Prairies -4,3% (13,30 en 1992% et 9,0% en 2020) ; Steppe arbustive à arbuste -0,12% (41,65% en 1992 et 41,53% en 2020). Par contre, la superficie de la classe Végétation clairsemée est sans changement de 1992 à 2020. La progression des surfaces d'occupation du sol est localisée au nord de la commune.

Tableau III.16: Evolution des superficies, des taux d'évolution et de changement dans la commune de Loughéré-Thioly (Matam).

Loughéré-Thioly (Superficie 1800 Km ²)	Superficie (%)							
	1992	2000	2005	2010	2015	2020	Différence 2020-1992 (%)	Différence 2020-2000 (%)
Culture pluviale	1,32	1,22	1,24	1,24	1,24	1,22	-0,1	0
Mosaïque agriculture	6,03	6,65	7,96	7,97	7,97	7,88	1,85	1,23
Végétation naturelle mosaïque	9,59	9,79	11,71	11,77	11,78	11,5	1,9	1,71
Savane arborée	28,04	28,04	28,04	28,04	28,04	28,8	0,76	0,76
Steppe arbustives	41,65	41,65	41,65	41,65	41,65	41,53	-0,12	-0,12
Steppe/Prairies	13,3	12,58	9,34	9,27	9,26	9	-4,3	-3,58
Végétation clairsemée	0,08	0,08	0,06	0,06	0,06	0,08	0	0

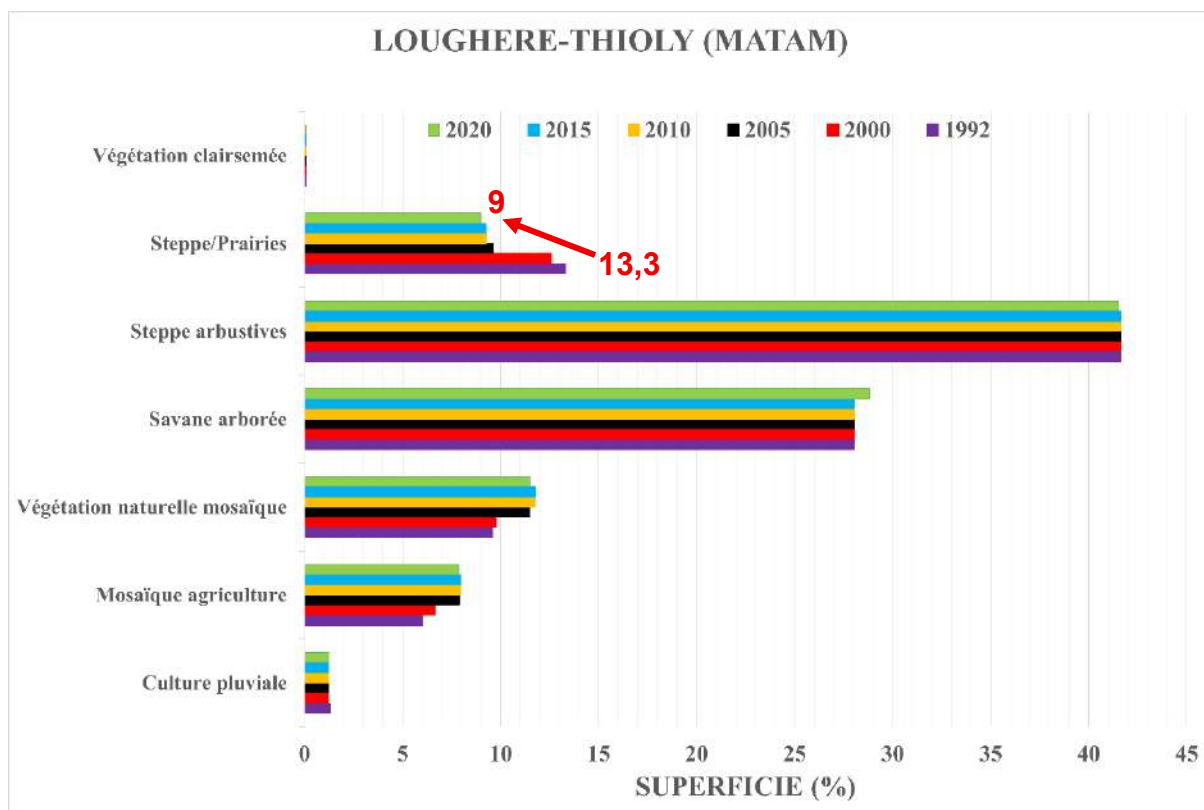


Figure III.30: Evolution des classes d'occupation du sol de Loughéré-Thioly (Matam) 1992 à 2020.

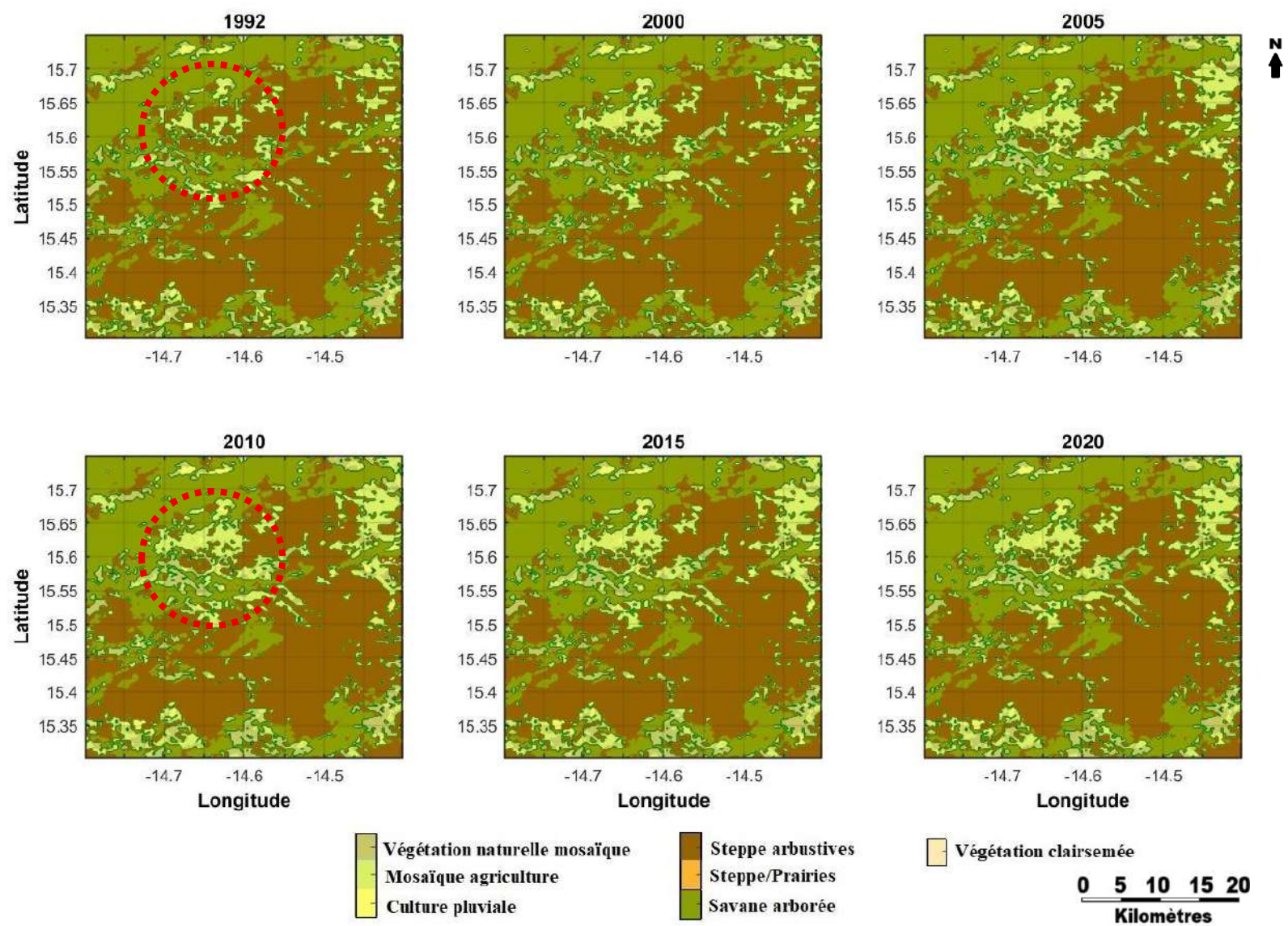


Figure III.31 : Evolution de l'Occupation du sol de la commune de Loughéré-Thioly de 1992 à 2020.

III.2.1.4. Commune de Ballou (Tambacounda)

Le traitement et l'analyse des données d'occupation du sol de la commune de Ballou montrent la présence de 11 classes d'occupation et d'usage des terres (Figures III.32 ; III.33). Les classes dominantes dans la commune de Ballou sont respectivement Culture pluviale (47,33%) et Steppe arbustive (33,66%).

De 1992 à 2020, Les classes Forêt décidue (Forêt claire) et Culture irriguée ont respectivement régressée de 14,73% et 0,68% de leurs superficies, soit des pertes annuelles moyennes de 0,57% et 0,02% (Tableaux III.17 et III .18). Par contre, les classes zone urbaine et savane arbustive ont connu respectivement des extensions spatiales de 125% et de 40,5 %. Ces progressions représentent un gain moyen de 2,9% pour les zone urbaine et 1,21% de superficie par an pour la Savane arbustive. Les superficies des autres classes d'occupation du sol restent stables de 1992 à 2020 (sans changement notable).

Tableau III.17: Evolution des superficies, des taux d'évolution et de changement dans la commune de Ballou (Tambacounda).

Ballou (Superficie 1210 Km²)	Superficie (%)							
	1992	2000	2005	2010	2015	2020	Différence 2020-1992 (%)	Différence 2020-2000 (%)
Classe occupation du sol								
Culture pluviale	47,33	47,33	47,33	47,33	47,33	47,33	0	0
Culture irriguée	5,66	5,65	5,65	5,65	5,64	5,62	-0,04	-0,03
Mosaïque agriculture	5,73	5,73	5,73	5,73	5,73	5,73	0	0
Végétation naturelle mosaïque	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0	0
Forêt décidue	0,17	0,16	0,15	0,15	0,14	0,14	-0,03	-0,01
Savane arbustive	0,06	0,07	0,08	0,08	0,09	0,09	0,03	0,01
Steppe arbustives	33,66	33,66	33,66	33,66	33,66	33,66	0	0
Steppe/Prairies	5,24	5,24	5,24	5,24	5,24	5,24	0	0
Arbuste ou couverture herbacée inondée	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0	0
Zone Urbaine	0,03	0,05	0,05	0,05	0,05	0,07	0,04	0,02
Plan d'Eau	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0	0

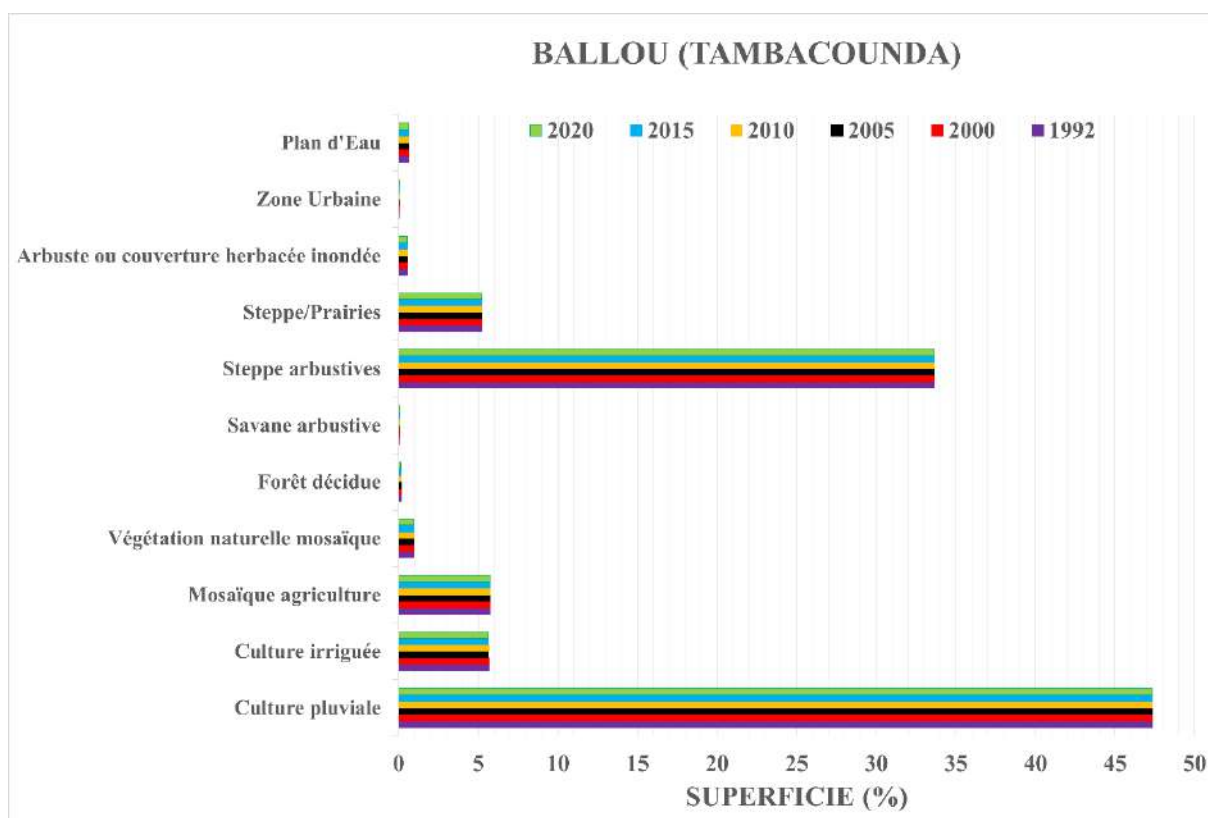


Figure III.32: Evolution des classes d'occupation du sol de Ballou (Tambacounda) de 1992 à 2020.

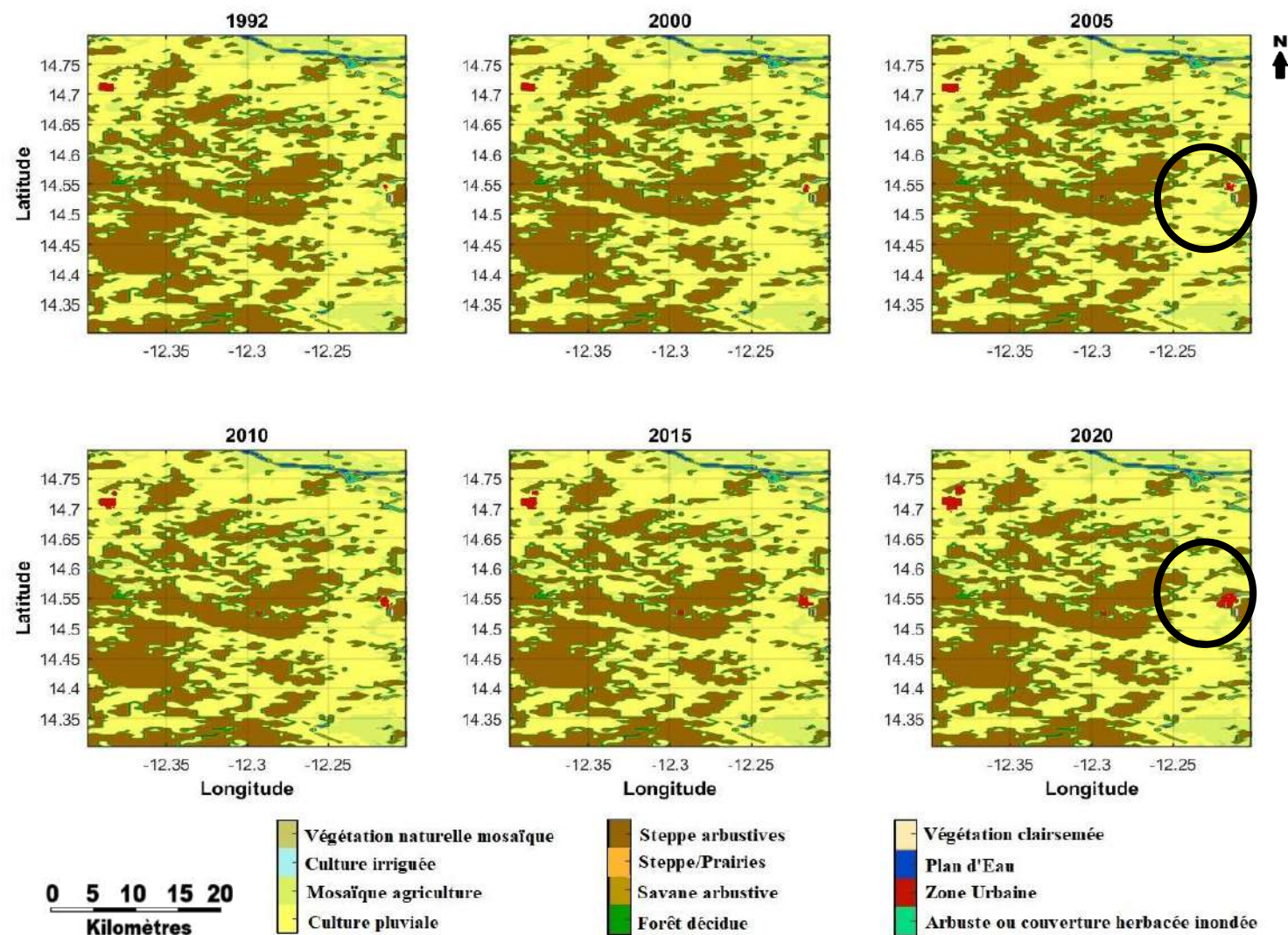


Figure III.33: Evolution de l'occupation du sol de la commune de Ballou de 1992 à 2020.

Tableau III.18: Taux d'évolution et de changement de Syer, Tèssékéré (Louga), Loughéré-Thioly (Matam), Ballou (Tambacounda).

	SYER 1992-2020		TESSEKERE 1992-2020		LOUGHERE 1992-2020		BALLOU 1992-2020	
Classes occupation du sol	Taux d'Évolution (Te) (%)	Taux de Changement (Tc) (%)	Taux d'Évolution (Te) (%)	Taux de Changement (Tc) (%)	Taux d'Évolution (Te) (%)	Taux de Changement (Tc) (%)	Taux d'Évolution (Te) (%)	Taux de Changement (Tc) (%)
Culture pluviale	0,63	19,37	-1,75	-38,76	-0,28	-7,49	0	0
Culture irriguée	0,72	22,49					-0,02	-0,68
Mosaïque agriculture	0,56	17,07	-1,23	-29,17	0,96	30,73	0	0
Végétation naturelle mosaïque	-1,41	-32,58	-1,18	-28,06	0,65	19,84	0	0
Savane arborée	0,61	18,77	0,48	14,53	0,1	2,71		
Savane arbustive	-1,59	-36	0	0			1,21	40,5
Steppe arbustives	-0,99	-24,16	-0,94	-23,08	-0,01	-0,29	0	0
Steppe/Prairies	-2,01	-43,11	-2,45	-49,62	-1,39	-32,32	0	0
Végétation clairsemée	-2,15	-45,26	0	0	0,19	5,56		
Couvert forestier inondé d'eau douce	0	0						
Couvert forestier inondé d'eau saline	2,5	101,28						
Arbuste ou couverture herbacée inondée	-0,29	-7,72					0	0
Zones nues	-2,03	-43,38	-11,28	-95,74				
Plan d'Eau	-0,03	-0,89					0	0
Forêt décidue							-0,57	-14,73
Zone Urbaine							2,9	125

III.2.2. Discussion

III.2.2.1. Dégradation du couvert végétal entre 1992 et 2000

Cette étude a révélé à travers l'analyse de la dynamique de l'occupation du sol que le couvert végétal a connu certaines mutations au nord du Sénégal et principalement au sein de la zone de la Grande Muraille Verte. Les modifications intervenues au cours des trois dernières décennies (de 1992 à 2020) et les différentes tendances observées viennent confirmer les constats de plusieurs études depuis plus de quatre décennies.

Les résultats de l'évolution de l'occupation et de l'usage des sols au cours des 3 dernières décennies, mettent en évidence une dégradation du couvert végétal (dynamique négative du couvert végétal) entre 1992 et le début des années 2000. Les classes de cultures (pluviale, irrigué, mosaïque agricole), forêt décidue/claire, savane arborée et plan d'eau ont régressées.

En effet, cette période (1992-2000) est une conséquence des épisodes de sécheresse des années 1970, 1980 et 1990 sur le Sahel ([Ali, 2009](#) ; [Lebel, 2009](#) ; [Sarr, 2009](#) ; [Ozer *et al.*, 2010](#) ; [Bakhoun, 2013](#) ; [Descroix *et al.*, 2015, 2018](#) ; [Aman *et al.*, 2019](#) ; [Gore *et al.*, 2023](#)). La surexploitation des terres combinée avec l'irrégularité de la pluviométrie ont occasionné une réduction des superficies de cultures, de forêts et savanes arborées aux cours des décennies 80, 90 et le début des années 2000. Le déficit pluviométrique de nos sites d'étude est compris entre 11 et 20% et la baisse de l'activité végétative à travers les indices de végétation est de 4 à 8,5% (voir chapitre 3). Ces résultats corroborent ceux de [CILSS \(2016\)](#), [Sylla *et al.* \(2020 et 2019\)](#), [Marega *et al.* \(2021\)](#), [Tappan *et al.* \(2021\)](#) dans le nord du Sénégal région du Ferlo et généralement sur le Sahel.

Avec 40 ans d'imagerie satellitaire (Landsat), le CILSS (Comité Inter-états de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel, [CILSS, 2016](#)) a montré une surexploitation des terres de 26% entre 1975 et 2013 au Sénégal, y compris dans les zones protégées pour les cultures. Cette expansion a occasionné la fragmentation des savanes et des forêts claires. Les superficies des forêts claires ont diminué de 42%, en raison de l'expansion des terres cultivées et de l'extraction incontrôlée de bois et de charbon de bois, du pâturage de bétail et de fréquents feux de brousse. Au nord et dans les régions agropastorales, plusieurs zones de savanes ont été transformées en zones de steppes suite aux périodes de sécheresse et au surpâturage qui ont conduit à la dégradation du couvert et de la productivité végétale. Suite aux sécheresses extrêmes et de perte du couvert végétal, des zones de savanes et de steppes sont devenues improductives à cause des

phénomènes d'érosion pendant la saison pluvieuse (JAS). Dans la zone pastorale ferrugineuse, les sols dénudés ont augmenté de 42% après les épisodes de sécheresses extrêmes de 1970 et 1980. Ceci a occasionné l'abandon des exploitations agricoles au profit d'autres activités ou l'exode vers les grandes villes du Sénégal.

L'étude menée par [Marega et al. \(2021\)](#) dans le Ferlo (Téssékéré) entre 1973 et 1999, a révélé que la végétation spontanée a subi une forte régression (13,4% de 1974 à 2013 et de 3,3% de 1973 à 1999). [Sylla et al. \(2019\)](#) montrent que les pertes de superficies dans les aires protégées du Ferlo sont faibles pour les steppes et élevées pour les savanes boisées et arborées. Les savanes boisées ont perdu 306305ha au profit des savanes arbustives, et les savanes arborées 160576ha au profit des savanes arbustives à arborées. [Sylla et al. \(2019\)](#) et [Dendoncker et al. \(2015\)](#) expliquent cette dégradation du couvert végétal, c'est-à-dire extension des steppes au profit de la savane, par la pression démographique (sédentarisation de la population agropasteurs, croissance très forte de la population et du cheptel) et le manque de précipitation ([Sarr et al., 2009](#) ; [Ozer et al., 2010](#) ; [Bodian et al., 2011](#) ; [Bakhoun et al., 2013](#) ; [Descroix et al., 2015, 2018](#)).

III.2.2.2. Reverdissement du couvert végétal après les années 2000

Entre 2000 et 2020, la dynamique de la végétation est positive. Le reverdissement de ces localités s'observe par l'amélioration des superficies des classes d'occupation des sols, savanes arborées et zones de culture au profit des sols nus, des steppes et prairies. Ces gains de superficie de la savane arborée à arbustive sont de 11,40% à Téssékéré ; 8,25% à Syer et + 2,70% à Loughéré-Thioly. En termes d'évolution annuelle (et de changement de superficie), il est noté des taux d'évolution (et taux de changement de superficie) des classes de savanes arborées à arbustives de 0,50% par an (15%) à Téssékéré ; 0,60 % par an (19%) à Syer et 0,1% par an (3%) pour la commune de Loughéré-Thioly. L'évolution des classes de culture (culture pluviale, culture irriguée et mosaïque agriculture) s'élève à 0,75% par an dans la commune de Syer et plus de 1% par an dans la localité de Loughéré-Thioly. Plusieurs études diachroniques soutiennent une amélioration remarquable de l'état du couvert végétal au Sahel donc la région du nord du Sénégal ([Mering et al., 2010](#) ; [Bamba et al., 2015](#) ; [Solli et al., 2022](#)). Pour ces études, cette amélioration serait consécutive à la reprise des précipitations après les sécheresses des années 1970-1980 ([Nicholson, 2013](#) ; [Bamba et al., 2015](#)). La hausse de la pluviométrie s'élève de +3 à 7% après la période sèche des années 1980 et 1990 ([Gore et al., 2023](#), chapitre 3). Par contre, Dans la commune de Ballou, bien qu'une amélioration pluviométrique se soit affirmée après les années 2000, la couverture végétale a continué de se dégrader. La forêt

claire/décidue a perdu près de 3.700 ha au profit de la savane arbustive et la classe zone urbaine. Cette perte correspond à un taux annuel de -0,57% par an et un changement de -14,73 % de superficie de la forêt claire/décidue.

III.2.2.3. Impact du reboisement et des pratiques agroforestieres sur le reverdissement du couvert végétal

Au regard de la distribution non uniforme de la végétation sur le sahel, et sur notre zone d'étude en particulier, la reprise des précipitations ne saurait être l'unique facteur de cette amélioration végétative observée ([Zida, 2020](#)). Les pratiques agroforestières, le reboisement, la bonne gestion des ressources naturelles locales sont aussi à prendre en considération ([Schucknecht et al., 2016](#) ; [CILSS, 2016](#) ; [Brandt et al., 2018, 2020](#) ; [Sylla et al., 2019, 2020](#) ; [Zida, 2020](#) ; [Descroix et al., 2018, 2021](#) ; [Tappan et al., 2021](#)). [Sylla et al. \(2019 et 2020\)](#) ont montré que les conversions avec amélioration du couvert végétal ont affecté 4000ha de zones nues dans la commune de Tébékéré. La diminution de la superficie des classes de sols nus résulte aussi de la mise en place du projet Modèle d'Aménagement Sylvopastoral des terres (Sénégal-Allemand GTZ) implanté depuis 1986. La progression des zones de culture est liée à la plantation d'arbres de l'initiative Grande Muraille Verte à partir de 2007 dans la région du Ferlo. Avec la collaboration des populations locales, l'initiative de la Grande Muraille Verte a réussi, la mise en défens de 13.000 hectares (cas de la réserve de Koyli Alpha 1.000 ha), 52 parcelles de plantations forestières et agroforestières (18.599 ha), une dizaine de jardins polyvalents villageois dans les communes de Syer, Mboula, Tébékéré, Labgar, Loughéri thioly et Sakal ([Diallo, 2019](#)) et la restauration de plus de 27.000 ha de terres ([Wu et al., 2020](#)).

[Tappan et al.\(2021\)](#) affirment malgré une forte densité de population rurale et la dégradation des ressources dans le Bassin Arachidier du centre-ouest du Sénégal que les systèmes agricoles locaux ont protégé les ressources naturelles et généré des améliorations substantielles des terres. Il s'agit notamment de l'augmentation du couvert arboré dans les terres cultivées et les zones de pâturage. Dans les villages de Ngodjilème et Thiaytou, la perte presque totale de superficies jachères et le doublement du couvert arboré de 1,9% en 1989 à 4,0% en 2020, indique que les agriculteurs ont accordé une importance considérable à la protection et à la gestion des arbres de plein champ. Cette étude indique aussi un changement significatif avec la régénération d'arbres dans les pâturages communautaires. Cette zone a été transformée de savane arbustive ouverte dégradée en une savane boisée dense avec 61% de couverture ligneuse.

III.2.3. Synthèse

Cette section qui a eu pour objectif d'évaluer la dynamique de l'occupation du sol des sites de la Grande Muraille Verte du Sénégal au cours des trois dernières décennies, a permis de révéler dans un premier temps la dégradation du couvert entre 1992 et 2000. Cette situation est une conséquence des sécheresses des années 1970, 1980 et 1990. Les conditions climatiques défavorables associées à une surexploitation des terres ont entraîné les réductions des surfaces agricoles, des savanes arborées et des forêts. Ensuite, un reverdissement des différentes localités est observé au cours des décennies 2000, 2010. Les gains de surfaces des savanes arborées et de zones de cultures en lieu et place des steppes, prairies et sols nus varient entre +3% à +11,5%. Ce reverdissement des différentes localités et l'amélioration des superficies de savane arborée et arbustive sont dus à une pluviométrie supérieure à la normale d'une part et aux actions de reboisement, aux pratiques agroforestières et une meilleure gestion des ressources naturelles entrepris d'autre part. Toutefois, certains sites non reboisés ont présenté une tendance inverse malgré une bonne pluviométrie.

Conclusion partielle

Le chapitre III a permis d'analyser en détail la dynamique du couvert végétal et de l'occupation du sol au sein de la Grande Muraille Verte du Sénégal sur plusieurs décennies. Le premier sous-chapitre a mis en évidence une évolution en deux phases : une dégradation marquée jusqu'à la fin des années 1990, suivie d'un reverdissement significatif à partir des années 2000, attribué à une amélioration des conditions climatiques (hausse des précipitations, humidité du sol et évapotranspiration) et aux efforts de reboisement. Ces actions ont renforcé la résilience écologique, comme en témoigne l'augmentation de l'indice de végétation (NDVI) et la corrélation accrue entre le NDVI et les paramètres climatiques dans les zones reboisées.

Ensuite, le second sous-chapitre a confirmé cette tendance en révélant une dégradation initiale du couvert végétal entre 1992 et 2000, liée aux sécheresses successives et à la surexploitation des terres, suivie d'une amélioration notable à partir des années 2000. Cette amélioration se traduit par une augmentation des surfaces de savanes arborées et des zones cultivées, grâce à une pluviométrie plus favorable et aux initiatives de reboisement, d'agroforesterie et de gestion durable des ressources. Cependant, certains sites non reboisés ont montré une tendance inverse, soulignant l'importance des interventions humaines pour soutenir la restauration du couvert végétal.

Les résultats présentés, dans ces deux sous-chapitres, démontrent que la combinaison de conditions climatiques favorables et d'actions anthropiques ciblées (reboisement, agroforesterie) a joué un rôle crucial dans la restauration du couvert végétal et la résilience des écosystèmes de la Grande Muraille Verte. Ces résultats mettent en lumière l'importance de poursuivre et d'intensifier les efforts de restauration pour consolider les gains écologiques observés.

Chapitre IV

Évaluation du carbone séquestré par les sites de la Grande Muraille Verte au Sénégal et modélisation de l'impact du reboisement sur le climat local

Introduction

Le couvert végétal offre plusieurs services qui sont cruciaux pour le bien-être et la survie de l'humanité. Cependant, ces services écosystémiques sont soumis à de fortes pressions en raison des activités anthropiques et du changement climatique (Polo-Akpisso *et al.*, 2020 ; Folega *et al.*, 2022). Les changements d'utilisation et d'affectation des terres sont considérés comme l'un des facteurs responsables de la perte et de la dégradation des services écosystémiques (Dimobe *et al.*, 2018 ; Folega *et al.*, 2022). Ces changements dans les régions tropicales (La déforestation tropicale, la dégradation forestière, l'expansion agricole, la transformation des terres en terres de pâturage, l'exploitation forestière destructive, les feux de forêts et de brousses) peuvent causer d'énormes quantités de perte de carbone (Dourma *et al.*, 2017). Or, la séquestration du carbone de la végétation est l'un des moyens d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre.

A contrario, le reboisement et une gestion durable des forêts font des forêts l'une des solutions les plus rentables et immédiates qui peuvent lutter contre le changement climatique. En effet, les forêts et leur capacité à stocker de grandes quantités de carbone dans les arbres, broussailles et sols représentent un atout en vue de lutter contre les effets néfastes de l'augmentation des concentrations du gaz carbonique qui est l'un des gaz à effet de serre.

Le reboisement est au cœur des stratégies d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre proposées par le Protocole de Kyoto (article 3.3). La question est d'évaluer si le fait de planter des arbres dans un milieu dénudé pourrait séquestrer du CO₂ atmosphérique et améliorer le bilan de carbone à long terme à l'échelle d'une région ou d'un pays. Ainsi, plus de quinze ans après le début des reboisements de la GMV au Sénégal, peu d'études se sont intéressées à la quantification de la séquestration de carbone dans les zones reboisées.

L'objectif de ce chapitre est d'estimer la quantité de carbone séquestrée durant les trois dernières décennies (1992-2020) et ensuite d'évaluer à l'aide du modèle RegCM-NH la contribution du reboisement.

Dans la section IV.1 qui suit, il s'agira spécifiquement, d'analyser dans un premier temps, la dynamique du stockage de carbone dans les sols de la GMV du Sénégal. Et ensuite, évaluer l'impact du reboisement sur la séquestration du carbone après le début du reboisement dans les zones de la GMV Sénégalaise.

IV.1. Dynamique de la séquestration du carbone du sol des sites de la grande muraille verte du Sénégal de 1992 à 2020

IV.1.1. Analyse de l'estimation du stockage de carbone au sein des sites de la GMV du Sénégal de 1992 à 2020

Les résultats de l'évolution de l'occupation du sol réalisés dans le chapitre précédent (chapitre III section III.2), ont été utilisés comme outils pour quantifier et évaluer la dynamique des stocks de carbone sur nos différents sites d'étude.

La méthode employée utilise les différentes classes d'occupation et d'usage des sols de chaque commune et de leurs valeurs moyennes de stock de carbone. De cette manière, nous avons pu estimer la quantité totale du carbone et le stock moyen du couvert végétal de 1992 à 2020 (Figure IV.1), et faire une analyse comparative de l'évolution du carbone entre ces périodes.

La figure IV.1 correspond à l'estimation des stocks moyens de carbone dans les différents sites d'étude. Les valeurs de carbone à l'hectare montrent deux dynamiques. En effet, la séquestration de carbone augmente dans les sols de Syer, Téssékéré, Loughéré-Thioly de 1992 à 2020. Par contre, Ballou enregistre une baisse de stock de carbone sur la même période. Notons que les valeurs moyennes de stock de Carbone enregistrées sur nos sites d'étude évoluent entre $11,18 \pm 0,001$ t.C/ha et $27,33 \pm 1,34$ tC/ha. Avec la plus forte valeur observée dans la localité de Téssékéré (29,80 t.C/ha en 2020) et la plus faible valeur dans la localité de Ballou (11,185 t.C/ha en 2020). Pour les différentes localités, les valeurs moyennes annuelles de stocks de carbone organiques de 1992 à 2020 vont de $4.177.726 \pm 12.539$ t.C à Syer; $5.740.287 \pm 23.306$ t.C à Téssékéré ; $3.257.418 \pm 7.087$ t.C pour le site de Loughéré-Thioly et $1.353.630 \pm 2.779$ t.C pour Ballou. Les incertitudes relatives des sites d'étude sont dans la plage 0,2% à 0,4% des différents stockages annuels.

Les résultats obtenus sur les quantités de stocks moyens de carbone séquestrées dans les zones de GMV du Sénégal présentent de grandes différences d'un site à un autre en termes de potentiel de stockage de carbone. Cette disparité est liée aussi bien aux conditions climatiques ([Maillard et al., 2016](#) ; [FAO, 2019](#) ; [Amdouni-Boursier et al., 2019](#) ; [Ndour et al., 2020](#)) mais elle est renforcée par les superficies d'arbres dans les différents couverts végétaux. Les savanes arborées, par exemple, représentent en moyennes 81,4% à Téssékéré, 45% à Syer et 28% à Loughéré-Thioly de l'occupation du sol de ces communes.

Ces estimations moyennes de stockage de carbone sont du même ordre de grandeur que les résultats de [N'Goran et al., 2022](#) (9,3 à 29,79 t.C/ha), de [Henry et al., 2009](#) (11,6 à 25,3

t.C/ha), et [Woomer et al., 2004](#) (moyenne 17,2 t.C/ha), [Touré et al., 2013](#) (stock 8 à 20 t.C/ha à 20 cm et 20 à 64 t.C/ha à 1m de profondeur) dans la zone sahélienne du Sénégal, et ceux de [Koala et al., 2021](#) ($8,74 \pm 6,05$ t.C/ha et $26,59 \pm 7,94$ t.C/ha) ; [Fané et al., 2022](#) (8 t.C/ha et 26 t.C/ha) ; [Dimobe et al., 2018](#) ($14,9 \pm 5,7$ t.C/ha et $30,2 \pm 15,6$ t.C/ha); [Boukeng et al., 2023](#) (26 t.C/ha à 31 t.C/ha) dans la sous-région Soudano-Sahélienne.

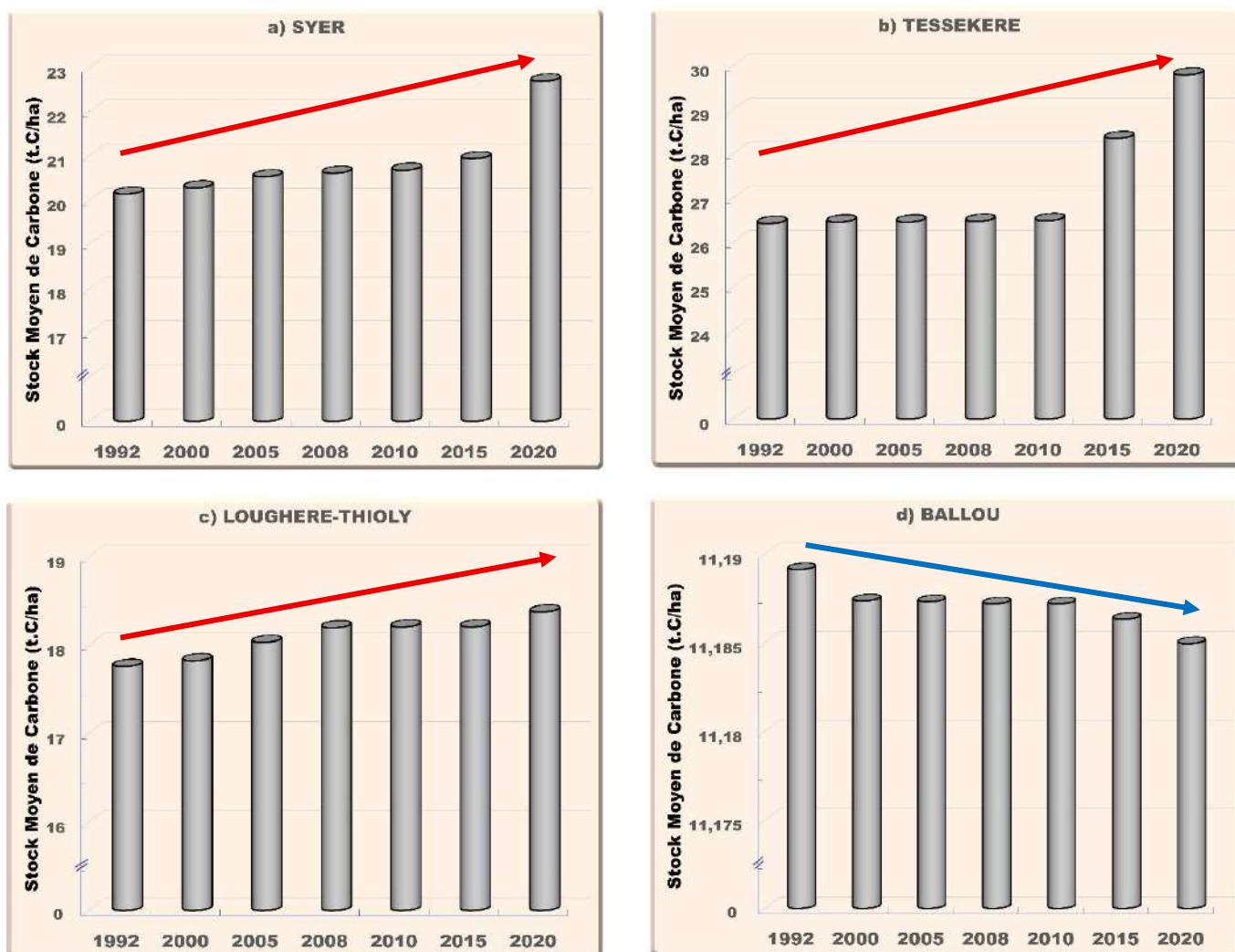


Figure IV.1: Evolution des stocks moyens de carbone (t.C/ha) dans les sols de a) Syer, b) Tèssékéré (Louga), c) Loughéré-Thioly (Matam) et d) Ballou (Tambacounda) de 1992 à 2020.

En 1992, les quantités de carbone séquestrés ont été estimés à $4.027.459 \pm 12.360$ t.C à Syer, à $5.550.062 \pm 22.785$ t.C à Tèssékéré, $3.197.238 \pm 7.173$ t.C à Loughéré-Thioly et à Ballou $1.353.884 \pm 2778$ t.C. Les principales classes d'occupation du sol dans ces localités contribuaient de 35% à 96% du stockage de carbone. Les savanes arborées ont réussi à

séquestrer $2.850.821 \pm 17.305$ t.C à Syer ; $5.339.604 \pm 23.683$ t.C à Tébékéré et $1.636.259 \pm 13.110$ t.C à Loughéré-Thioly (Tableaux IV.1 et IV.2).

En 2010, sur les sites de Syer, Tébékéré et Loughéré-Thioly, la séquestration de carbone annuelle a progressé de $+13.617$ t.C à $+108.052$ t.C (0,3% à 2,7 %) comparée aux stockages de carbone de 1992. Par contre, le site de Ballou enregistre une légère baisse de -234 t.C (Tableau IV.1).

En 2020, le stockage total de carbone dans les sols de Syer, Tébékéré et Loughéré-Thioly est estimé entre 3,5% et 12,7% de plus que l'année 1992, soit $4.538.215 \pm 14.130$ t.C à Syer (+12,68%) ; $6.115.422 \pm 24.776$ t.C à Tébékéré (+12,72%) et $3.308.022 \pm 7.184$ t.C à Loughéré-Thioly (+3,50%). Comparer à l'année 2010, la séquestration de carbone a progressé de 1% à 12,4% (9,74% à Syer ; 12,44% à Tébékéré et 0,93% à Loughéré-Thioly). À Ballou, la perte de stockage est de -0,04% par rapport à 1992 et de -0,02% par rapport à 2010, ce qui représente une valeur de $1.353.379 \pm 2.779$ t.C.

L'amélioration des superficies des classes d'occupation des sols, savanes arborées, savane arbustive et zones de cultures au détriment des sols nus, des Steppes et prairies, observée dans la première partie de ce travail, a généré entre 1992 et 2020, un gain de $+510.756$ t.C. à Syer, $+705.834$ t.C. à Tébékéré et $+110.784$ t.C. à Loughéré-Thioly. Et, la progression des zones urbaines et de la savane arbustive au détriment de la forêt claire/décidue a entraîné, sur le site de Ballou, une perte de -505 t.C.

Tableau IV.1: Quantités totales de carbone séquestrées par les principales classes d'occupation et d'utilisation des sols (LCLU) à Syer, Tébékéré, Loughéré-Thioly et Ballou de 1992 à 2020.

Sites	Principales classes	1992 (t.C/an)	2000 (t.C/an)	2010 (t.C/an)	2020 (t.C/an)
Syer (Loug)	Savane arborée	2850821±17305	2852697±17310	2852697±17310	3385839± 18859
	Steppe / prairie	90934± 768	88040± 755	70853± 678	51736± 579
Tébékéré (Loug)	Savane arborée	5339604 ±23683	5346412± 23698	5353220± 23713	6115422± 25345
Loughéré-Thioly (Matam)	Steppe arbustive	1104182± 7259	1104182± 7259	1104182± 7259	1100999± 7249
	Savane arborée	1636259± 13110	1636259± 13110	1636259± 13110	1680537± 13286
Ballou (Tambacounda)	Culture pluviale	509699± 3834	509699± 3834	509699± 3834	509699± 3834
	Steppe arbustive	599886± 5351	599886± 5351	599886± 5351	599886± 5351

Tableau IV.2: Quantités totales de carbone stockées (t.C/an) dans les sols de Syer, Téssékéré, Loughéré-Thioly et Ballou de 1992 à 2020.

Sites	1992 (t.C/an)	2000 (t.C/an)	2010 (t.C/an)	2020 (t.C/an)
Syer (Louga)	4027459± 12360	4055389± 12289	4135511± 12053	4538215± 14130
Téssékéré (Louga)	5550062± 22785	5556871± 22800	5563679± 22816	6255896± 24776
Loughéré-Thioly (Matam)	3197238± 7173	3208478± 7148	3277503± 7005	3308022± 7184
Ballou (Tambacounda)	1353884± 2779	1353671± 2778	1353650± 2778	1353379± 2779

IV.1.2. Analyse de la dynamique de séquestration de carbone de 2000 à 2020

IV.1.2.1. Analyse de l'évolution des anomalies standardisées de séquestration de carbone de 2000-2020

La représentation graphique de l'évolution des anomalies standardisées de séquestration de carbone dans le sol de 2000 à 2020 présente deux dynamiques (Figure IV.2).

Les localités de Syer, Téssékéré et Loughéré-Thioly présentent une période à anomalie négative suivie d'une seconde période à anomalie positive. La période positive débute en 2007, 2013 et 2014 respectivement pour les localités de Loughéré-Tholy, Téssékéré et Syer. Les anomalies positives de séquestration deviennent significatives, c'est-à-dire supérieures à 1, à partir 2017 pour Téssékéré, 2018 pour Syer et 2019 à Loughéré-Thioly. La significativité du stockage du carbone du sol des sites reboisés intervient 8 à 10 ans après le début des différentes plantations d'arbres de la GMV Sénégalaise.

Par contre, la dynamique dans la localité de Ballou est inversée. Cette évolution du stockage de carbone est en baisse. En effet, une anomalie négative s'observe à partir de 2010. Pour Ballou, la perte de capacité à stocker le carbone dans le sol est observée et significative à partir de 2019.

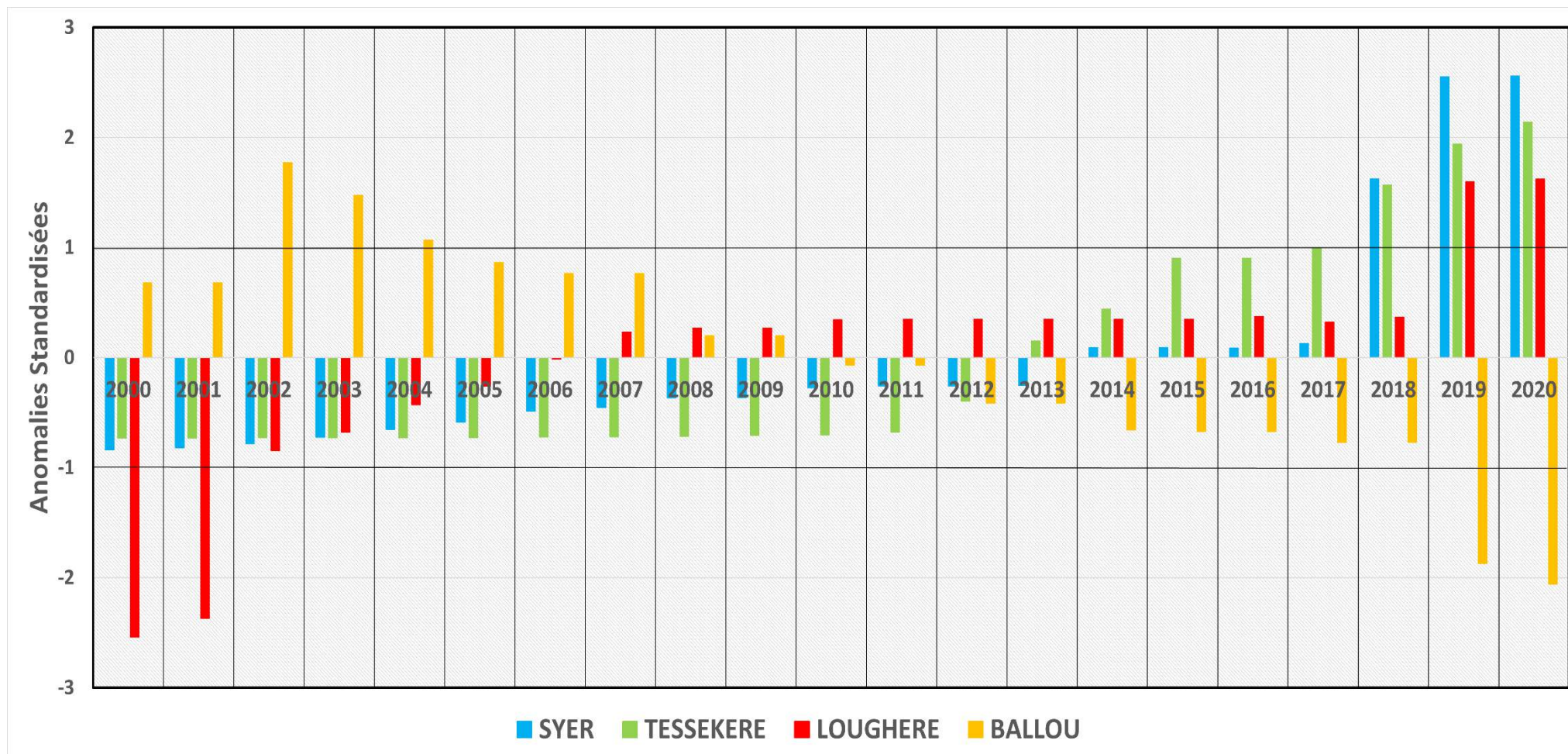


Figure IV.2: Évolution des anomalies de stock de carbone sur les sites de Syer, Tèssékéré, Loughéré-Thioly et Ballou au GMV- Sénégal de 2000 à 2020.

IV.1.2.2. Analyse des ruptures des séries de stockage de carbone par les tests de Buishand et Bayésien BEAST de 2000–2020

Les résultats des tests de ruptures appliqués aux données de séquestration de carbone sont présentés dans le tableau IV.3 et la figure IV.3. Le test de Buishand, qui montre la principale rupture dans les séries temporelles, révèle des ruptures très significatives dans les différentes localités. Ces ruptures se situent en 2012 à Téssékéré et 2013 à Syer, c'est-à-dire 3 à 4 ans après le début des reboisements sur ces sites, et en 2006 à Loughéré-Thioly. Les résultats du test BEAST, qui décèlent plusieurs ruptures, montrent des ruptures dans la tendance en 2006, 2007, 2008 respectivement à Loughéré-thioly, Téssékéré et Syer. Ces années représentent le début des plantations d'arbres sur ces différents sites. Ensuite d'autres ruptures sont localisées dans les tendances des séries de stockage de carbone en 2016 à Téssékéré et 2017 à Syer et Loughéré-Thioly. Cette seconde rupture correspond à l'année où la séquestration de carbone devient significative dans ces localités. Ce résultat est en accord avec celui obtenu par le calcul d'anomalies standardisées plus haut. Le test bayésien met également en évidence une rupture en 2012 à Téssékéré. Dans la localité de Ballou (site non reboisée), les ruptures se situent en 2004, 2009 et 2016. La rupture de 2009 correspond au début de perte de superficie de forêt claire sur ce site.

Notons également que les moyennes de stock de carbone (t.C/ha) après rupture dans les localités reboisées sont à la hausse et les pentes des tendances sont toutes positives. Par contre, dans la localité non encore reboisée, les moyennes sont en baisse et toutes les pentes sont négatives.

Tableau IV.3: Statistiques du test de Buishand, et du test bayésien BEAST des données de stockage de carbone.

Tests	Test de Buishand				Test bayésien BEAST		
Sites	Dates de rupture	Moyenne avant rupture (t.C/ha)	Moyenne après rupture (t.C/ha)	Statistiques U et P-value	Dates de rupture	Probabilités de l'occurrence	Pentes des tendances
Syer	2013	20,51	20,60	U=1,25 Pv=2,2.10 ⁻¹⁶	2017	0,994	0,39
					2008	0,012	0,04
Téssékéré	2012	26,50	28,62	U=1,58 Pv=2.10 ⁻¹⁶	2012	0,936	0,44
					2016	0,162	0,28
					2007	0,004	3,10 ⁻⁰⁴
Loughéré-Thioly	2006	18,02	18,23	U=1,28 Pv= 5.10 ⁻⁰⁵	2006	0,502	0,03
					2017	0,275	0,01
Ballou	2009	11,19	11,18	U=1,68 Pv=2,1.10 ⁻¹⁶	2004	0,513	-2,1.10 ⁻⁰⁴
					2016	0,028	-1,5.10 ⁻⁰⁴

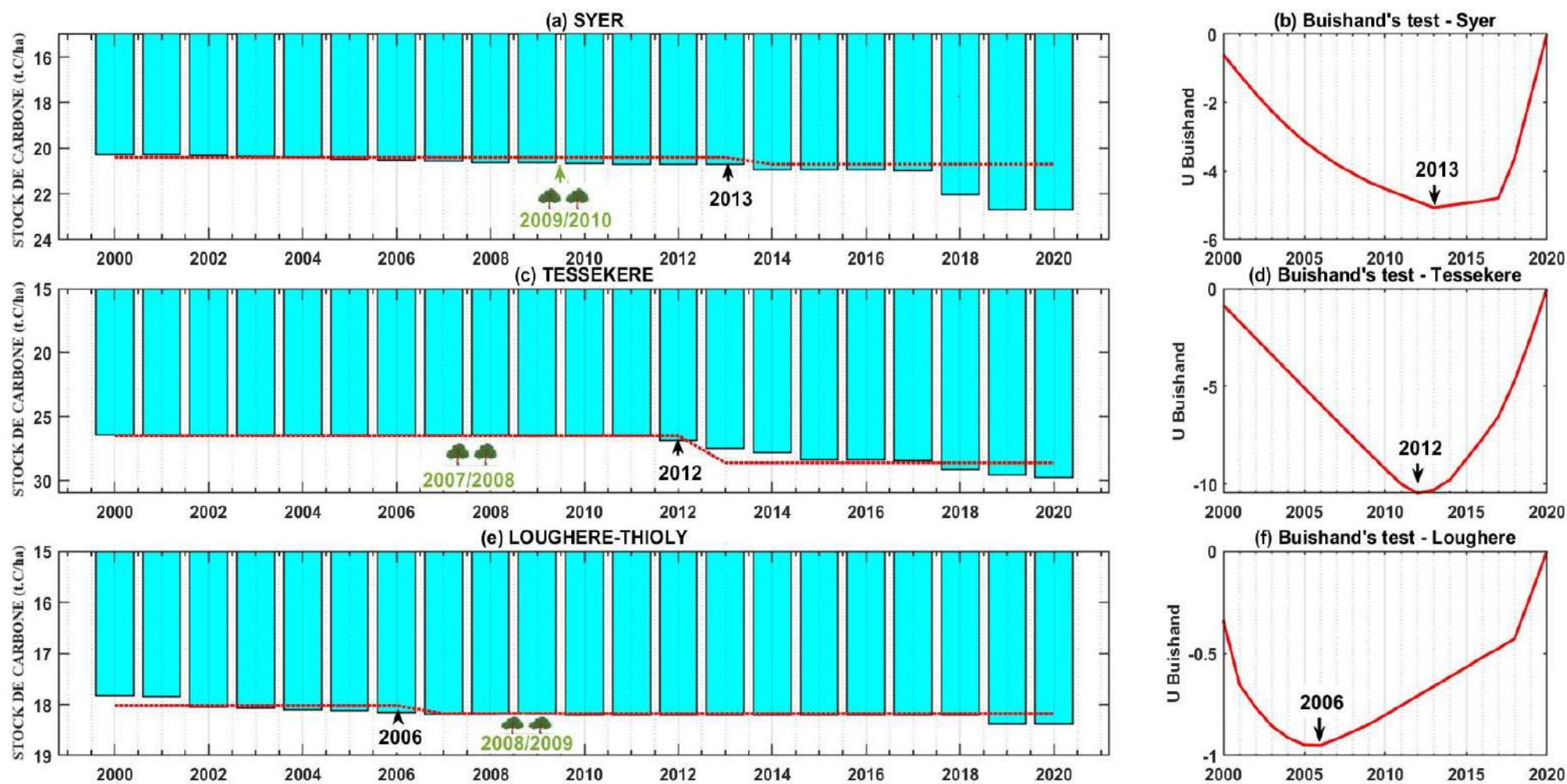


Figure IV.3: Évolution annuelle du stockage de carbone et du test de Buishand de 2000 à 2020 dans les régions de Syer, Tèssékéré et Loughéré-Thioly.

IV.1.3. Estimation de la quantité de carbone séquestrée après reboisement de la GMV

L'un des objectifs de l'initiative de la Grande Muraille Verte, pour lutter contre les effets néfastes des changements climatiques, est d'arriver à séquestrer 250 millions de tonnes de carbone dans les sols à l'horizon 2030. Ainsi, dans cette partie du travail, nous avons évalué la quantité de carbone stockée sur chaque site après les campagnes de reboisement de l'initiative GMV au Sénégal.

Dans la commune de Syer, la quantité de carbone séquestrée après 2010 s'évalue à $1.679.931 \pm 127.085$ t.C. ce qui représente un gain annuel de 119.406 ± 9.550 t.C/an. Le sol de Téssékéré a emmagasiné un stock de carbone durant la période 2009–2020 estimé à $3.729.318 \pm 283.822$ t.C et une moyenne annuelle de 248.848 ± 17.420 t.C/an. A Loughéré-Thioly après les différentes campagnes de reboisement (commencé en 2009), la séquestration du carbone organique se chiffre à 362.902 ± 29.032 t.C, soit 30495 ± 1525 t.C/an. Pour l'ensemble des sites reboisés de notre étude, le gain de carbone séquestration s'élève à $5.772.151 \pm 439.939$ t.C soit une moyenne annuelle de 398.749 ± 27.910 t.C/an.

En revanche sur le site non reboisé de Ballou, l'évaluation du stock de carbone s'est faite à partir de la différence des années après 2006 et la moyenne du stockage de la période 1992–2000. Et, il est noté une perte de stockage en carbone dans le sol de Ballou. Cette perte est estimée à -3055 ± 153 t.C, soit une moyenne de -204 ± 10 t.C/an (voir Figure IV.4).

En se basant sur la longueur de la GMV Sénégalaise qui représente 7% de la longueur totale de la Grande Muraille verte Africaine et qui a une superficie de 807 milles hectares, le Sénégal devra séquestrer 17,5 millions de carbone de plus pour contribuer aux objectifs fixés pour 2030. Ainsi, le gain de carbone de 5,8 millions de t.C obtenu représente 33% de l'objectif du Sénégal et 2,31% de l'objectif de séquestration de l'agence panafricaine de la grande muraille verte. Pour atteindre ces objectifs de séquestration dans les dix (10) prochaines années, la GMV du Sénégal doit séquestrer en plus 1,2 millions t.C/an.

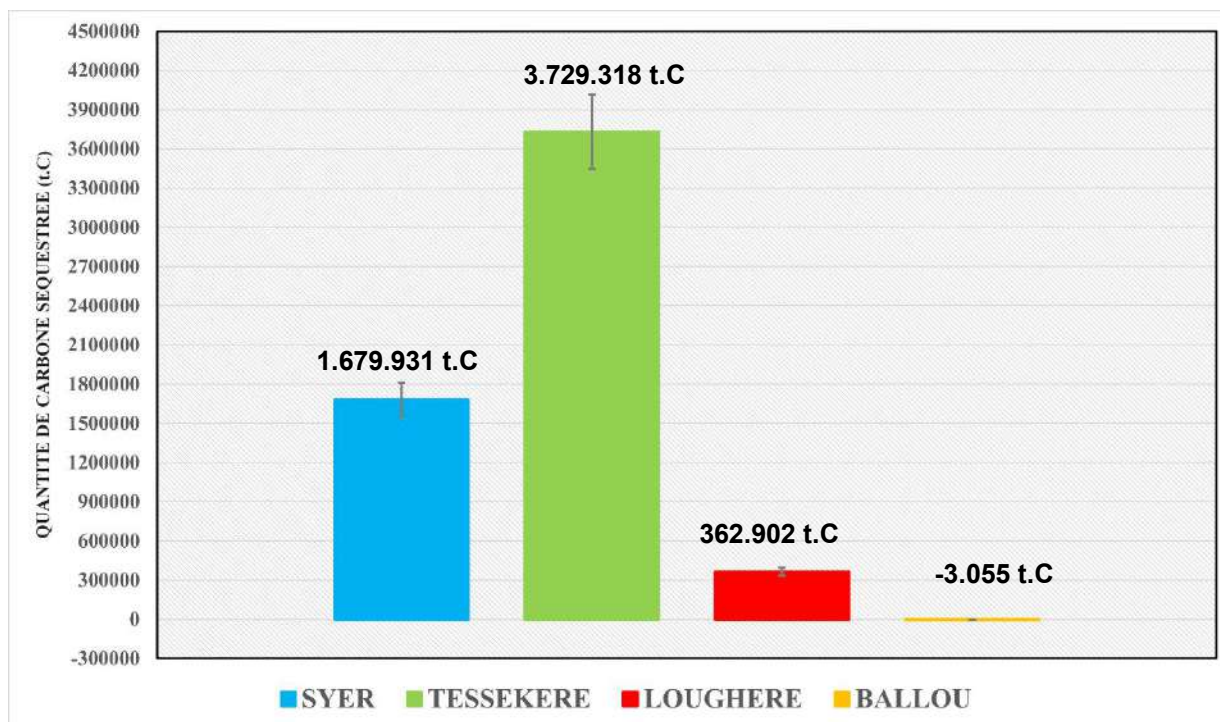


Figure IV.4: Gains et pertes de carbone séquestré à Syer, Tessedekere, Loughere-Tioly et Ballou après reboisement

IV.1.4. Discussion

Les résultats de l'estimation du stockage du carbone organique dans les sols de GMV-Sénégalaise montrent une dynamique à la hausse de la séquestration du carbone pour les sites reboisés de Syer, Tessedekere (Louga), Loughere-Thioly (Matam) et une perte de capacité à stocker le carbone sur les sites non reboisés (cas du site de Ballou dans la région Tambacounda) sur la période 1992 à 2020. Les travaux de [Dai et al. \(2020\)](#) et de [Gore et al. \(2023\)](#) avaient montré une dynamique positive des sites reboisés à partir des indices de végétation (NDVI et VHI). Les résultats de ces études renforcent les nôtres sur la dynamique positive de la séquestration de carbone observée dans les différents sols de la GMV reboisés. Pour [Sullivan et al. \(2017\)](#), le stockage et l'émission de carbone sont de bons intégrateurs de l'état de santé du couvert végétal et des pressions anthropiques.

IV.1.4.1. Comparaison des estimations de la séquestration du carbone des sites de la GMV avec les résultats d'autres régions

Au Sénégal, les travaux de [Touré et al. \(2013\)](#) réalisés dans la zone soudanienne, montrent que l'occupation et l'usage des sols à un fort impact sur le stockage de carbone organique. Cette

étude a révélé que la conversion des forêts en champs d'arachides provoque une transformation de la texture des sols et une perte de carbone organique. En effet, le stockage de carbone des sols de cultures dominantes, en l'occurrence les champs arachide, est plus faible de 27 à 35% que dans les sols de savane. Et, les totaux de stocks de carbone sont faibles pour les sols sableux que dans les sols sableux argileux. De plus, l'étude de [N'Goran et al. \(2022\)](#) qui a été effectuée sur des mesures de stock de carbone de 15 sites allant du nord (département de Dagana) au sud-est (Région de Tambacounda) du Sénégal a fait une comparaison entre les stocks de carbone du sol sous houppier et hors houppier des arbres. Et, il ressort que sous houppier le stock de carbone est en moyenne de 22,1 t.C/ha contre 17,6 t.C/ha hors houppier. Ces résultats témoignent le fort impact des arbres sur la séquestration du carbone.

Dans la sous-région, les travaux de [Koala et al. \(2021\)](#) dans le parc agroforestier de Saria au Burkina Faso, ont montré que les premières couches du sol renfermaient 91% du stock total de carbone et ces quantités évoluaient entre $8,74 \pm 6,05$ t.C/ha et $26,59 \pm 7,94$ t.C/ha. Dans le paysage semi-aride de Dano (Burkina Faso), le stock moyen est estimé à 24 t.C/ha. Et, les sols des forêts galeries stockaient plus de carbone ($30,2 \pm 15,6$ t.C/ha) que les savanes ($22,1 \pm 6,1$ t.C/ha), les forêts ($22 \pm 8,2$ t.C/ha), les savanes arborées ($21,4 \pm 7,4$ t.C/ha), et les terres cultivées ($14,9 \pm 5,7$ t.C/ha) ([Dimobe et al., 2018](#)). Pour ces auteurs, ces systèmes de gestion des forêts en zone sèche jouent un rôle écologique important en contribuant significativement à la lutte contre les changements climatiques à travers le fort potentiel de séquestration de carbone. Les arbres et les arbustes utilisés dans les systèmes agroforestiers permettent d'accroître le stockage de carbone grâce aux apports de biomasse aérienne et racinaire ([Ndour et al., 2020](#) ; [Koala et al., 2021](#) ; [Fané et al., 2022](#) ; [Boukeng et al., 2023](#)). Pour [Fané et al. \(2022\)](#) au Mali, la quantité de carbone séquestrée varie en fonction du système agroforestier et des techniques d'entretien de ces systèmes. Le taux de carbone séquestré est différent d'un système à un autre. Il est estimé à 26 t.C/ha dans le système Jachère suivi du système Savane verger de 19 t.C/ha et 8 t.C/ha pour le système Plantation.

IV.1.4.2. Dynamique du stockage de carbone organique des sols

La dynamique du stock de carbone moyen des différents sites reboisés est en hausse et varie entre +0,6 à +2,6 t.C/ha de 1992 à 2020 et +0,5 à +2,4 t.C/ha de 2000 à 2020, ce qui représente un gain de stock moyen annuel de +0,1 t.C/ha/an et 0,12 t.C/ha/an respectivement pour les périodes 1992-2020 et 2000-2020. Sur les communes non encore reboisés, l'évolution

temporelle du stockage de carbone organique est à la baisse. Et, cette perte de séquestration moyenne s'évalue pour la commune de Ballou à -0,004 t.C/ha.

Au Sénégal, l'évolution temporelle du stockage de carbone dans les sols est souvent estimée par des approches de modélisation (Tschakert *et al.*, 2004 ; Woomer *et al.*, 2004 ; Touré *et al.*, 2013 ; Loum *et al.*, 2014 ; Ndour *et al.*, 2020). Les modèles Century et RothC ont été les plus fréquemment utilisés pour prédire la dynamique du carbone des sols selon différents scénarios agronomiques et de changements climatiques (Farage *et al.*, 2007 ; Ndour *et al.*, 2020). Tschakert *et al.* (2004) ont appliqué le modèle Century aux agrosystèmes sénégalais. Les différents modes d'utilisation agricole des sols entraînent une réduction des stocks de carbone organique du sol entre 2002 et 2050. La rotation continue des cultures (arachide - mil) sans apport externe de carbone entraîne la plus forte diminution des stocks de carbone (-1,4 à -3,9 t.C/ha). Par contre, l'agroforesterie à base de plantation de *Faidherbia albida* génère la plus forte augmentation de stock de carbone organique du sol de +11 t.C/ha entre 2002 et 2050, soit 0,23 t.C/ha/an. Quant au modèle RothC, appliqué sur la même région, les résultats montrent que la rotation de cultures (arachide-mil) entraîne une réduction importante des stocks de carbone organique de -1,8 à -5,1 t.C/ha (Loum *et al.*, 2014 ; Ndour *et al.*, 2020). Les stocks de carbone organique (de la couche 0-25 cm) sont passés de 8,1 t.C/ha en 2009 à 3,3 t.C/ha en 2050 soit une perte de 4,8 t.C/ha. En intégrant un scénario agroforesterie à base de *Faidherbia Albida*, l'augmentation du stock de carbone est estimée à +12 t.C/ha entre 2009 et 2050, soit un gain annuel de 0,29 t.C/ha/an. Au nord du Sénégal, Liu *et al.* (2004) et Dièye *et al.* (2012) ont quantifié la dynamique du stock de carbone à l'aide du modèle GEMS. En 2000, le stock moyen de carbone, avec la prise en compte de l'utilisation des sols (parcelles cultivées, parcelles en jachère, zones forestières, savanes et reboisements), était estimé à 28 t.C/ha dans la couche 0-40 cm. Et ce stock passerait en 2100 de 3 à 7 t.C/ha (Liu *et al.*, 2004). Pour Dièye *et al.* (2012), les stocks de carbone estimés variaient entre 5 t.C/ha dans les sols nus et 15 t.C/ha dans les sols des systèmes de culture irrigués.

Dans la région semi-aride de Dano au Burkina Faso, les résultats des modèles HadGEM2-ES et MPI-ESM-MR à l'horizon 2070 ont montré que le changement climatique pourrait affecter le potentiel de stockage de carbone des espèces ligneuses dans les différentes zones d'usages et d'occupations des sols (LULC). Ces modèles estiment la baisse de capacité à stocker le carbone de 90% pour le modèle HadGEM2-ES et 89,4% pour le modèle MPI-ESM-MR (Dimobe *et al.*, 2018).

Les résultats de l'évolution temporelle de la séquestration de carbone de ces différentes simulations corroborent la dynamique que nous avons observés sur nos sites d'étude. Par contre, la différence se fait au niveau des valeurs de stocks de carbone obtenu par les modèles et les nôtres issues de l'observation de l'occupation du sol (Land Cover). Cette différence pourrait s'expliquer par les paramètres d'entrées utilisés dans les modèles (choix des espèces plantées, texture des sols, rotation de culture, âges des plantations) et les données d'occupation du sol uniquement prise en compte dans notre étude. En effet, la prise en compte des espèces d'arbre reboisés et l'âge des plantations pourraient améliorer à la hausse l'estimation de du stockage de carbone (Dimobe *et al.*, 2018 ; Kooke *et al.*, 2019 ; Abass *et al.*, 2023). L'étude réalisée par Abass *et al.* (2023) au Soudan, a montré que la biomasse aérienne dans les plantations d'Acacia Sénégal (*Senegalia senegal*) est plus importante dans les plantations de 45 ans que les plantations d'arbres de 16 ans. Ensuite, le stock moyen de carbone séquestré était de 11,9 t.C/ha pour les plantations de 35 ans et de 1,2 t.C/ha pour les plantations de 16 ans.

IV.1.4.3. Impacts du reboisement sur le stockage de carbone organique des sols

Cette étude qui a été réalisée sur certaines localités de la GMV du Sénégal, montre l'impact du reboisement (débuté en 2005 sur certains sites) sur la capacité des arbres à capter le dioxyde de carbone atmosphérique et à l'enfouir dans le sol. Les résultats de notre étude ont estimé la séquestration totale moyenne à 4177726 ± 12539 t.C à Syer ; 5740287 ± 23306 t.C à Téssékéré ; 3257418 ± 7087 t.C à Loughéré-Thioly et 1353630 ± 2779 t.C pour Ballou. Après reboisement, le stockage du carbone dans les sols et la réduction de CO₂ dans l'atmosphère de ces différents sites ont progressé de +3,5% à Loughéré-Thioly et de +12,7% à Syer et Téssékéré. L'amélioration du couvert végétal, en occurrence les savanes arborées et arbustives, par la plantation de plus de 18 millions d'arbres, la restauration de 119200 ha de terres et 72542 ha de surfaces reboisée et la mise en défens de 13000 ha (UNCCD, 2020), a permis de séquestrer 33% de l'objectif de stockage de carbone du Sénégal et 2,31% de l'objectif de la GMV Africaine, soit 5,8 millions tonnes de carbone. Ce qui représente 21,2 millions de tonnes de CO₂ capté dans l'atmosphère.

Ces résultats sont en cohérences avec les travaux de Zhang *et al.* (2016) ; Gong *et al.* (2017) et Bacar *et al.* (2022). Ces travaux montrent que la restauration de la végétation est un outil efficace pour augmenter la biomasse végétale et la teneur en carbone organique. Et, La teneur en carbone organique du sol est significativement plus élevée dans la restauration de la végétation naturelle que dans la végétation gérée et les terres labourées.

Au Sénégal, la mise en œuvre et les inventaires des massifs forestiers dans le cadre des projets PROGEDE 1 ET 2 (Projet de Gestion Durable et participative des Energies traditionnelles et de substitution ; [PROGEDE, 2009](#) ; [MEPN, 2016](#) ; [MEDD, 2021](#)) dans sept régions depuis 1998, ont permis de quantifier 15,37 millions de tonnes de carbone séquestrés correspondant à 56,41 millions de tonnes de CO₂. Les plus fortes valeurs de carbone stockées sont enregistrées dans les massifs forestiers de l'est et du sud du Sénégal. Les quantités de carbone des sites de Koar, Guimara et Kandiator étaient respectivement de 3.488.107 t.C ; 2.444.917 t.C et 2.422.389 t.C. Pour ces auteurs, la disparité observée au niveau des massifs forestiers serait liée aux conditions climatiques, au taux de couverture forestière (types de formation végétale, espèces d'arbres, densité moyenne de couverture végétale ligneuse ; la taille du massif et le ratio des superficies couvertes), niveau de dégradation avancé du couvert végétal ligneux et des perturbations anthropiques (proximité des zones d'habitation, expansion des terres agricoles, coupes illégales de bois).

Dans la région semi-aride du Brésil, l'aménagement du couvert herbacé a contribué à séquestrer entre 21,2 t.C/ha en saison de pluie et 14,6 t.C/ha en saison sèche ([do Nascimento Aquino et al., 2017](#)). Pour ces auteurs, l'éclaircissement des savanes herbeuses serait une alternative de gestion dans les programmes de durabilité dans les régions semi-arides. Cet aménagement contribue à maximiser la production de fourrage herbacé pour l'alimentation des grands et petits ruminants, le pâturage, ce qui augmente le stock de carbone dans le sol et aider à réduire le réchauffement climatique.

En Chine, la mise en œuvre des programmes "Grain to Green" (GTGP) et l'émigration écoenvironnementale (Grain to Green Program (GTGP) and eco-environmental emigration) dans la région désertique rocheuse de Karstique (sud-ouest de la Chine) ont permis de séquestrer du carbone et de produire l'oxygène. Entre 2000 et 2010, l'étude de [Zhang et al. \(2016\)](#) a montré l'impact des initiatives de réhabilitation écologique débutées en 1999 dans cette région sur le stockage du carbone des sols et la production d'oxygène. Elle note une augmentation significative annuelle de 20,94% de la séquestration du carbone et de la production d'oxygène. L'augmentation totale de carbone et de production d'oxygène dans différentes localités de cette région était estimée à 7,66 millions de tonnes et 3,51 millions de tonnes respectivement à Baise et Huanjiang.

IV.1.5. Synthèse

Ce sous-chapitre IV.1, qui a pour objectif d'évaluer la dynamique du stockage de carbone des sites de la Grande Muraille Verte du Sénégal au cours des trois dernières décennies, a permis d'analyser la séquestration du carbone organique des sols à l'aide des données satellitaires d'occupation du sol ESA-CCI LC. Les résultats d'estimation de séquestration totale moyenne de carbone vont de 1,3 millions t.C/an à 5,7 millions t.C/an. L'amélioration du couvert végétal, principalement les superficies des savanes arborées et arbustives, par la plantation de plus de 18 millions d'arbres, la restauration de 15% des terres, 9% de l'objectif de plantation d'arbres de la Grande Muraille Verte du Sénégal et la mise en défens de 13000 ha, a permis de séquestrer 33% de l'objectif de stockage de carbone du Sénégal et 2,31% de l'objectif de la GMV Africaine. Ce gain de carbone stocké se chiffre à 5,8 millions tonnes de carbone. Ce qui représente 21,2 millions de tonnes de CO₂ capté dans l'atmosphère. Il ressort des différents résultats que le stockage de carbone devient significatif 8 à 10 ans après le début du reboisement. Sur les sites non reboisés (cas de la commune de Ballou), l'étude a montré une perte de capacité à stocker le carbone.

Si les résultats présentés dans le sous-chapitre IV.1 ont démontré l'efficacité des politiques de reboisement de la Grande Muraille Verte (GMV) du Sénégal dans l'amélioration de la séquestration du carbone organique des sols, il est désormais essentiel d'évaluer comment ces transformations végétales, influencent les dynamiques climatiques locales. En effet, la restauration des écosystèmes ne se limite pas à capter le CO₂ atmosphérique : elle modifie également les interactions entre le couvert végétal, l'humidité des sols et les régimes pluviométriques, paramètres clés pour la résilience face aux changements climatiques. Les décennies de sécheresse rappellent que la dégradation du couvert végétal a exacerbé les pertes en carbone des sols et fragilisé les écosystèmes. À l'inverse, la reprise des précipitations depuis les années 2000, couplée aux efforts de reboisement, a non seulement permis de restaurer la capacité de stockage du carbone (comme le montre la section IV.1), mais pourrait aussi avoir induit des rétroactions climatiques locales. Ainsi, l'augmentation du couvert végétal documentée dans la section IV.1, soulève une question centrale : comment ces changements intervenus dans le couvert végétal influencent-ils les précipitations, moteur essentiel des cycles hydrologiques en zone tropicale ? C'est précisément l'objet du sous-chapitre IV.2, qui utilise le modèle non-hydrostatique RegCM4.7 pour quantifier l'impact du reboisement sur le climat.

IV.2. Modélisation de l'impact du reboisement sur quelques paramètres climatiques

Dans les chapitres précédents, nous avons vu que l'ensemble de notre zone d'étude a été confrontée aux effets des sécheresses des années 1970, 1980 et début 1990. La forte diminution des pluies a affecté le couvert végétal et mis en mal les politiques de sécurité alimentaire. En outre, le recul du couvert végétal a eu un impact négatif sur les sols et par conséquent sur la séquestration du carbone organique des sols ([Gardelle et al., 2010](#) ; [Descroix et al., 2015](#), [Dimobe et al., 2018](#) ; [Ndour et al., 2020](#)). Suite à ces aléas climatiques, des politiques de reboisement, de bonnes gestions des sols ont été mises en place. Et, la reprise des précipitations à partir de la fin de la décennie 1990 conjuguée avec les multiples programmes de restauration des écosystèmes ont permis de confirmer la tendance à une augmentation de l'humidité du sol, à un reverdissement des sites reboisés et à une meilleure séquestration du carbone par les sols ([Gore et al., 2023](#) ; [Abass et al., 2023](#)).

Afin de mieux comprendre l'apport de plus de quinze années de reboisement sur le climat local et régional, il apparaît nécessaire d'appréhender, à une échelle locale, la contribution du couvert végétal, outre que la Mousson et les lignes de grain ([Courel, 1984](#) et [Sagna, 1988](#)), sur la pluviométrie de ces régions. La pluie étant le facteur le plus déterminant dans les études du climat en zone tropicale, le recours à des modèles numériques du climat à échelle fine (quelques dizaines de mètres à quelques kilomètres) devrait en particulier permettre de mieux comprendre les changements que connaît le climat des régions de la Grande Muraille Verte du Sénégal.

Dans cette deuxième partie du chapitre IV, l'objectif est d'évaluer à l'aide du modèle RegCM-NH la contribution du reboisement sur la dynamique des précipitations au Sénégal, et en particulier sur l'ensemble de la zone d'étude (la GMV du Sénégal).

IV.2.1. Validation et évaluation des simulations

En Afrique de l'Ouest, le modèle RegCM Hydrostatique a été validé dans plusieurs études avec des résolutions supérieures à 50km. Nous pouvons citer par exemple les études de [Saley et al. \(2016\)](#), [Diba et al. \(2016 ; 2019\)](#), [Koné et al. \(2018\)](#), [Bamba et al. \(2019\)](#). Après 2021, le développement d'une dynamique non-hydrostatique incorporé au modèle RegCM4 ([Coppola et al., 2021](#)) permet d'effectuer des simulations à une résolution de quelques kilomètres. L'avantage d'un noyau non hydrostatique est qu'il est capable de résoudre explicitement l'équation de la quantité de mouvement verticale au lieu d'utiliser l'approximation

hydrostatique, et permet donc la représentation directe de la dynamique de la convection sans l'utilisation nécessaire de schémas de paramétrisation de la convection (Prein *et al.*, 2015). Les études ont montré que les modèles climatiques régionaux (MCR) avec des noyaux non hydrostatiques modélisent mieux les effets de la topographie, la dynamique de la couche limite, de la végétation et le moment de la convection (Ban *et al.*, 2021 ; Pichelli *et al.*, 2021 ; Nguyen-Xuan *et al.*, 2022). Ainsi, nous allons évaluer la performance de la version non hydrostatique du RegCM à simuler la climatologie des précipitations au Sénégal. Les précipitations annuelles et saisonnières de nos différentes simulations sont comparées aux données d'observation CHIRPS2.0 et CRU (CRU TSv.4.07 ; <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/>) de la période avant reboisement.

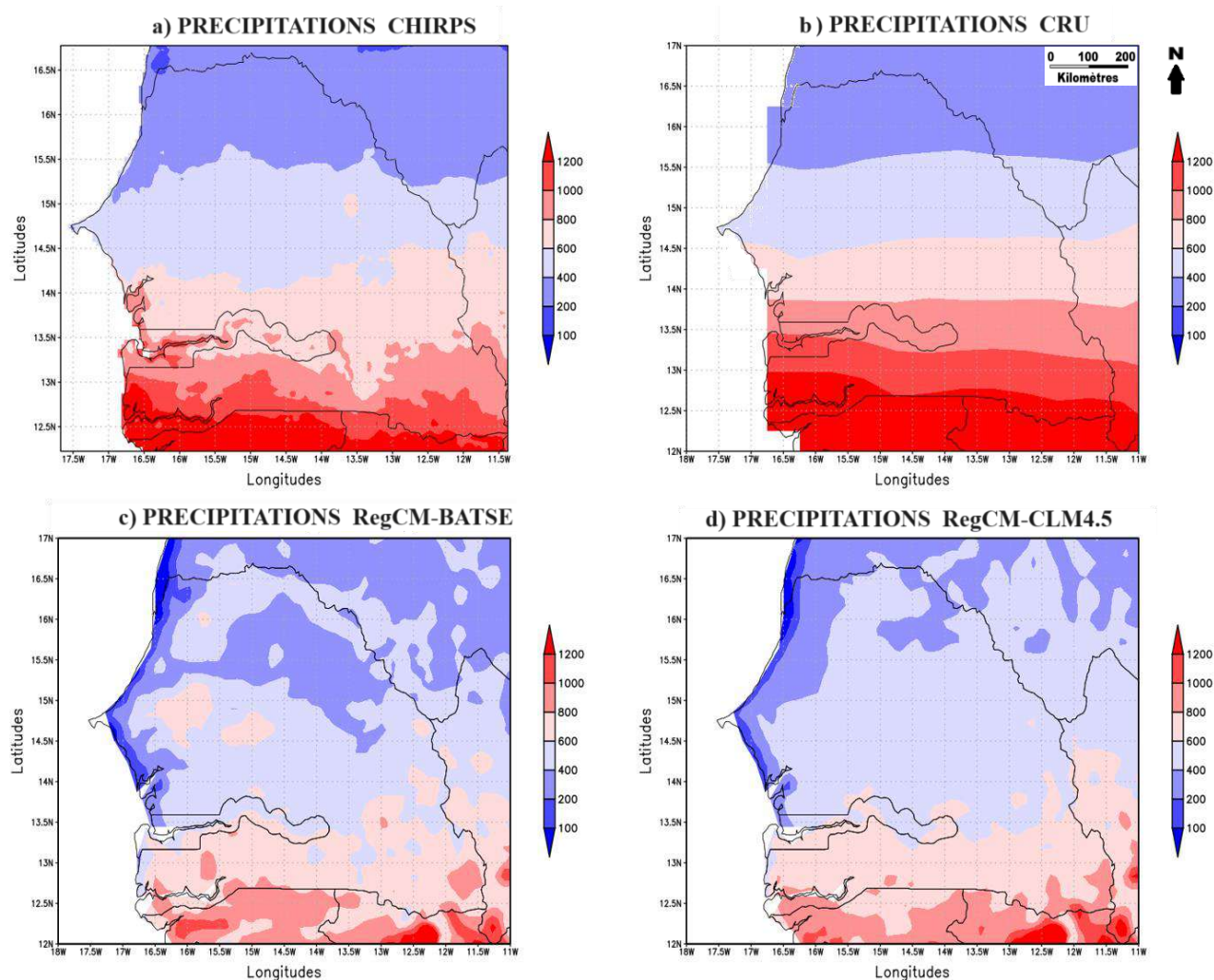


Figure IV.5: Distribution spatiale des précipitations moyennes annuelles sur la période 2000-2008 au Sénégal, pour les données d'observations a) CHIRPS, b) CRU et les données de simulations c) RegCM -BATS, d) RegCM-CLM4.5.

La figure IV.5 représente la pluviométrie moyenne sur la période 2000-2008 pour les climatologies des données CHIRPS, CRU et les versions non reboisées du modèle RegCM4-NH (RegCM-BATSE et RegCM-CLM4.5 standards).

La climatologie des précipitations CHIRPS et CRU montre une structure zonale des précipitations avec les maxima de pluies à plus de 1000 mm/an localisés au sud, sud-est du pays. Les résultats des simulations des modèles RegCM-BATS et RegCM-CLM4.5 arrivent à reproduire assez bien la distribution zonale des précipitations et à repérer les zones de fortes et faibles quantités de précipitations annuelles.

Les cycles annuels des précipitations pour les localités de Syer (Louga), Tèssékéré (Louga), Loughéré-Thioly (Matam) et Ballou (Tambacounda) sont présentés sur la figure IV.6. Les précipitations simulées arrivent à mettre en évidence le caractère unimodal de la

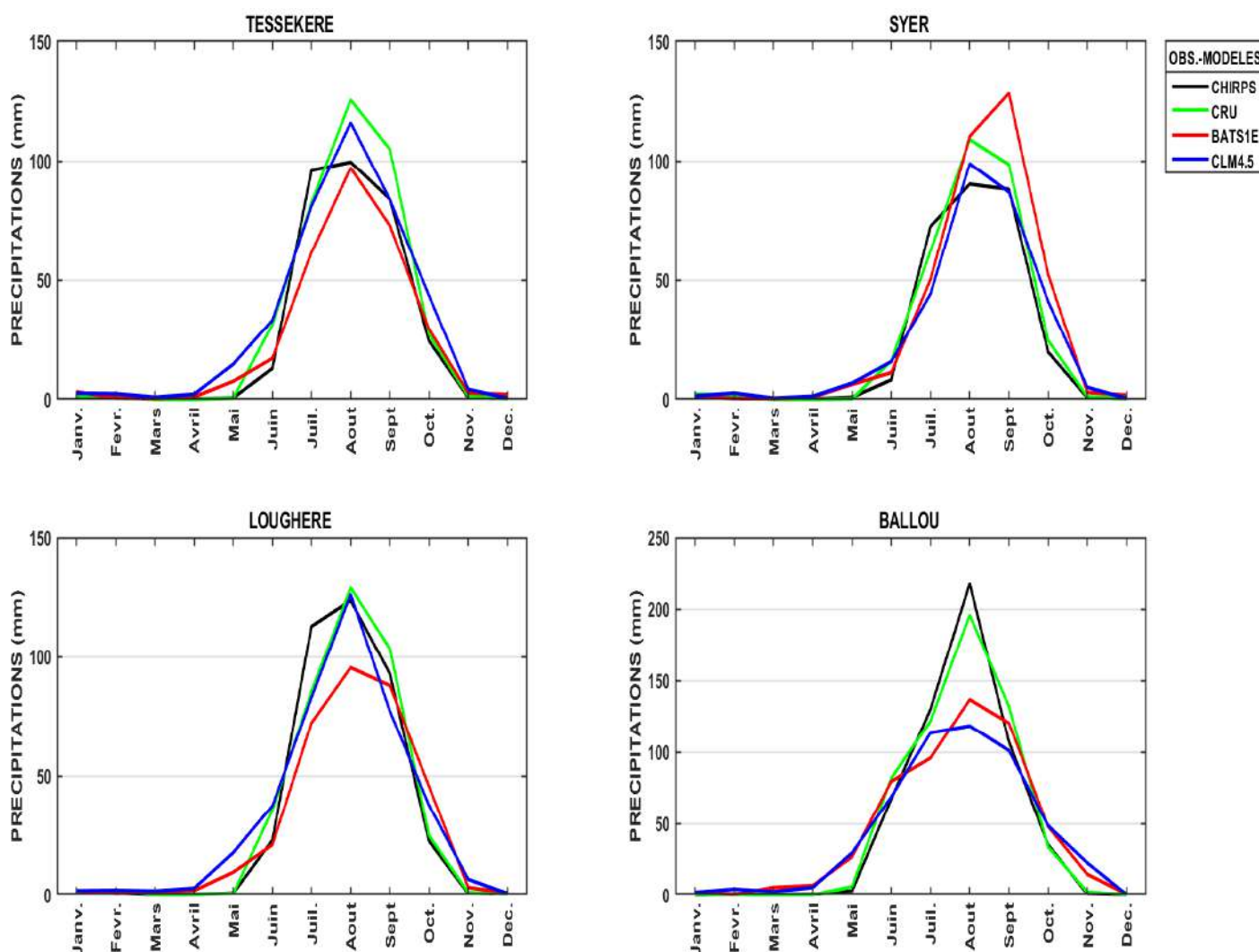


Figure IV.6: Cycle annuel des précipitations dans les localités de Syer, Tèssékéré (Louga), Loughéré-Thioly (Matam) et Ballou (Tambacounda) sur la période 2000-2008.

pluviométrie. Excepté les pluies issues du couplage RegCM-BATSE à Syer, l'ensemble des pics de précipitations est observé en août contre le mois de septembre à Syer.

L'analyse des biais des différentes localités d'étude (Tableau IV.4) indique que les précipitations simulées sont sous-estimées par le modèle RegCM-BATS1E à Téssékéré, Loughéré-Thioly et Ballou. Et le modèle RegCM-CLM4.5 surestime les observations sur les sites de Téssékéré et Loughéré-Thioly. La plus forte valeur de biais surestimée est observée à Syer (8mm) contre une sous-estimation de -4mm à Ballou. Les biais avec les observations sont quasi sous-estimés au cours de la saison de pluie (JJAS). Sauf les saisons de pluie du modèle RegCM-BATS à Syer et RegCM-CLM à Téssékéré qui sont surestimées. Les écarts absolus entre les données simulées et observées pendant la saison humide évoluent dans la plage 5mm à 32mm. Ces biais en valeurs absolues augmentent depuis le mois de juin et atteignent un pic au cours du mois d'août. Après le mois d'août, les biais diminuent. Les divergences soulignées entre les données simulées et les données observées au cours de la saison humide (JJAS) nous informant que les schémas de surface ne sauraient à eux seuls expliquer la pluviométrie de cette saison. En effet au Sahel, 60 à 80% des précipitations sont dues à des lignes de grains et des amas nuageux de grande échelle phénomènes (précipitations non convectives) et non aux phénomènes locaux et convectifs (Wang *et al.*, 2015 ; Kouassi *et al.*, 2022). Cependant, les schémas de surface BATS1E et CLM4.5 arrivent à reproduire le signal annuel et l'évolution saisonnière des pluies de la région d'étude avec des valeurs élevées du coefficient de corrélation (supérieur à 0,93). Les biais des données simulées sont inférieurs de 3% des valeurs du cycle annuel et inférieurs à 6% des pluies JJAS des bases CHIRPS et CRU observées.

Tableau IV.4: Biais, Erreur quadratique moyenne et corrélation des précipitations entre les simulations (BATS, CLM) et des données d'observations (CHIRPS et CRU) pour la période 2000 à 2008.

ANNUEL	Localités											
Comparaison Modèle- Observations	SYER			TESSEKERE			LOUGHERE			BALLOU		
	Biais (mm)	RMSE (%)	COR	Biais (mm)	RMSE (%)	COR	Biais (mm)	RMSE (%)	COR	Biais (mm)	RMSE (%)	COR
BATS-CHIRPS	8,18	6,40	0,93	-1,02	3,24	0,97	-2,36	4,08	0,95	-1,67	4,90	0,94
BATS-CRU	5,42	4,41	0,96	-5,69	3,02	0,99	-2,78	3,29	0,97	-2,66	3,55	0,98
CLM-CHIRPS	2,15	3,8	0,95	6,25	2,97	0,97	1,93	3,22	0,97	-3,62	5,5	0,93
CLM-CRU	-0,62	2,7	0,98	1,58	2,07	0,98	1,51	2,40	0,98	-4,61	4,5	0,96

Ces résultats montrent que le modèle RegCM-NH présente dans l'ensemble de faibles biais de pluie traduisant ainsi la bonne capacité du modèle à simuler la pluviométrie au Sénégal et en particulier dans notre zone d'étude (zone sahélienne). Ces résultats sont en accord avec ceux de [Diba *et al.* \(2016 ; 2019\)](#), [Saley *et al.* \(2016\)](#), [Koné *et al.* \(2018\)](#), [Bamba *et al.* \(2019\)](#) qui ont validé la version hydrostatique du modèle en Afrique de l'Ouest. Dans l'ensemble, le schéma de surface CLM4.5 semble mieux reproduire les données d'observation que la paramétrisation avec le schéma BATS1E. Les coefficients de corrélation entre les résultats de CLM4.5 et les observations sont supérieurs à 0,95 et les RSME sont plus faibles.

Dans la section qui suit, l'impact du reboisement de la GMV sera évalué sur la pluviométrie moyenne, le nombre de jours de pluies, l'humidité relative et l'évapotranspiration des différents sites d'étude et sur l'ensemble du Sénégal. En nous servant des résultats des chapitres 3, 4 et 5 qui ont montré que l'activité de la végétation, l'occupation du sol, et la séquestration de carbone deviennent significatives après 7 à 10 ans de planting, nous évaluerons l'action du reboisement pour les années particulières 2012, 2016, 2020 respectivement 7 ans, 10 ans et 15 ans après le reboisement de la GMV.

IV.2.2. Analyse de l'impact du reboisement de la GMV-Sénégal sur les précipitations

IV.2.2.1. Evaluation de l'impact de la Grande Muraille Verte sur la pluviométrie moyenne au Sénégal

Les figures IV.7 et IV.8 représentent la distribution spatiale des précipitations moyennes des périodes non reboisées et celles des années 2012, 2016 et 2020 (périodes reboisées) pour les deux schémas du modèle et leurs différences. La répartition spatiale de la pluviométrie de la période non reboisée 2000-2008 (Figure IV.7d et IV.8d et Tableau IV.5) simule une distribution de la pluie suivant deux gradients. Les précipitations diminuent de l'intérieur du pays vers les côtes océaniques et le deuxième gradient est une baisse des quantités de pluie du sud vers le nord. Cette distribution spatiale est assez identique à celle des simulations prenant en compte le reboisement de la Grande Muraille Verte (Figure IV.7abc et IV.8abc). L'analyse de l'évolution des pluies entre les périodes reboisées et non reboisées (Figure IV.7efg et IV.8efg) montre que le reboisement de la GMV a tendance à accroître les quantités de pluie sur presque tout le Sénégal. Les fortes augmentations sont obtenues au sud, à l'est et au centre du pays. Les résultats des différentes simulations montrent que le reboisement serait un facteur qui

ferait augmenter les précipitations aussi bien dans les régions reboisées et que dans les régions lointaines. Ce résultat est cohérent avec les travaux d'[Abiodun et al. \(2012\)](#), [Diba et al. \(2016 ; 2017 ; 2018\)](#), [Saley et al. \(2016\)](#) et [Bamba et al. \(2019\)](#) qui ont montré que le reboisement dans une zone peut impacter les précipitations aussi bien localement que dans les régions environnantes.

Tableau IV.5: Statistiques moyennes annuelles de l'évolution des précipitations sur les périodes 2000-2020, avant et après reboisement des localités de la GMV-Sénégal avec le test de comparaison de moyennes de Student aux seuils $\alpha=0,05(*)$ et $\alpha=0,01(**)$.

LOCALITE	Précipitations moyennes annuelles (mm)	PERIODES						Différence
		Moyenne 2000-2020	2012	2016	2020	Moyenne Avant reboisement	Moyenne Après reboisement	
TESSEKERE (LOUGA)	BATSE	258,75	306,00	265,66	240,50	250,87	265,84	14,97
	CLM4.5	315,25	369,83	313,40	340,74	293,01	335,27	42,26**
SYER (LOUGA)	BATSE	266,49	315,89	253,80	261,07	280,88	253,55	-27,33*
	CLM4.5	244,23	298,95	232,41	255,32	226,49	260,20	33,70*
LOUGHERE-THIOLY (MATAM)	BATSE	328,42	420,74	312,79	264,63	318,29	337,56	19,26
	CLM4.5	331,89	411,04	310,95	323,19	310,35	351,27	40,91*
BALLOU (TAMBACOUNDA)	BATSE	403,90	475,81	501,30	384,58	368,09	436,13	68,04*
	CLM4.5	456,35	551,47	590,67	4013,26	400,76	506,38	105,62*

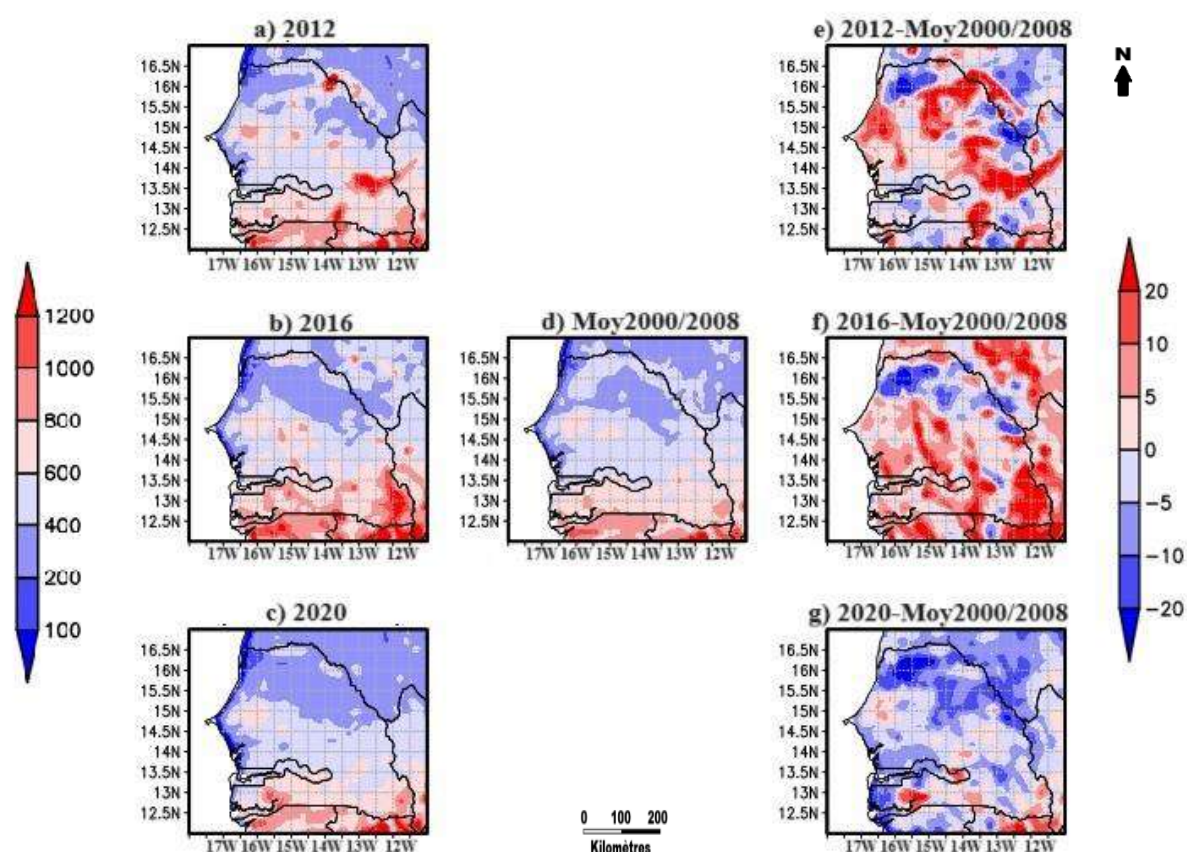


Figure IV.7: Précipitations moyennes annuelles (mm) RegCM-BATSE sur le Sénégal en : a) 2012, b) 2016, c) 2020, d) moyenne 2000-2008, et évolutions entre les années e) 2012, f) 2016, g) 2020 et la période non reboisée.

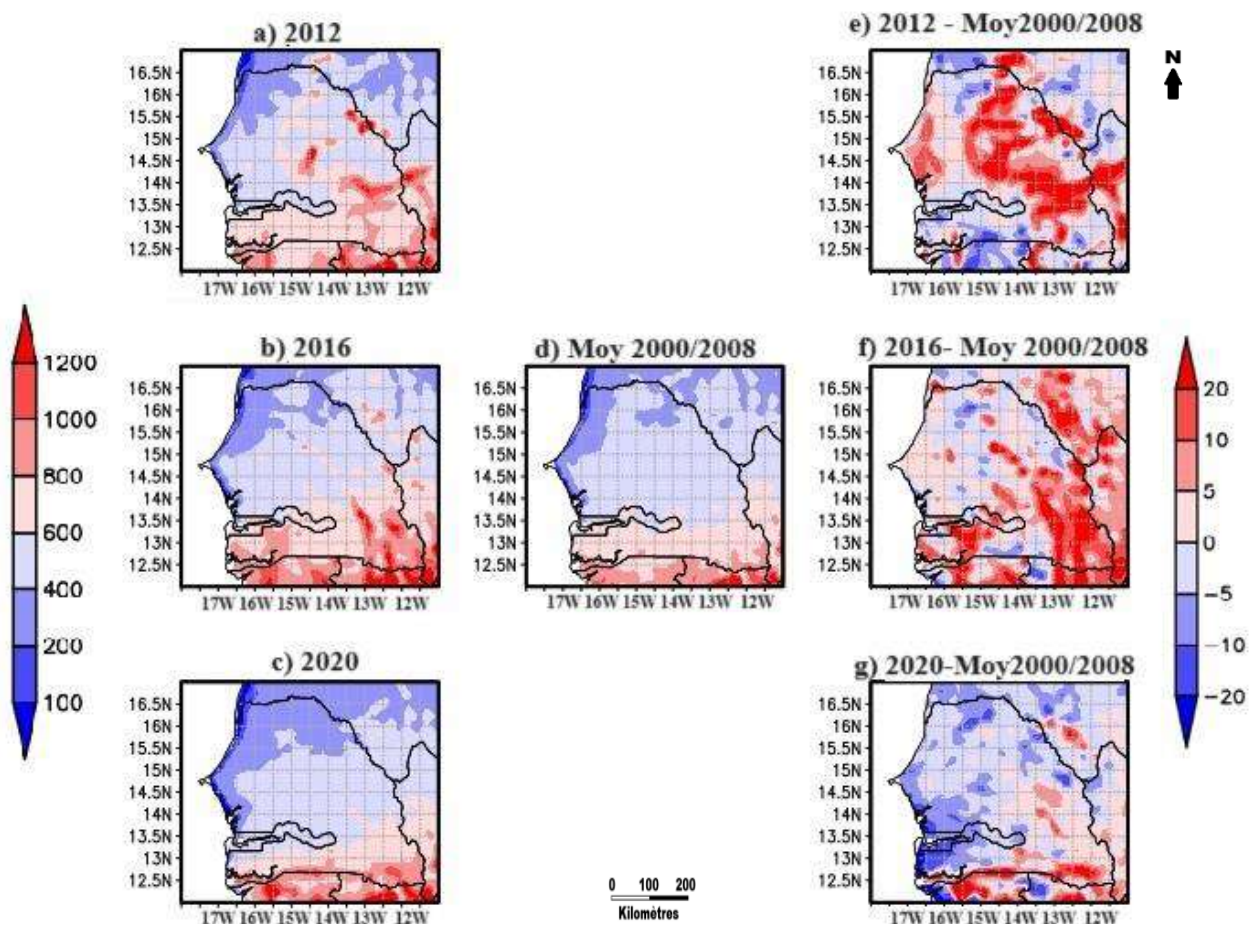


Figure IV.8: Précipitations moyennes annuelles (mm) RegCM-CLM4.5 sur le Sénégal : a) 2012, b) 2016, c) 2020, d) moyenne 2000-2008, et évolutions entre les années e) 2012, f) 2016, g) 2020 et la période non reboisée.

IV.2.2.2. Analyse de la dynamique du nombre de jours pluvieux au Sénégal et dans la zone de la GMV

L'estimation du nombre de jours de pluie est d'un grand intérêt pour la mise en place des politiques de gestion des différents sites et aussi un élément clé pour les activités agricoles par exemple. Pour ce faire, les impacts de la GMV ont été étudiés en utilisant trois (3) indices d'évaluation de la qualité de la pluviométrie. Ces indices climatiques sont connus pour leurs grands impacts sur la disponibilité des ressources en eau et la productivité agricole.

Les deux versions du modèle simulent une forte fréquence des jours pluvieux au sud, au sud-est et au centre du Sénégal (Figure IV.9.abcd). On observe également un gradient nord-sud avec une diminution du nombre d'événements pluvieux du sud vers le nord (Figure IV.9a, b, c, d). L'analyse de la différence entre les périodes au cours desquelles il y a eu reboisement et non

reboisement des deux simulations montre que la GMV tend à faire augmenter le nombre de jours pluvieux au sud, à l'est et au centre du Sénégal (Figure IV.9efg).

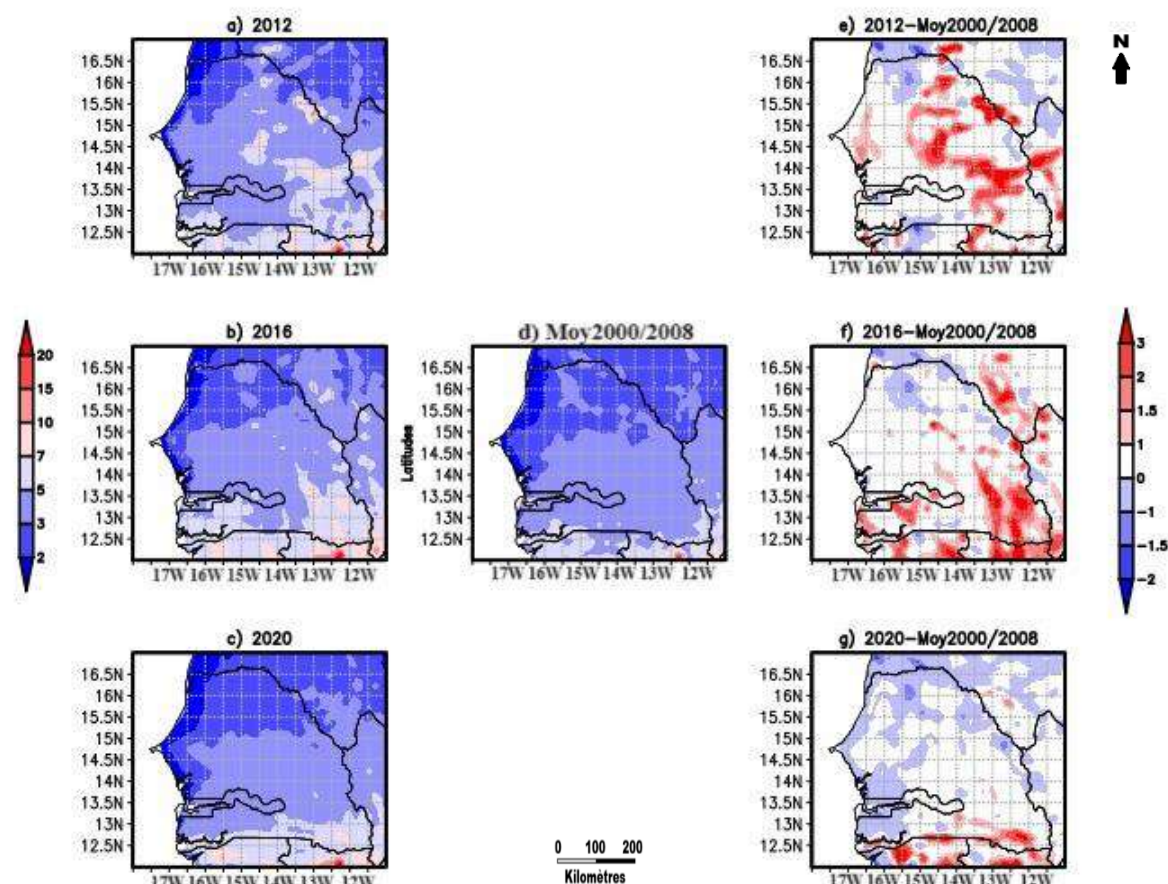


Figure IV.9: Nombre de jours de pluies très intenses (R20mm, RegCM-CLM4.5) moyennes pour les années et périodes : a) 2012, b) 2016, c) 2020, d) moyenne 2000-2008, et évolutions entre les années e) 2012, f) 2016, g) 2020 et la période non reboisée (avec test de Student avec une confiance de 95%).

La figure IV.10 montre les évolutions et les tendances du nombre de jours pluvieux (R1mm), du nombre de jours de pluies intenses (R10mm) et le nombre de jours de pluies très intenses (R20mm) dans les localités de Syer, Téssékéré, Loughéré-Thioly et Ballou pour la simulation RegCM-CLM4.5. Une tendance générale à la hausse des jours pluvieux est observée sur les quatre localités.

Pour la simulation RegCM-CLM4.5, les localités qui enregistrent le nombre moyen de jours pluvieux par ordre d'importance sont Ballou (18.4 jours/an), Loughéré-Thioly (16.2 jours/an), Téssékéré (14.7 jours/an) et Syer (11.4 jours/an) à Syer. Cette évolution suit un gradient est vers le nord-ouest. L'année 2012 est la plus pluvieuse avec (18 jours en moyenne) et l'année 2007 la moins pluvieuse (13 jours en moyenne). Pris individuellement, la localité de Syer

compte 9 jours de pluie en 2007 pour l'année la moins pluvieuse et un record de 13 jours en 2005 et 2012. À Ballou l'année la moins pluvieuse se situe en 2002 et la plus pluvieuse en 2012 avec 21 jours. Tèssékéré et Loughéré-Thioly marquent les même dates pluvieuses et moins pluvieuses respectivement 2012 (17 jours Tèssékéré et 18 jours Loughéré-Thioly) et 2007 (12 jours à Tèssékéré et 14 jours à Loughéré).

Les indices de jours de pluies intenses (R10mm) et le nombre de jours de pluies très intenses (R20mm) suivent la même évolution que l'indice R1mm. La localité de Ballou dans la région est du Sénégal compte le plus grand nombre de jours de pluies intenses et de jours de pluies très intenses, s'en suit Loughéré-Thioly (Matam), Tèssékéré et Syer au nord-ouest (Louga). L'on note également une tendance générale à la hausse du nombre de jours de pluies intenses et du nombre de jours très intenses dans les quatre zones étudiées (Figure IV.9).

Les tableaux IV.6 et IV.7 présentent respectivement les statistiques moyennes annuelles des indices de précipitations (R1mm, R10mm, R20mm) sur les périodes 2000-2020, 2000-2008 et la période avec prise en compte du reboisement dans les localités de la GMV-Sénégal. Les indices de précipitation présentent une hausse du décompte des jours pluvieux à très pluvieux après reboisement. Ces gains sont supérieurs à plus de 1 jour sur l'ensemble des sites étudiés. L'application du test de Student montre que la différence entre les moyennes des indices de pluie après reboisement est significative.

Tableau IV.6: Statistiques moyennes annuelles de l'évolution du nombre de jours de pluie (RegCM-CLM4.5) des périodes 2000-2020, non reboisée et reboisée avec le test de comparaison de moyennes de Student aux seuils $\alpha=0,05(*)$ et $\alpha=0,01(**)$.

LOCALITES	Indices de pluies CLM4.5	PERIODES						Différence
		2000-2020	2012	2016	2020	Moyenne Avant reboisement	Moyenne Après reboisement	
TESSEKERE	R1mm	14,74	16,91	14,44	15,00	14,16	15,17	1,01**
	R10mm	8,79	10,73	8,60	9,22	8,13	9,29	1,16**
	R20mm	6,36	7,84	8,64	5,80	5,3	7,35	2,05**
SYER	R1mm	11,44	13,15	10,33	11,83	10,97	11,81	0,84*
	R10mm	6,57	7,68	5,75	7,00	6,17	7,91	1,74*
	R20mm	4,31	5,11	4,00	4,84	3,91	4,64	0,73*
LOUGHERE-THIOLY	R1mm	16,16	17,66	16,79	17,27	15,42	16,71	1,29**
	R10mm	9,12	10,24	9,09	10,18	8,62	9,63	1,01**
	R20mm	5,77	6,70	5,91	6,54	5,18	6,23	1,05**
BALLOU	R1mm	18,39	20,76	19,43	19,32	17,42	19,12	1,7**
	R10mm	11,23	13,15	11,12	11,44	10,7	11,74	1,04**
	R20mm	6,88	7,62	6,23	7,67	6,43	7,23	0,80**

Tableau IV.7: Statistiques moyennes annuelles de l'évolution du nombre de jours de pluie (RegCM-BATS1E) des périodes 2000-2020, non reboisée et reboisée avec le test de comparaison de moyennes de Student aux seuils $\alpha=0,05(*)$ et $\alpha=0,01(**)$.

LOCALITES	Indices de pluies BATS1E	PERIODES						Différence
		2000-2020	2012	2016	2020	Moyenne Avant reboisement	Moyenne Après reboisement	
TESSEKERE	R1mm	12,36	13,27	12,30	12,71	12,18	12,49	0,31
	R10mm	7,62	9,72	7,81	7,17	7,23	7,92	0,69
	R20mm	4,371	5,00	4,52	3,89	4,22	4,48	0,26
SYER	R1mm	14,06	15,31	15,53	11,51	14,33	13,63	-0,70
	R10mm	9,86	10,01	10,44	9,32	10,32	9,46	-0,86
	R20mm	6,68	6,20	7,12	5,93	7,4	6,11	-1,29**
LOUGHERE-THIOLY	R1mm	16,16	17,64	17,42	17,27	15,42	16,70	1,10*
	R10mm	9,19	10,33	9,12	10,09	8,62	9,63	1,01**
	R20mm	5,78	6,72	5,93	6,54	5,18	6,23	1,05**
BALLOU	R1mm	18,15	20,93	18,64	18,52	17,62	18,55	0,93*
	R10mm	11,63	14,12	12,35	12,00	10,82	12,24	1,42**
	R20mm	6,66	8,71	7,40	7,92	5,98	7,17	1,19**

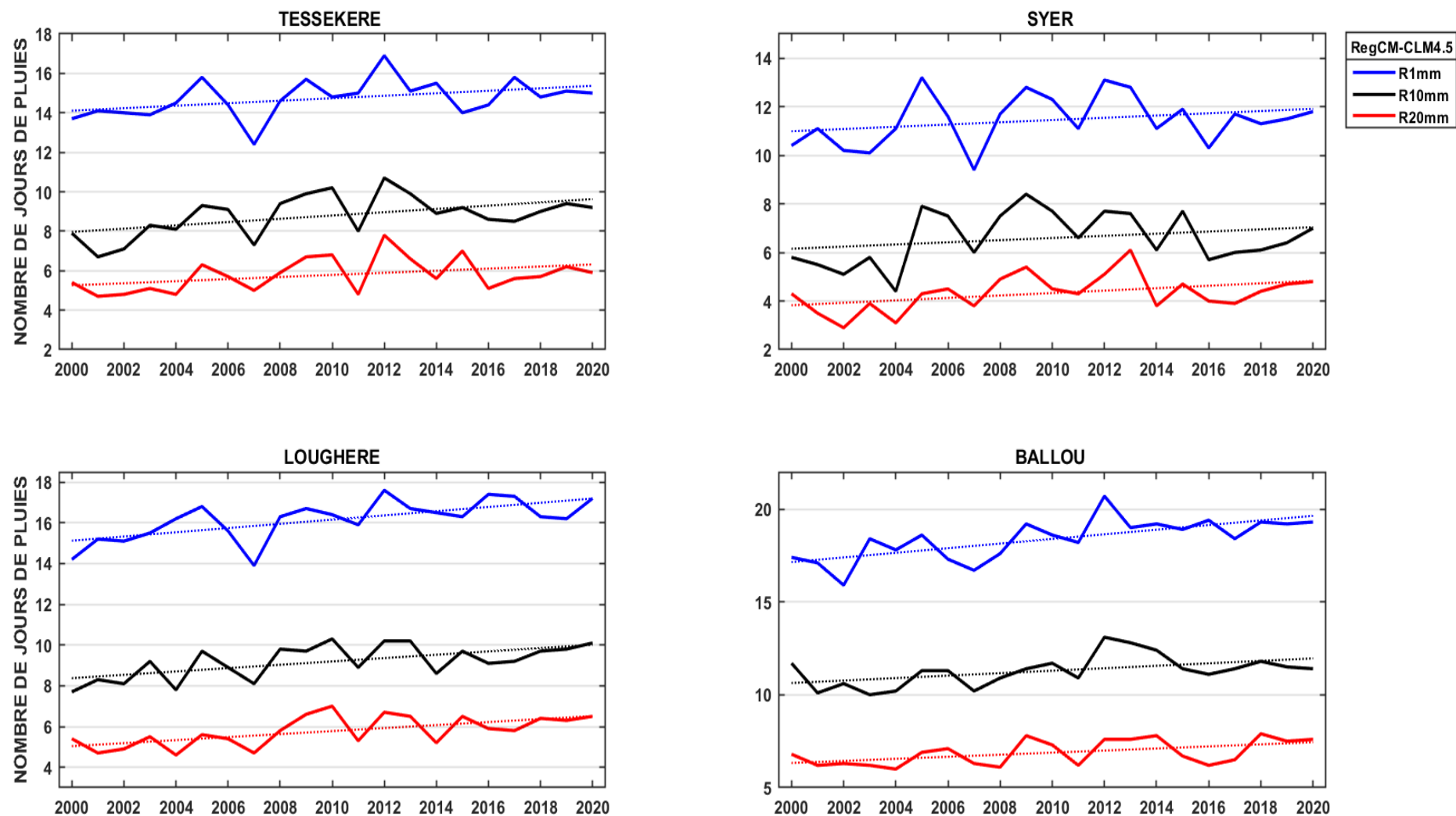


Figure IV.10: Evolutions et tendances des jours de pluie (R1mm, R10mm, R20mm) pour les localités de Syer, Tèssékéré (Louga), Loughéré-Thioly (Matam) et Ballou (Tambacounda) de 2000 à 2020 pour la simulation RegCM-CLM4.5

IV.2.3. Evaluation de l'impact de la Grande Muraille Verte sénégalaise sur l'humidité relative et l'évapotranspiration

La variation spatiale de la pluviométrie étant fonction de la disponibilité de la vapeur d'eau dans l'atmosphère, nous avons calculé et représenté l'évolution spatiotemporelle de l'évapotranspiration et de l'humidité de l'air au Sénégal et sur nos sites d'étude.

IV.2.3.1. Impact de la Grande Muraille Verte sénégalaise sur l'humidité relative

Les figures IV.11 et IV.12 représentent la distribution spatiale de l'humidité relative moyennée sur les périodes avant reboisement (2000-2008), et après reboisement (2012, 2016, 2020 et la moyenne de la période reboisée) pour les différentes paramétrisations du modèle et leurs différences. Les simulations réalisées au cours de la période 2000-2008 (Figure IV.11d et IV.12a) font apparaître une distribution zonale et méridienne de l'humidité de l'air et présentent de fortes valeurs d'humidité à l'ouest et au sud du pays. Les faibles valeurs sont modélisées au nord et nord-est du Sénégal. Les simulations sur les périodes après reboisement, reproduisent bien cette distribution de l'humidité relative (Figures IV.11abc et IV.12b). Les deux versions du modèle simulent un gradient zonal et méridien de l'humidité qui diminue de l'ouest vers l'est et du sud vers le nord. L'impact de la reforestation de la GMV se manifeste par une augmentation de l'humidité de l'air sur presque tout le Sénégal (Figures IV.11c et IV.12c). Cette hausse est plus marquée au SE et sur la trace de la GMV du pays comparé aux localités situées près de l'océan Atlantique. Sur le littoral Sénégalais, la différence de l'humidité entre les périodes reboisées et non reboisées est moins importante et souvent négative. Le gain d'humidité observé peut être due à l'augmentation de la longueur de rugosité du sol due au reboisement de la GMV. En effet un renforcement de la longueur de rugosité entraîne une augmentation de la turbulence dans la couche limite et favorise une augmentation du transport de l'humidité dans l'atmosphère ([Giannini et al., 2010](#) ; [Saley et al., 2016](#)).

Tableau IV.8: Statistiques moyennes annuelles de l'évolution de l'humidité relative (CLM4.5 et BATSIE) des périodes 2000-2020, avant et après reboisement avec le test de comparaison de moyennes de Student aux seuils $\alpha=0,05(*)$ et $\alpha=0,01(**)$.

LOCALITES	Humidité Relative annuelles (%)	PERIODES						Différence
		2000-2020	2012	2016	2020	Non reboisée	Reboisée	
TESSEKERE	BATSE	48,66	54,17	53,47	53,71	42,48	53,29	10,82**
	CLM4.5	34,55	36,15	34,70	36,24	33,85	35,07	1,22*
SYER	BATSE	50,78	55,30	54,92	56,04	45,19	54,98	9,79**
	CLM4.5	38,03	39,47	38,32	37,15	37,77	38,22	0,45
LOUGHERE-THIOLY	BATSE	48,16	53,30	52,61	52,33	42,68	52,26	9,58**
	CLM4.5	35,19	37,13	35,76	34,42	34,62	35,62	1
BALLOU	BATSE	51,21	53,99	52,95	53,42	49,27	52,68	3,4**
	CLM4.5	35,66	38,30	36,52	36,99	34,361	36,64	2,28

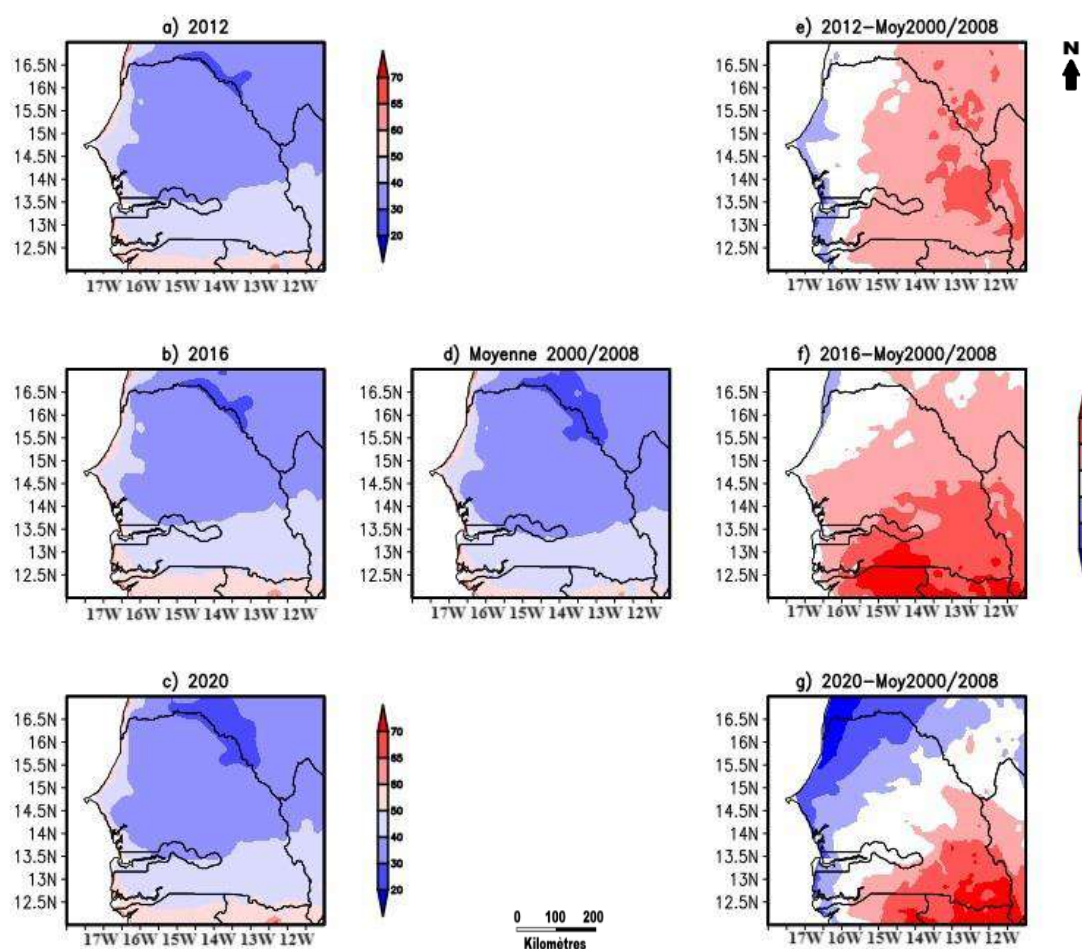


Figure IV.11: Humidité relative moyenne annuelle (%) RegCM-CLM4.5 sur le Sénégal : a) 2012, b) 2016, c) 2020, d) moyenne 2000-2008, et évolutions entre les années e) 2012, f) 2016, g) 2020 et la période non reboisée.

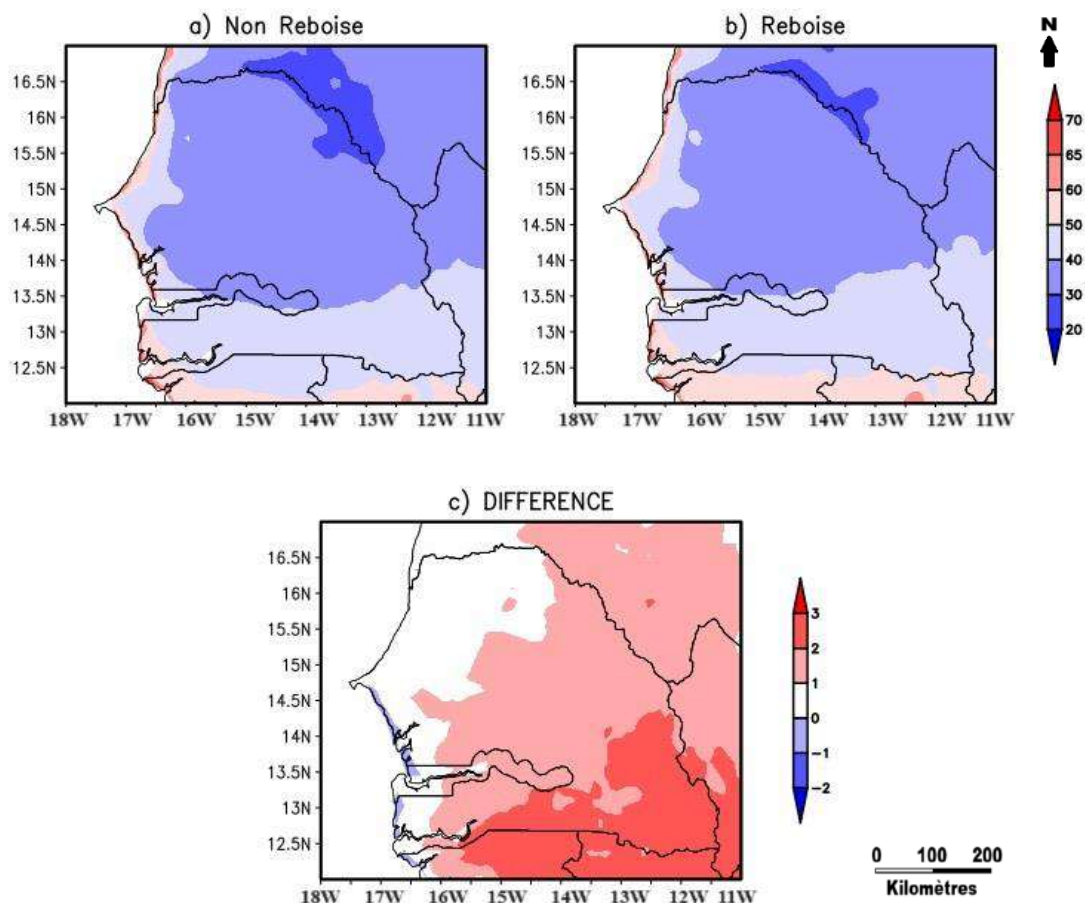


Figure IV.12: Humidité relative moyenne (%) pour les périodes : a) période avant reboisement, b) après reboisement, et c) différence entre les périodes avant et après reboisement, pour RegCM-CLM4.5.

IV.2.3.2. Impact de la Grande Muraille Verte sénégalaise sur l'évapotranspiration

Les différents cumuls moyens annuels de l'évapotranspiration pour les périodes avant et après reboisement sont représentées sur la figure IV.13 et le tableau IV.9 pour les deux simulations. Ces simulations montrent dans l'ensemble une structure zonale de l'évapotranspiration avec des valeurs maximales situées au sud et à l'ouest du pays et sur les côtes Sénégalaises. Les valeurs minimales de l'évapotranspiration sont enregistrées au nord-est du pays (Figure IV.13 a, b, c, d). Cette structure zonale de l'évapotranspiration suit deux gradients : un gradient zonal d'est vers l'ouest marqué par une augmentation de l'évapotranspiration. Et un second gradient méridien avec diminution des valeurs de l'évapotranspiration du sud vers le nord. La simulation RegCM-BATS1E de la période reboisée montre également de forte valeur d'évapotranspiration sur la zone reboisée de la GMV. L'action de la Muraille Verte Sénégalaise tend à augmenter l'évapotranspiration presque dans tout le pays, surtout dans les parties centre et est du pays (Figures IV.13efg). Les cartes d'évolution

entre ces deux périodes (Figure IV.14) et le tableau des statistiques de l'évaporation (Tableau IV.9) indiquent une forte tendance à la hausse et significative de ce paramètre. Sur nos différentes communes, les gains en eau reçu par l'atmosphère sont de +25mm à +62mm avec le schéma CLM4.5 et de +69mm à +132mm pour BATSE.

L'augmentation de l'évapotranspiration sur le Sénégal pourrait s'expliquer par l'augmentation des indices de végétation du modèle (notamment l'indice foliaire) sous l'action de la reforestation de la GMV. En effet, l'indice foliaire contribue positivement aux rétroactions dynamiques en recyclant l'humidité (Giannini *et al.*, 2010 ; Saley *et al.*, 2016), et l'augmentation de la convergence d'humidité contribuent à l'augmentation des précipitations.

Tableau IV.9: Statistiques moyennes annuelles de l'évolution de l'évapotranspiration (CLM4.5 et BATS1E) des périodes 2000-2020, avant et après reboisement avec le test de comparaison de moyennes de Student aux seuils $\alpha=0,05(*)$ et $\alpha=0,01(**)$.

LOCALITES	Evapotranspiration annuelles (mm)	PERIODES						Différence
		2000-2020	2012	2016	2020	Avant reboisement	Après reboisement	
TESSEKERE	BATSE	621,67	688,27	673,50	690,87	546,01	678,41	132,40**
	CLM4.5	341,47	389,94	326,28	346,87	324,00	354,57	30,57*
SYER	BATSE	689,11	747,51	729,30	762,70	618,29	742,23	123,94**
	CLM4.5	265,03	319,10	255,07	289,74	247,25	278,37	31,11
LOUGHERE- THIOLY	BATSE	660,57	697,99	680,09	688,54	620,88	690,33	69,45**
	CLM4.5	346,03	405,61	324,74	352,28	331,46	356,96	25,49
BALLOU	BATSE	757,84	791,51	799,67	789,02	716,52	788,84	72,32**
	CLM4.5	442,59	503,73	469,10	443,82	407,18	469,15	61,97

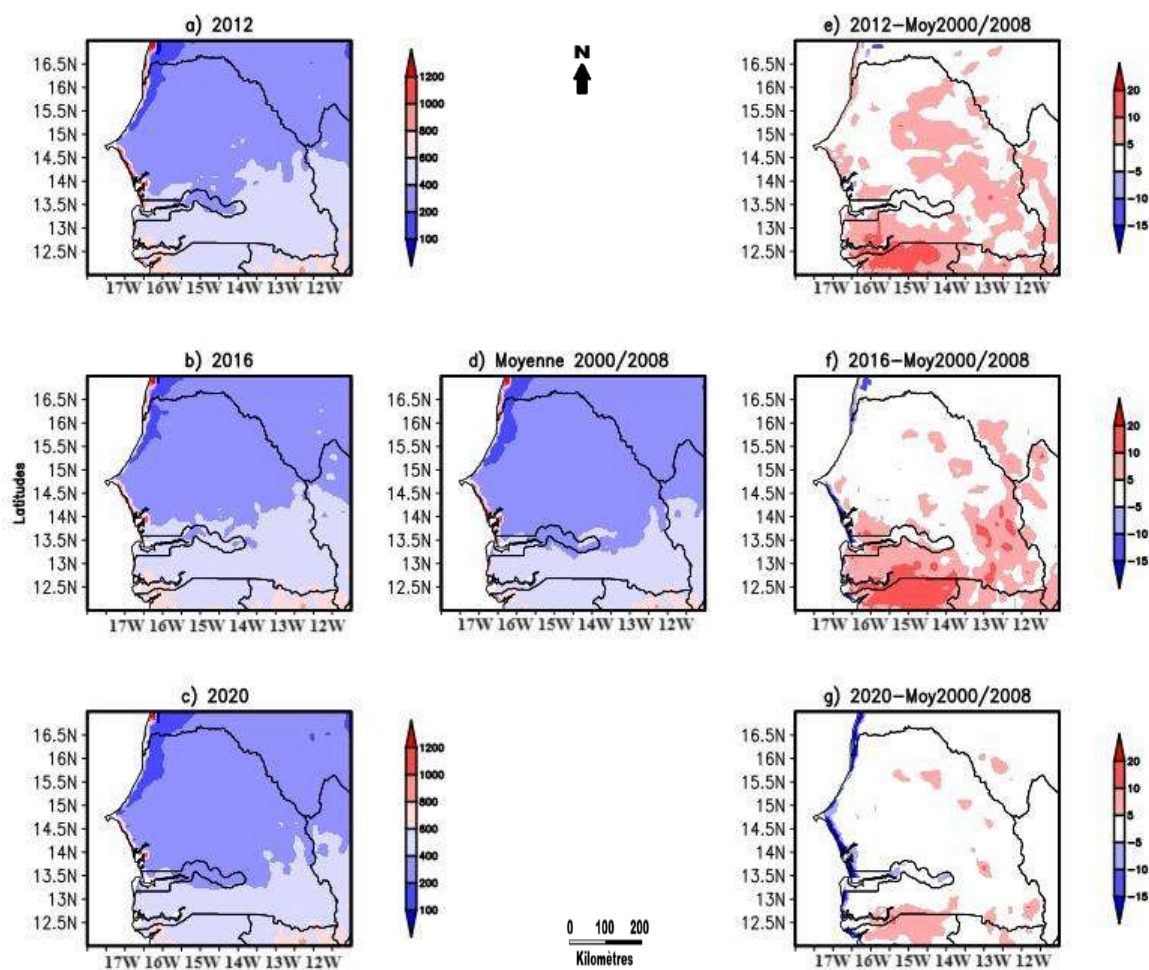


Figure IV.13: Evapotranspiration moyenne annuelle (mm) RegCM-CLM4.5 sur le Sénégal : a) 2012, b) 2016, c) 2020, d) moyenne 2000-2008, et évolutions entre les années e) 2012, f) 2016, g) 2020 et la période non reboisée.

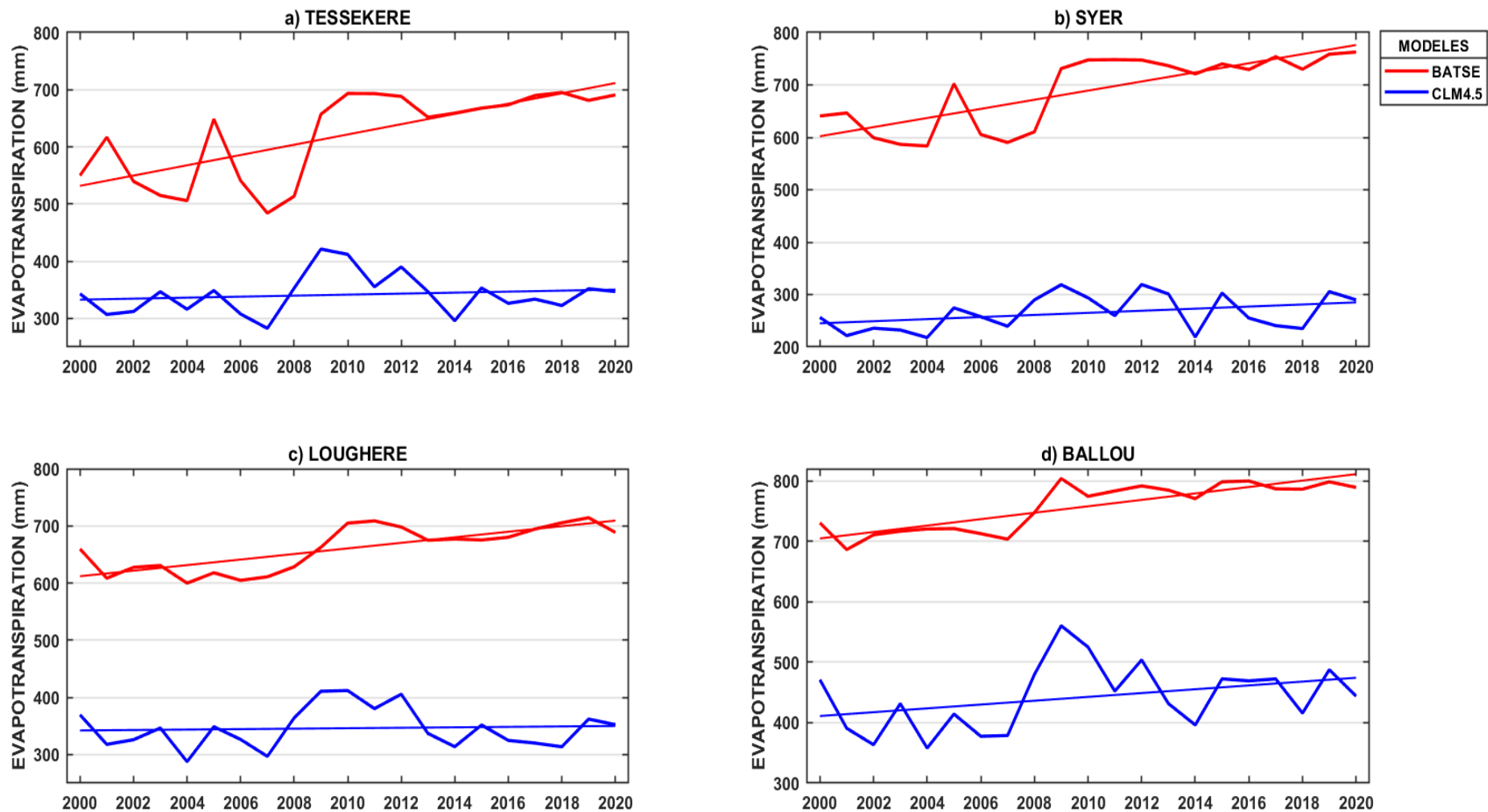


Figure IV.14: Evolutions et tendances de l'évapotranspiration moyenne annuelle (mm) pour les localités de Syer, Tèssékéré (Louga), Loughéré-Thioly (Matam) et Ballou (Tambacounda) de 2000 à 2020 pour les simulations RegCM-CLM4.5 et RegCM-BATS1E

L'augmentation de la pluviométrie sur nos sites d'étude et sur l'ensemble du Sénégal pourrait s'expliquer en partie par l'augmentation de l'humidité relative et de l'évapotranspiration dans les régions traversées par la GMV. La dynamique à la hausse des événements pluvieux est en partie liée à l'humidité relative de l'air et l'évapotranspiration sur la zone reboisée. Les différentes simulations avec la prise en compte du reboisement de la GMV sur la période après reboisement tendent également à faire augmenter les précipitations de manière cohérente avec le renforcement de l'évapotranspiration et de la teneur en eau de l'atmosphère. Cette analyse confirme les résultats des études de [Sylla *et al.* \(2016\)](#), [Diba *et al.* \(2018\)](#), [Bamba *et al.* \(2019\)](#) qui ont montré que les régions du Sahel étaient plus sensibles par la présence de forêts, de hautes herbes et de savanes à herbes courtes que les régions du Golfe de Guinée.

L'analyse des résultats sur le nombre de jours de pluie montre une tendance générale à la hausse de tous ces indices au cours de la période 2000–2020. Ces résultats sont en accord avec ceux de [Diba *et al.* \(2021\)](#) au Sénégal. Cependant, les travaux de [Gbode *et al.* \(2015\)](#) à Kano (Nigéria) indiquent une diminution du nombre maximal de jours consécutifs humides entre 1960 et 2007. Et les résultats de [Touré *et al.* \(2017\)](#) ont également montré une diminution du nombre maximal de jours consécutifs humides à Bamako et Ségou au Mali de 1961 à 2014. Ces résultats sont contraires à ceux observés dans la zone de la GMV. Ces divergences d'observation de l'évolution des indices de pluie au Sahel, confirment donc la contribution du reboisement à l'amélioration de la pluviométrie au Sénégal.

IV.2.4. Evaluation des performances des différentes simulations RegCM-CLM4.5 et RegCM-BATS1E

Après avoir validé le modèle RegCM-NH à simuler la climatologie des précipitations sur notre zone d'étude (période avant reboisement 2000-2008), nous nous intéresserons dans ce point à évaluer les performances de nos différentes simulations. Il s'agira d'analyser la capacité des simulations RegCM-CLM4.5 et RegCM-BATS1E à reproduire l'évolution interannuelle des paramètres climatiques (Précipitations et Evapotranspiration) sur la période allant de 2000 à 2020. Ces données de simulations seront comparées aux données d'observations des précipitations CHIRPS et d'évapotranspiration réelle GLEAM.

Le tableau IV.10 résume les coefficients de corrélation et les écarts quadratiques moyens des précipitations et de l'évapotranspiration annuelles pour les données simulées et observées.

L'analyse des séries de précipitations simulées (BATS et CLM4.5) et observée (CHIRPS) se présente comme suit :

À Syer, le schéma de surface BATS a un écart quadratique moyen (RMSE) de 63,26 contre 39,71 pour CLM4.5 et une corrélation non significative de 26,84% contre 78,34 pour CLM4.5. Tébékéré présente les mêmes observations que la localité de Syer. Pour Loughéré-Thioly, les simulations sont sensiblement identiques, avec des RMSE du mêmes ordres (55,87 pour BATS et 53,56), les coefficients de corrélation sont respectivement de 65,29% et 67,53% pour BATS et CLM4.5. Avec une corrélation de 61,78% et un RMSE de 64,87, le schéma BATS est plus performant que CLM4.5 (corrélation de 45,11% et RMSE de 96,45) dans la localité de Ballou.

Tableau IV.10: Erreur quadratique moyenne et corrélation des précipitations et évapotranspiration réelle entre les simulations (BATS, CLM) et des données d'observations (CHIRPS et GLEAM) pour la période 2000-2020.

	LOCALITES	SYER		TESSEKERE		LOUGHERE		BALLOU	
Paramètres	Comparaison Modèle-Observations	RMSE (mm)	COR (%)	RMSE (mm)	COR (%)	RMSE (mm)	COR (%)	RMSE (mm)	COR (%)
PLUIE	BATS-CHIRPS	63,26	26,84	66,98	35,56	55,87	65,29	64,87	61,79
	CLM-CHIRPS	39,71	78,34	48,33	67,10	53,56	67,53	96,45	45,11
ETR	BATS-GLEAM	69,98	19,11	49,57	79,00	37,55	60,88	39,34	41,66
	CLM-GLEAM	38,78	47,05	37,74	55,31	41,25	52,00	54,92	31,61

Dans les localités de Syer, Tébékéré et Loughéré-Thioly, le modèle RegCM-NH couplé avec le schéma de surface CLM4.5 présente une meilleure performance (RMSE moyen de 47,2 et des corrélations de 67,5% à 78,3%) à reproduire les précipitations de la période 2000-2020. Par contre, le schéma BATS l'emporte dans la localité de Ballou.

La performance du schéma CLM4.5 à reproduire l'évolution des précipitations sur les sites de la GMV du Sénégal peut s'expliquer par une formulation plus détaillée et élaborée des cartes de végétation du sol à 5 unités terrestres, 17 types fonctionnels de représentation de la végétation sur le domaine étudié (Reynolds, 2010). Cependant, la faible performance observée à Ballou pourrait être due à l'absence de reboisement et un couvert qui continue à se dégrader (Chapitre III). L'étude réalisée par Kouassi *et al.* (2022) sur l'Afrique de l'Ouest indique que les performances sont mitigées concernant ces deux schémas de surface. En effet, ces performances varient d'une zone à l'autre et sont égales dans certaines régions.

La comparaison des données de l'ETR simulée et de l'ETR observée de la base GLEAM montre des performances qui varient d'un site à un autre et d'un schéma de surface à un autre (Figure IV.15 et Tableau IV.10). Dans les localités de Loughéré-Thioly et Téssékéré, le schéma BATS présente respectivement des corrélations de 79,00% et 60,88% avec les observations ETR-GLEAM. Pour CLM4.5, les coefficients de corrélations sont de 52,00% et 55,31% respectivement pour Loughéré-Thioly et Téssékéré. Cependant dans les localités de Syer et Ballou, les différents schémas sont peu performants à reproduire l'évolution interannuelle de l'ETR observées. À Syer, les corrélations sont non significatives et valent 19,11% pour BATS et 47,05% pour CLM4.5. Et à Ballou, les corrélations sont de 41,66% et 31,61 respectivement avec BATS et CLM4.5.

Dans la zone reboisée de la GMV, le modèle RegCM couplé avec le schéma BATS reproduit le mieux les observations de l'évapotranspiration avec une surestimation des valeurs. La faible relation entre les données de ETR simulées et observées dans la localité de Ballou pourrait s'expliquer par l'absence de reboisement dans cette zone durant la période 2000-2020 (Voir Chapitre III).

Dans l'ensemble, les deux simulations reproduisent assez bien la climatologie des précipitations au Sénégal et sur notre zone d'étude. Cependant, la simulation CLM4.5 simule le mieux l'évolution temporelle des précipitations des sites reboisés de la GMV que le schéma BATS. Par contre la simulation avec le schéma de surface BATS, bien que surestimant l'évapotranspiration, offre une meilleure performance que CLM4.5. Ces conclusions sont conformes avec les résultats de [Chung *et al.* \(2018\)](#) sur l'Asie du Sud-Est.

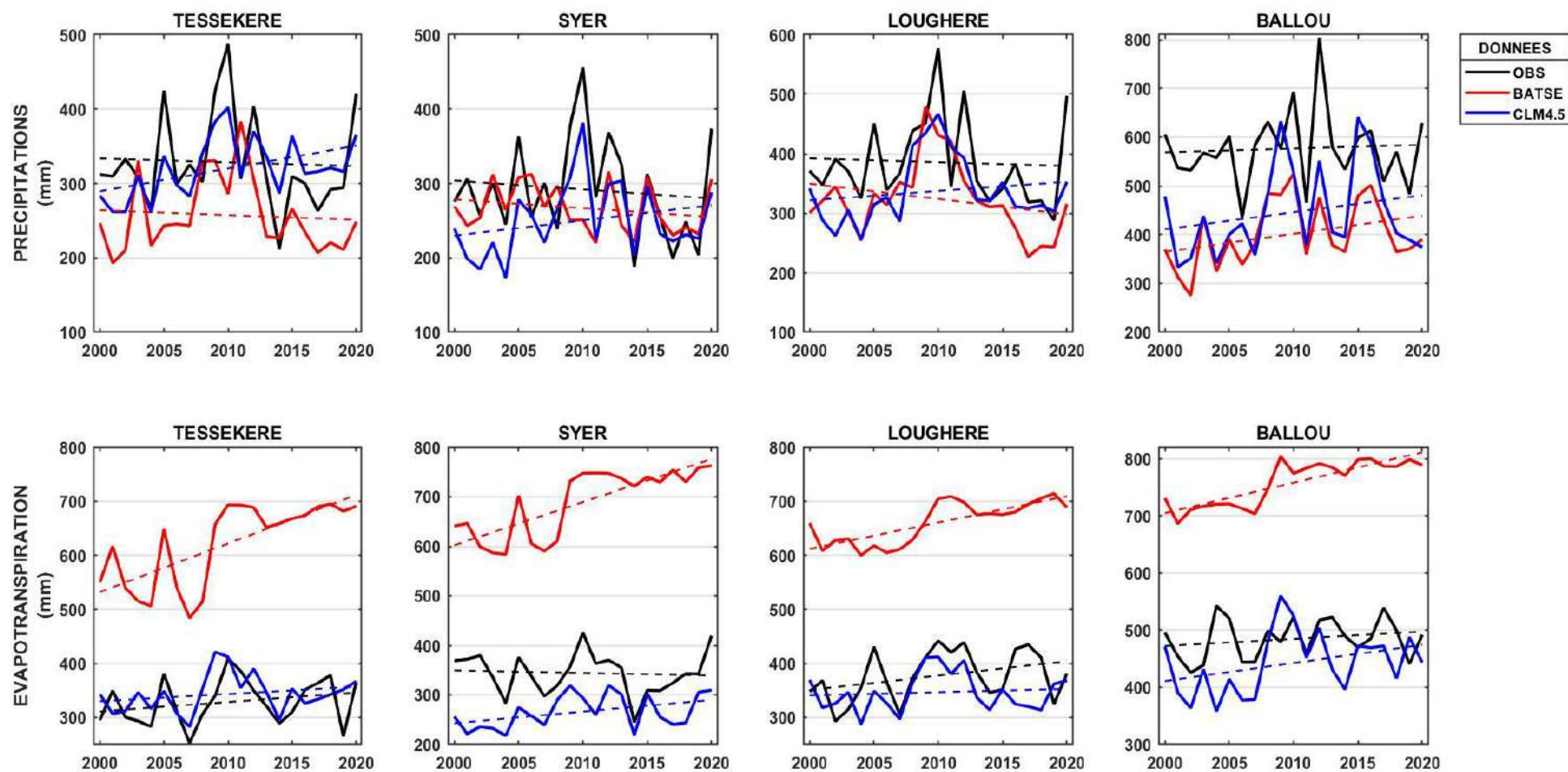


Figure IV.15: Evolutions et tendances des précipitations et évapotranspiration annuelles des données observations (CHIRPS, GLEAM) et simulées (RegCM-BATSE et RegCM-CLM4.5) des localités de la GMV sur la période 2000-2020

IV.2.5. Synthèse

Dans cette section, nous avons réalisé deux expériences de simulation avec la version non-hydrostatique du modèle régional de climat RegCM4.7 couplés avec différents schémas de surface (BATS1E et CLM4.5) sur une durée de 21 ans (2000-2020) avec une résolution spatiale de 10 km. L'objectif était d'évaluer la contribution de la reforestation du Sahel Sénégalais sur le climat des zones traversées par GMV et le climat du Sénégal en général. Les différentes expériences étaient subdivisées en deux (2) périodes (avant et après reboisement). La première période avant reboisement était modélisée avec la version standard de l'occupation du sol c'est-à-dire herbe courte, steppe. Au cours de la période reboisée, la Grande Muraille Verte a été simulée par le remplacement de l'occupation standard du sol par un couvert mixte (d'arbre, d'arbuste et d'herbe) sur la trace réelle de GMV Sénégalaise.

Avant d'interpréter les différents résultats des simulations, nous avons évalué les performances du modèle à reproduire le climat du Sénégal en comparant les résultats avec les données de précipitations CHIRPS et données du CRU sur la période 2000-2008. Il est à noter que les simulations RegCM-NH couplées avec les différents schémas BATS1E et CLM4.5 modélisent bien la climatologie de la pluviométrie du Sénégal. Ensuite, Les résultats obtenus montrent clairement que le reboisement de la Grande Muraille Verte a des impacts significatifs sur le climat de la zone de la GMV et du Sénégal en général. On observe ainsi une augmentation significative de l'évapotranspiration sur l'ensemble du pays et de l'humidité relative. Tous ces apports de vapeur d'eau dans l'atmosphère entraînent une augmentation significative des quantités de pluies sur l'ensemble du Sénégal. L'on obtient une tendance à la hausse des nombres de jours de pluie observés sur tout le pays. Ces résultats issus de la modélisation avec une qualité de 62% à 79% permettent de dire que le reboisement entrepris par la Grande Muraille Verte a humidifié les régions de la GMV et a favorisé la pluviométrie sur l'ensemble du Sénégal.

Conclusion partielle

Les deux sections du chapitre IV abordent des aspects complémentaires de l'impact de la Grande Muraille Verte au Sénégal, en se focalisant respectivement sur le stockage de carbone et les effets climatiques. La section IV.1 a démontré que les efforts de reboisement et de restauration des terres ont permis une séquestration significative de carbone (5,8 millions de tonnes de carbone) et de CO₂ (21,2 millions de tonnes de captées). Ces résultats soulignent

l'importance de la GMV dans l'atténuation du changement climatique, avec un stockage de carbone devenant significatif 8 à 10 ans après le début des activités de reboisement. En revanche, les zones non reboisées continuent de subir une perte de capacité de stockage, ce qui met en évidence l'urgence d'étendre ces initiatives. La deuxième section, quant à elle, a exploré les impacts climatiques de la GMV à travers des simulations numériques. Les résultats montrent que le reboisement a entraîné une augmentation de l'évapotranspiration, de l'humidité relative et des précipitations sur l'ensemble du Sénégal, avec une amélioration notable de la pluviométrie. Ces changements climatiques positifs confirment que la GMV contribue non seulement à la lutte contre la désertification, mais aussi à l'amélioration des conditions climatiques locales et nationales.

Les résultats de ce chapitre mettent en lumière les bénéfices multidimensionnels de la GMV : elle agit à la fois comme un puits de carbone essentiel pour atténuer les émissions de gaz à effet de serre et comme un levier pour améliorer les conditions climatiques au Sénégal. Ces résultats renforcent l'importance de poursuivre et d'étendre les initiatives de reboisement et de restauration des écosystèmes dans le cadre de la Grande Muraille Verte, tout en soulignant la nécessité de politiques publiques intégrées pour maximiser ces impacts à long terme.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'objectif général de cette thèse était de contribuer à une meilleure compréhension de l'impact du reboisement sur les paramètres climatiques dans le cas de la Grande Muraille Verte du Sénégal après plus de quinze (15) années d'effort de reboisement. Pour aboutir à ses objectifs, cette thèse s'est fixée quatre (04) objectifs spécifiques :

- (1) Suivre l'évolution de la végétation et de la pluviométrie depuis les quatre dernières décennies ;
- (2) Analyser l'impact du reboisement sur les paramètres climatiques avant et après le reboisement dans les zones traversées par la Grande Muraille Verte ;
- (3) Evaluer la quantité de carbone séquestrée depuis la mise en œuvre de l'initiative de la GMV au Sénégal ;
- (4) Comprendre à l'aide de modélisation haute résolution la contribution du reboisement sur le climat du Sénégal et de certaines régions de la GMV.

Pour répondre à ces objectifs, nous avons utilisé de manière conjointe et complémentaire, différents jeux de données de suivi du couvert végétal (NDVI-AVHRR, VHP-STAR, Land Cover ESA-CCI), de précipitations (CHIRPS 2.0), d'humidité du sol (CPC-NOAA), d'évapotranspiration potentielle et réelle (GLEAM v4) et des résultats de simulations numériques à haute résolution issues du modèle RegCM4.7 (Couplé avec les schémas de surface CLM4.5 et BATS1E).

Notre démarche s'est appuyée sur une approche statistique, spectrale et de modélisation numérique autour de quatre points essentiels. Dans une première étape, il s'est agit d'analyser la variabilité du couvert végétal et de la pluviométrie sur la période 1981–2020 en recherchant les modes de variations, les tendances, les fluctuations et la détection d'éventuelles ruptures pouvant aider à comprendre les effets des épisodes de sécheresse (décennies 1970, 1980 et 1990), du retour à une pluviométrie normale et les actions de reboisement dans cette zone. Dans une seconde étape, une étude de la dynamique de l'occupation du sol a été réalisée en vue d'évaluer l'impact du reboisement sur la séquestration du carbone des sols entre 1992 à 2020. En plus, une analyse comparée (sur la période 2000–2020) de l'évolution du couvert végétal, des paramètres climatiques, avant et après reboisement a été réalisée en vue d'établir d'éventuels liens entre la mise en œuvre de l'initiative panafricaine de la Grande Muraille Verte au Sénégal. Enfin, nous avons fait appel aux simulations basées sur le modèle régional RegCM4.7 couplés avec les schémas de surface BATS1E et CLM4.5 pour expliquer et quantifier l'impact du reboisement sur le climat régional et du Sénégal. Les principales

conclusions auxquelles nous sommes parvenus au terme de ce travail de thèse sont consignées ci-dessous :

L'étude de l'évolution du couvert végétal et de la pluviométrie sur le domaine soudano-sahélien du Sénégal a permis de mettre en évidence un changement de dynamique du climat (période sèche / période humide) localisée à la fin de la décennie 1990, quels que soient les méthodes et les outils statistiques utilisés. En première lecture, ces résultats confirment les observations faites sur le Sahel où a été observée une dégradation du couvert végétal sous l'action des différents épisodes de sécheresses (années 1970, 1980 et 1990) et la surexploitation des sols. Dans notre étude, le déficit pluviométrique (1981 et fin décennie 1990) des sites que nous avons étudiés se situe entre 11 et 20% de la normale 1991–2020 et la baisse de l'activité végétative est quant à elle de 4 à 8,5%. Ensuite, un reverdissement (+1,5 à +3%) de certaines localités est observé avec une amélioration récente des cumuls annuels de pluie (+3 à +7% de la normale 1991–2020) et la mise en place de politiques de restauration des sols et de gestion durable des ressources naturelles.

Nous nous sommes par la suite intéressés à l'évolution des paramètres climatiques et indices de végétation après reboisement dans l'optique d'établir une éventuelle relation entre le reboisement et les paramètres climatiques (analyse effectuée sur la période récente 2000-2020). Pour cela, nous avons comparé les évolutions moyennes annuelles et saisonnières des indices de végétation (NDVI, VHI), de précipitations, d'humidité du sol, d'évapotranspiration réelle et potentielle de la période 2000–2008 (avant reboisement) et de la période 2009–2020 (après reboisement). Il ressort de ces analyses une hausse de l'activité de végétation à travers le NDVI interannuel (2 à 8%) et saisonnier (1,5 à 7% pour la saison JAS et 1 à 4% pour la saison sèche). L'analyse spatiotemporelle a montré une évolution positive et significative sur la majorité des sites de la GMV du Sénégal. La période 2009–2020 enregistre également une hausse des cumuls annuels de précipitation de 2 à 8% et de 4 à 8 % pour la saison JAS. Nos résultats ont aussi révélé que l'humidité du sol est le paramètre climatique qui a le plus progressé avec une hausse de 25 à 54% de la moyenne 2000–2020, ce qui représente des gains compris entre 20 mm/an et 70mm /an. Cette disponibilité en eau et un couvert en meilleure santé que la période 2000–2008, ont créé des conditions climatiques plus favorables au cours de la période 2009–2020. Ceci justifie l'humidification par évapotranspiration réelle des régions reboisées de 2 à 12%.

Au cours de la période 2009–2020, il est noté une amélioration significative de la relation entre le NDVI et les paramètres climatiques après les différentes actions de reboisement de la GMV. Le coefficient de corrélation entre le NDVI et les précipitations connaît une amélioration et

devient significatif pour la période 2009–2020 (coefficient supérieur à 0,7 et significatif au seuil de $\alpha=0,01$). Nous notons également une extension des régions à forte corrélation et significative pour la période 2009–2000. Ces résultats rejoignent les conclusions de nombreuses études sur le Sénégal, le Mali, la Guinée et le Sahel. La relation NDVI et humidité du sol a enregistré une progression remarquable et significative de l'échelle interannuelle et saisonnière sur les sites reboisés. Le reboisement a significativement contribué à une disponibilité en eau dans les couches superficielles et la zone racinaire dans les sols. Sur ces sites reboisés, nous passons de corrélations non significatives pendant la période 2000–2008 à des corrélations significatives et supérieures 0,75 au cours de la période 2009–2020. Les résultats de la dynamique positive de l'humidité du sol et du couvert végétal confirment l'apport du reboisement sur l'infiltration des eaux sur les sites de la GMV-Sénégal et la capacité de ces sols à stocker plus de quantité d'eau. Sur les sites non reboisés (cas de Ballou), nos résultats ont montré une régression de la relation NDVI et l'humidité du sol. La forte relation entre l'indice de végétation NDVI et l'humidité du sol montre que l'humidité du sol représente un bon indicateur pour le suivi de la végétation.

La hausse de l'ETR observée au cours de la période 2009–2020 dans les localités reboisées a favorisé une amélioration et significative de la relation NDVI-ETR au cours de cette période. Cependant sur le site non reboisé de Ballou, la corrélation NDVI-ETR a régressé, traduisant la dégradation du couvert végétal dans la commune de Ballou (forte urbanisation constatée dans cette commune).

Par la suite, la dynamique de l'occupation du sol a été utilisée pour servir de proxy à l'estimation de la séquestration du carbone des sols des sites de la Grande Muraille Verte du Sénégal. Les résultats obtenus complètent les analyses qui ont été réalisées sur le suivi du couvert végétal (en utilisant le NDVI et le VHI). Les analyses effectuées à partir de l'évolution de l'occupation du sol (LCLU) au cours des trois dernières décennies (1992–2020) a permis d'observer une tendance à un reverdissement dans les trois localités de Syer, Téssékéré et Loughéré-Thioly qui a fait l'objet de plusieurs campagnes de reboisement depuis 2006. Par contre, un recul du couvert végétal a été observé dans la localité de Ballou qui n'a pas encore été reboisée. Malgré une reprise des précipitations sur notre zone d'étude en particulier et sur le Sahel en général, il est noté l'existence d'importantes zones de dégradation continue du couvert végétal. Ainsi, nos résultats confirment que la pluviométrie ne saurait être le seul facteur explicatif du reverdissement observé et décrit dans la littérature. L'analyse des données d'occupation du sol a montré dans un premier temps la dégradation du couvert entre 1992 et

2000. Cette situation est une conséquence des conditions climatiques défavorables (sécheresses des années 1970, 1980 et 1990) et d'une surexploitation des terres qui ont occasionné des réductions des surfaces agricoles, des savanes arborées et des forêts. Au cours des décennies 2000 et 2010, plusieurs actions de reboisement, de pratiques d'agroforesterie et de politiques de gestion durable des terres et des ressources naturelles ont été implantées dans la région nord du Sénégal, notamment sur le tracé de GMV. Ces actions combinées avec une bonne pluviométrie ont permis un reverdissement de ces localités.

L'évaluation de la quantité de carbone séquestrée depuis la mise en œuvre de l'initiative de la GMV au Sénégal a été réalisée dans cette étude. Ainsi, grâce au traitement des données temporelles et de haute résolution spatiale d'occupation du sol, les quantités moyennes de carbone séquestrées de chaque site au cours de la période 1992-2020 ont été calculées. Les résultats obtenus se sont avérés conformes avec les inventaires du carbone des sols effectués au Sénégal. L'amélioration du couvert végétal, principalement les superficies des savanes arborées et arbustives par la plantation de plus de 18 millions d'arbres, la restauration de 15% des terres, 9% de l'objectif de plantation d'arbres de la GMV du Sénégal et la mise en défens de 13.000 ha, a permis de séquestrer 33% de l'objectif de stockage de carbone du Sénégal et 2,31% de l'objectif de la GMV africaine. Le gain de carbone stocké depuis 2006 se chiffre à 5,8 millions tonnes et représente 21,2 millions de tonnes de CO₂ captés dans l'atmosphère. De plus, les résultats obtenus ont révélé que le stockage de carbone devient significatif entre 8 à 10 ans après le début du reboisement.

Enfin, pour comprendre les mécanismes par lesquels le reboisement influe sur le climat d'une région, le modèle régional du climat (RegCM4.7) de haute résolution (10km) a été utilisé sur la période 2000-2020. Ainsi, les résultats obtenus ont permis d'évaluer la contribution de la reforestation du Sahel sénégalais sur le climat des zones traversées par la GMV et le climat du Sénégal en général. La comparaison des tendances avant et après le reboisement, issue des simulations RegCM-NH couplé avec les schémas BATS1E et CLM4.5, a montré une hausse significative de la pluviométrie des régions de la GMV et du Sénégal dans l'ensemble. Ces hausses des quantités de précipitation (6% à 17% pour BATS1E et 13% à 23% pour CLM4.5), et du nombre de jours de pluie (1 à 2 jours) s'expliquent par une augmentation significative de l'évapotranspiration et de l'humidité relative sur l'ensemble de la zone d'étude après reboisement. Les résultats obtenus montrent clairement que le reboisement de la Grande Muraille Verte aura des impacts significatifs sur le climat de la zone de la GMV et du Sénégal en général. Ces résultats sont en accord avec les travaux réalisés dans le Sahel qui ont affirmé

que le reboisement d'une zone pourrait impacter la pluviométrie locale et aussi bien celle des régions lointaines.

Les résultats présentés et la méthodologie utilisée dans cette thèse pourraient servir de références à l'évaluation des objectifs de l'initiative de la Grande Muraille Verte Africaine à l'horizon 2030.

Cette thèse ouvre aussi un certain nombre de perspectives de travail qui, approfondies, pourraient améliorer les résultats obtenus. Pour mieux affiner les résultats obtenus, il serait souhaitable d'analyser plus spécifiquement l'impact du reboisement sur :

- les températures (moyenne, maximale) de l'air et dans le couvert végétal. Cette étude pourrait impliquer l'utilisation de données in-situ ou de haute résolution comme les températures maximale et minimale CHIRTS (5km, <https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRTSdaily/>), données climatiques historiques et de modèles de climat pour comparer les tendances avant et après le reboisement.
- la modification du cycle hydrologique. Les analyses pourraient examiner comment le reboisement influence la disponibilité des ressources en eau, y compris les niveaux des nappes phréatiques, les débits des rivières et les schémas de ruissellement. Cela pourrait impliquer des études hydrologiques et l'utilisation de modèles hydrologiques régionaux.
- l'atténuation des phénomènes extrêmes. Il s'agirait d'analyser dans quelle mesure le reboisement peut atténuer les effets des phénomènes météorologiques extrêmes, tels que les sécheresses, les tempêtes de poussière et les vagues de chaleur.
- l'impact socio-économique. Ceci reviendrait à étudier les implications socio-économiques du reboisement, notamment ses effets sur la sécurité alimentaire, les moyens de subsistance des populations locales et la résilience aux changements climatiques.

La variation du carbone dans le système sol-plante résulte d'interactions complexes entre de multiples facteurs naturels. A l'échelle du paysage, le climat, les propriétés du sol, tels que la texture du sol, sa minéralogie, sa topographie et les modes d'occupation du sol sont des facteurs qui influent sur le stockage du carbone (Cambou, 2018 ; Amdouni-Boursier *et al.*, 2019). Et dans ce travail de thèse, nous avons montré une forte relation entre la variation du couvert végétal (NDVI, VHI) et les paramètres climatiques. De plus, la séquestration du carbone a été estimée et analysée sur la base de la dynamique de l'occupation du sol (Land Cover LCLU). Ne disposant pas encore à l'heure actuelle de base de données de stockage de carbone, on pourrait utiliser les résultats obtenus pour établir un modèle de prédiction du stock de carbone

des sols en fonction des indices de l'activité de la végétation (NDVI), des précipitations, de l'humidité du sol et éventuellement des températures.

Enfin, l'approche méthodologique pourrait être complétée par l'utilisation des nouvelles données de meilleures résolutions spatiales de la couverture végétale (par exemple les indices de végétation « NDVI, EVI » MODIS 250m, <https://modis.gsfc.nasa.gov/>), d'occupation du sol (ESA-CCI 20m en essai de validation à l'adresse <https://2016africalandcover20m.esrin.esa.int/> ; Landsat 30m, <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-data-access>) et des indices NDVI ou VHI associés à chaque type de végétation (savane, forêt, cultures « maïs, riz, arachide... », plantation d'arbres) du produit NOAA-STAR disponibles à l'adresse <https://www.star.nesdis.noaa.gov/>. Ces données pourront améliorer la compréhension de l'évolution du couvert végétal et l'estimation du flux de carbone stocké dans les sols.

Pour finir, il est important de souligner les efforts réalisés par l'initiative de la Grande Muraille Verte au Sénégal depuis 2006. A ce titre, on peut dire que les différents résultats obtenus dans cette thèse sont encourageants. Nous invitons de ce fait l'ensemble des différents pays et partenaires de l'initiative de la Grande Muraille Verte Africaine, à intensifier le reboisement en vue de lutter contre les effets du changement climatique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abass, F. E. A., Khugali, S. S. M., Ahmed, N. A. M., Laamrani, A., Elhadi, E. A., Siddig, A. A. H., & Kouassi, E. K. (2023). Estimating Ecological Characteristics and Carbon Stock in Uneven-Aged Plantations of *Acacia senegal* L. in the Savanna Woodlands of Sudan. *Journal of Environmental Protection*, **14**(5), 404-418.
- Abiodun, B. J., Adeyewa, Z. D., Oguntunde, P. G., Salami, A. T., & Ajayi, V. O. (2012). Modeling the impacts of reforestation on future climate in West Africa. *Theoretical and Applied Climatology*, **110**(1), 77–96. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0614-1>
- ADEME, (2014). Carbone organique des sols : l'énergie de l'agro-écologie, une solution pour le climat, Editor: Ademe, GIS Sol, ISBN: 978-2-358-38-447-6
- Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie (ANSD) [Sénégal]. (2021). ANSD/Projections 2021. <http://www.ansd.sn/>
- Aitali, R., Snoussi, M., Kolker, A., Oujidi, B., & Mhammdi, N. (2022). Effects of Land Use/Land Cover Changes on Carbon Storage in North African Coastal Wetlands. *Journal of Marine Science and Engineering*, **10**(3), 364.
- Akinyemi, F. O., & Mashame, G. (2018). Analysis of land change in the dryland agricultural landscapes of eastern Botswana. *Land Use Policy*, **76**, 78, 798-811. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.03.010>
- Ali, A. and Lebel, T. (2009). The Sahelian standardized rainfall index revisited. *International Journal of Climatology*, Vol. **29**(12), pp. 1705–1714. <https://doi.org/10.1002/joc.1832>
- Alo, A. A., Agbor, C. F., Jebiwott, A., & Temiloluwa, O. (2022). Spatial Distribution of Soil Moisture Content and Tree Volume Estimation in International Institute of Tropical Agriculture Forest, Ibadan, Nigeria. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, **10**(8), 364-384. <https://doi.org/10.4236/gep.2022.108022>
- Aman, A., Nafogou, M., Bi, H. V. N. G., Kouadio, Y. K., & Kouadio, H. B. (2019). Analysis and Forecasting of the Impact of Climatic Parameters on the Yield of Rain–Fed Rice Cultivation in the Office Riz Mopti in Mali. *Atmospheric and Climate Sciences*, **9**(03), 479 <https://doi.org/10.4236/acs.2019.93032>
- Amdouni-Boursier L. & Goffaux R. (2019) Stockage du carbone dans les prairies similaires à celles qui sont gérées par les aéroports, *Paris, France : FRB*, 30p.
- Amri, R., Zribi, M., Lili-Chabaane, Z., Duchemin, B., Gruhier, C., & Chehbouni, A. (2011). Analysis of vegetation behavior in a North African semi-arid region, using SPOT-VEGETATION NDVI data. *Remote sensing*, **3**(12), 2568-2590. <https://doi.org/10.3390/rs3122568>
- Andrew, G., Carlin John, B., Stern Hal, S., Dunson David, B., & Aki, V. (2013). Bayesian data analysis. *Chapman: Hall/CRC*.
- Andrieu, J., Cormier-Salem, M. C., Descroix, L., Sané, T., & Ndour, N. (2018). Correctly assessing forest change in a priority West African mangrove ecosystem: 1986–2010 An answer to Carney *et al.* (2014) paper “Assessing Forest change in a priority West African mangrove: 1986–2010. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, **13** (1), pp. 337–347
- APA (2018). Rapport d'étape sur la Grande Muraille verte 2011-2017. Les échos de la grande muraille verte N°1. Sacande, M., Parfondry, M. & Martucci, A., eds. 2018. *Biophysical and socio-economic baselines: the starting point for Action Against Desertification*. Rome, FAO. 72 pp
- Bacar, T. S., Cheng, Y., Wang, Y., Kaboul, K., & Lopes, N. D. R. (2022). The Effect of Vegetation Restoration in Soil Organic Carbon Storage. *Open Journal of Soil Science*, **12**(9), 427-445.

- Bakhom, A. (2013). Dynamique des ressources fourragères : indicateur de résilience des parcours communautaires de Téssékéré au Ferlo (Nord-Sénégal). *PhD, Biologie, Productions et Pathologies Animales, Option Ecologie pastorale, FST-UCAD*, 115p.
- Bamba A, Dieppois B, Konaré A, Pellarin T, Balogun A, Dessay N, Kamagaté B, Savané I, Diédhiou A. (2015). Changes in vegetation and rainfall over West Africa during the last three decades (1981–2010). *Atmos Clim Sci* **5**, 367–379. <https://doi.org/10.4236/acs.2015.54028>
- Bamba, A., Diallo, I., Touré, N. D. E., Kouadio, K., Konaré, A., Dramé, M. S., ... & Tall, M. (2019). Effect of the African greenbelt position on West African summer climate: a regional climate modeling study. *Theoretical and Applied Climatology*, **137**(1), 309–322. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2589-z>
- Ban N, Caillaud C, Coppola E et al (2021) The first multi-model ensemble of regional climate simulations at kilometer scale resolution, part I: evaluation of precipitation. *Clim Dyn*. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05708-w>
- Barima YSS, Egnankou MW, N'doumé CA, Kouamé FN, Bogaert J. (2010). Modélisation de la dynamique du paysage forestier dans la région de transition forêt savane à l'Est de la Côte d'Ivoire. *Télédétection*. **9**(2).
- Barthès B.G., Chotte J.L. (2020). Infrared spectroscopy approaches support soil organic carbon estimations to evaluate land degradation. *Land Degradation & Development*. doi:10.1002/ldr.3718
- Bertelsen, M., Heatwole, C., Moore, K. and Badini, O. (2001). Multi-Temporal Classification Land Cover Using Landsat 7 Imagery in Madiama, Mali. *SANREM CRSP Research Scientific Synthesis Conference, Athens, 28–30 November 2001, Paper No. 200000*. https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/65276/192_Bertelsen.pdf?sequence=1.
- Beucher, F., Belamari, S., & Beau, I. (2010). *Météorologie tropicale: des alizés au cyclone*. Météo-France.
- Beyene, A.D. (2022). Green Legacy Initiative for Sustainable Economic Development in Ethiopia. *Research Report submitted to the Ethiopian Economic Association (EEA)*.
- Bhuiyan, C., Singh, R. P., & Kogan, F. N. (2006). Monitoring drought dynamics in the Aravalli region (India) using different indices based on ground and remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **8**(4), 289–302.
- Biga, I., Amani, A., Soumana, I., Bachir, M., & Mahamane, A. (2020). Dynamique spatio-temporelle de l'occupation des sols des communes de Torodi, Gothèye et Tagazar de la région de Tillabéry au Niger. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **14**(3), 949–965.
- Bodian, A. (2011). Approche par modélisation pluie-débit de la connaissance régionale de la ressource en eau : Application au haut bassin du fleuve Sénégal. *Thèse de doctorat, Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal)*, 288p. <https://doi.org/10.4000/cdg.1027>
- Bonan, G. B., Oleson, K. W., Vertenstein, M., Levis, S., Zeng, X., Dai, Y., ... & Yang, Z. L. (2002). The land surface climatology of the Community Land Model coupled to the NCAR Community Climate Model. *Journal of climate*, **15**(22), 3123–3149.
- Boukeng, E. J. D., Avana, M. L. T., Zapfack, L., Desrochers, A., Dzo, I. G. M., & Khasa, D. (2023). Stocks de carbone des systèmes agroforestiers de la zone soudano-sahélienne du Cameroun, Afrique centrale. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, **27**(1), 19–30.
- Brandt, M., C.J. Tucker, A. Kariryaa, K. Rasmussen, C. Abel, J.L. Small, J. Chave, L.V. Rasmussen, P. Hiernaux, A.A. Diouf, L. Kergoat, O. Mertz, C. Igel, F. Gieseke, J. Schöning, S. Li, K.A. Melocik, J.R. Meyer, S. Sinno, E. Romero, E.N. Glennie. (2020).

- An Unexpectedly Large Count of Trees in the West African Sahara and the Sahel. *ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA*. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2824-5>
- Brandt, M., Rasmussen, K., Hiernaux, P., Herrmann, S., Tucker, C. J., Tong, X., ... & Fensholt, R. (2018). Reduction of tree cover in West African woodlands and promotion in semi-arid farmlands. *Nature Geoscience*, *11*(5), 328–333. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0092-x>
- Bruckmann, L., Chotte, J. L., Duponnois, R., Loireau, M., & Sultan, B. (2022). Accelerate the mobilization of African and international scientific expertise to boost interdisciplinary research for the success of the Sahelian Great Green Wall by 2030. *Land*, *11*(10), 1744.
- Brunel S. (2019). Le Sahel, miroir d'une crise mondiale, Sciences Humaines N°311. <https://doi.org/10.3917/sh.311.0002>
- Brunke, M. A., Broxton, P., Pelletier, J., Gochis, D., Hazenberg, P., Lawrence, D. M., ... & Zeng, X. (2016). Implementing and evaluating variable soil thickness in the Community Land Model, version 4.5 (CLM4. 5). *Journal of climate*, *29*(9), 3441-3461.
- Buishand, T. A. (1984). Tests for detecting a shift in the mean of hydrological time series. *Journal of hydrology*, *73*(1-2), 51-69.
- Cambou, A. (2018). Evaluation du stock et de la stabilité du carbone organique dans les sols urbains (Doctoral dissertation, Agrocampus Ouest).
- Cambou, A., Cardinael, R., Kouakoua, E., Villeneuve, M., Durand, C., & Barthès, B. G. (2016). Prediction of soil organic carbon stock using visible and near infrared reflectance spectroscopy (VNIRS) in the field. *Geoderma*, *261*, 151-159.
- Cassé, C. (2015). *Impact du forçage pluviométrique sur les inondations du fleuve Niger à Niamey : Etude à partir de données satellitaires et in-situ* (Doctoral dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse III).
- CEDEAO. (2015a). Forest Policy and Convergence Plan for the sustainable management and utilization of forest ecosystems in West Africa. Présenté à l'atelier ECREEE, 30 septembre-2 octobre 2020, Dakar, Sénégal.
- Chapman, A.R., Midgley, G.F., & Smart, K. (2021). Diverse trends in observed pan evaporation in South Africa suggest multiple interacting drivers. *South African Journal of Science*, *117*(7-8), 1-7.
- Chen, T., Zhou, S., Liang, C., Hagan, D. F. T., Zeng, N., Wang, J., ... & Dolman, A. J. (2020). The Greening and Wetting of the Sahel Have Leveled off since about 1999 in Relation to SST. *Remote Sensing*, *12*(17), 2723. <https://doi.org/10.3390/rs12172723>
- Chevallier, T., Razafimbelo, T., Chapuis-Lardy, L., & Brossard, M. (2020). Carbone des sols en Afrique : impacts des usages des sols et des pratiques agricoles. *Food & Agriculture Org*.
- Chung, J. X., Juneng, L., Tangang, F., & Jamaluddin, A. F. (2018). Performances of BATS and CLM land-surface schemes in RegCM4 in simulating precipitation over CORDEX Southeast Asia domain. *International Journal of Climatology*, *38*(2), 794-810.
- CILSS (2016). Landscapes of West Africa—A window on a changing world. Ouagadougou, Burkina Faso, CILSS. <https://doi.org/10.5066/F7N014QZ>
- Cissé, S., Eymard, L., Ottlé, C., Ndione, J. A., Gaye, A. T., & Pinsard, F. (2016). Rainfall intra-seasonal variability and vegetation growth in the Ferlo Basin (Senegal). *Remote Sensing*, *8*(1), 66. <https://doi.org/10.3390/rs8010066>
- Cleveland, W.S., (1979). Robust locally-weighted regression and smoothing scatterplots. *Journal of the American Statistical Association*, *74*, 829-836. DOI: [10.1080/01621459.1979.10481038](https://doi.org/10.1080/01621459.1979.10481038)
- Convention des Nations unies de lutte contre la désertification (CNULCD). (1994). Convention des Nations unies de lutte contre la désertification, dans les pays gravement touchés par la sécheresse et/ou la désertification, en particulier l'Afrique. *Convention des Nations*

- unies de lutte contre la désertification, dans les pays gravement touchés par la sécheresse, texte avec annexes publié par le secrétariat de la Convention, Bonn, Allemagne.
- Copernicus Climate Change Service, C. D. (2019). Land cover classification gridded maps from 1992 to present derived from satellite observation. *Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)*. DOI: 10.24381/cds.006f2c9a (Consulté le 14-10-2022)
- Coppola, E., Stocchi, P., Pichelli, E., Torres Alavez, J. A., Glazer, R., Giuliani, G., ... & Giorgi, F. (2021). Non-Hydrostatic RegCM4 (RegCM4-NH): Model description and case studies over multiple domains. *Geoscientific Model Development Discussions*, 2021, 1-25.
- Courel, M. F. (1984). *Etude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites* (Doctoral dissertation, Université Panthéon-Sorbonne-Paris I, 447p.
- CSE. (2020). Rapport sur l'État de l'Environnement au Sénégal, édition 2020. *Ministère de l'Environnement et du Développement Durable (MEDD), Centre de Suivi Ecologique (CSE)*, 280p.
- Dai, A., Lamb, P. J., Trenberth, K. E., Hulme, M., Jones, P. D., & Xie, P. (2004). The recent Sahel drought is real. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 24(11), 1323-1331.
- Dai, X., Yang, G., Liu, D., & Wan, R. (2020). Vegetation carbon sequestration mapping in herbaceous wetlands by using a MODIS EVI time-series data set: a case in Poyang Lake wetland, China. *Remote Sensing*, 12(18), 3000
- Davin, E. L., & de Noblet-Ducoudré. (2010). Climatic impact of global-scale deforestation: Radiative versus nonradiative processes. *Journal of Climate*, 23(1), 97–112. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI3102.1>
- De Winter, J. F., & Dodou, D. (2010). Five-point likert items: t test versus Mann–Whitney–Wilcoxon (Addendum added October 2012). *Practical Assessment, Research, and Evaluation*, 15(1), 11.
- Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., et al. (2011) The ERA-Interim Reanalysis: Configuration and Performance of the Data Assimilation System. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137, 553-597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>
- Defourny P., Bontemps S., Lamarche C., Brockmann C., Boettcher M., et al., (2017). Land Cover CCI: Product User Guide Version 2.0. <http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download/ESACCI-LC-PUG-v2.0.7.pdf>.
- Dendoncker, M., Ngom, D., & Vincke, C. (2015). Tree Dynamics (1955–2012) and Their Uses in Senegal's Ferlo Region: Insights from a Historical Vegetation Database, Local Knowledge and Field Inventories. *Bois & Forêts Des Tropiques*, 326, 25–41. <https://doi.org/10.19182/bft2015.326.a31281>
- Descroix, L. (2018). Processus et enjeux d'eau en Afrique de l'Ouest Sahélo–Soudanienne. *Editions des archives contemporaines, France, ISBN : 9782813003140*, 320p. <https://doi.org/10.17184/eac.9782813003140>
- Descroix, L., & Lambert, L. (2018). Changements climatiques et essor djihadiste au Sahel: une approche critique pour des solutions adaptées. *Regards géopolitiques*.
- Descroix, L., Niang, A. D., Panthou, G., Bodian, A., Sane, Y., Dacosta, H., ... & Quantin, G. (2015). Évolution récente de la pluviométrie en Afrique de l'ouest à travers deux régions: la Sénégalie et le bassin du Niger moyen. *Climatologie*, 12, 25–43. <https://doi.org/10.4267/climatologie.1105>
- Di Gregorio, A., and Jansen, L. J. M. (2005). Land Cover Classification System (LCCS): Classification Concepts and User Manual. Fao, Food & Agriculture Organization, Vol. 53. <https://www.fao.org/3/x0596e/x0596e00.htm>

- Dia, A., & Duponnois, R. (2012). Le projet majeur africain de la Grande Muraille Verte : Concepts et mise en œuvre. IRD Éditions.
- Dia, A., & Niang, A. M. (2010). Le Projet Majeur Grande Muraille Verte de l'Afrique: contexte, historique, approche stratégique, impacts attendus et gouvernance de la Grande Muraille Verte. IRD Éditions. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.2110>
- Diallo, I., Bain, C. L., Gaye, A. T., Moufouma-Okia, W., Niang, C., Dieng, M. D., & Graham, R. (2014). Simulation of the West African monsoon onset using the HadGEM3-RA regional climate model. *Climate dynamics*, **43**, 575-594.
- Diallo, R., IEF, ANGMOV. (2019). Grande Muraille verte. *Ministère de l'Environnement et du Développement Durable du Sénégal*.
- Diba, I., & Camara, M. (2017). Analyse De L'impact Du Changement De La Couverture Végétale Sur La Pluie Et La Température De Surface Au Sénégal. *European Scientific Journal, ESJ*, **13**(29), 270. <https://doi.org/10.19044/esj.2017.v13n29p270>
- Diba, I., Camara, M., & Diedhiou, A. (2019). Impacts of the Sahel–Sahara interface reforestation on West African climate: intra–annual variability and extreme temperature events. *Atmospheric and Climate Sciences*, **9**(01), 35-61. <https://doi.org/10.4236/acs.2019.91003>
- Diba, I., Camara, M., & Sarr, A. B. (2016). Impacts of the Sahel–Sahara interface reforestation on West African climate: intraseasonal variability and extreme precipitation events. *Advances in Meteorology*. <https://doi.org/10.1155/2016/3262451>
- Diba, I., Camara, M., Sarr, A. B., & Diedhiou, A. (2018). Potential impacts of land cover change on the interannual variability of rainfall and surface temperature over West Africa. *Atmosphere*, **9**(10), 376.
- Dickinson, R. E., Errico, R. M., Giorgi, F., & Bates, G. T. (1989). A regional climate model for the western United States. *Climatic change*, **15**, 383-422.
- Dickinson, R. E., Henderson-Sellers, A., & Kennedy, P. J. (1993). Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR community climate model. *Technical note. [NCAR (National Center for Atmospheric Research)]* (No. PB-94-106150/XAB; NCAR/TN-387+ STR). National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO (United States). Scientific Computing Div.
- Diedhiou, I. (2019). Entre utilisation et préservation des ressources ligneuses en Afrique de l'Ouest : Dynamique des paysages forestiers en Sénégal méridionale, *Thèse de Doctorat en cotutelle de l'Université de Paris et Université Assane Seck de Ziguinchor*. Ziguinchor, Sénégal
- Dieppo, B., Durand, A., Fournier, M., Sebag, D., Ngatcha, B. N., Massei, N., & Hassane, B. (2011). Variabilité des précipitations au Sahel par analyse du signal : Etude des relations avec l'Océan Atlantique entre 1950 et 2005. In *Colloque international : Sciences de l'Eau, du Climat et de l'Environnement pour un développement durable de l'Afrique" & Livre des résumés*.
- Dieye, A. M., Roy, D. P., Hanan, N. P., Liu, S., Hansen, M., & Toure, A. (2012). Sensitivity analysis of the GEMS soil organic carbon model to land cover land use classification uncertainties under different climate scenarios in senegal. *Biogeosciences*, **9**(2), 631-648.
- Dimobe, K., Kouakou, J. L. N. D., Tondoh, J. E., Zoungrana, B. J. B., Forkuor, G., & Ouédraogo, K. (2018). Predicting the potential impact of climate change on carbon stock in semi-arid West African savannas. *Land*, **7**(4), 124.
- Dourma, M., Soou, E., Amana, E. K., Atakpama, W., Folega, F., Polo-Akpisso, A., ... & Akpagana, K. (2017). La forêt classée d'Atakpamé : diversité, typologie, séquestration de carbone et activités anthropiques. *Journal de la Recherche Scientifique de l'Université de Lomé*, **19**(3), 29-45.

- Duveiller, G., Caporaso, L., Abad-Viñas, R., Perugini, L., Grassi, G., Arneth, A. and Cescatti, A. (2020). Local biophysical effects of land use and land cover change: towards an assessment tool for policy makers. *Land Use Policy* (91), p.104382. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104382>
- ECMWF. (2021). "C3S Product Quality Assurance Document - ICDR Land Cover 2020". *D5.2.3_PQAD_ICDR_LC_v2.1.x_PRODUCTS_v1.1*.
- Elberling, B., Touré, A., & Rasmussen, K. (2003). Changes in soil organic matter following groundnut–millet cropping at three locations in semi-arid Senegal, West Africa. Elberling, B., Touré, A., & Rasmussen, K. (2003). Changes in soil organic matter following groundnut– Agriculture, ecosystems & environment. **96**(1-3), 37-47.
- Emanuel, K. A. (1991). A scheme for representing cumulus convection in large-scale models. *Journal of the atmospheric sciences*, **48**(21), 2313-2329.
- ESA. (2017). ESA Land Cover CCI Product Validation and Intercomparison. *Report (PVIR) v2*. <https://climate.esa.int/en/projects/land-cover/key-documents/>
- Fane S., Maharazy A.Y., Karembe Y., Karembe M. (2022). Séquestration de carbone par les arbres des systèmes agroforestiers en zone soudanienne de la Région de Dioïla au Mali. Researchgate, <https://www.researchgate.net/publication/360555300>.
- FAO et PNUE (2020). La situation des forêts du monde 2020. *Forêts, biodiversité et activité humaine*. Rome. <https://doi.org/10.4060/ca8642fr>
- FAO. (2019). Measuring and modelling soil carbon stocks and stock changes in livestock production systems– A scoping analysis for the LEAP work stream on soil carbon stock changes. *Rome. 84 pp. Licence:CC BY-NC-SA 3.0 IGO*.
- FAO. (2020b). Global Forest Resources Assessment 2020: Main report. Rome. <https://doi.org/10.4060/ca9825en>.
- FAO. (2021). Évaluation des ressources forestières mondiales 2020 : *Rapport principal*. Rome. <https://doi.org/10.4060/ca9825fr>
- FAO. (2022). FAOSTAT Land, Inputs and Sustainability, Land Cover. Rome, ITALIE. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/LC>
- Farage, P. K., Ardö, J., Olsson, L., Rienzi, E. A., Ball, A. S., & Pretty, J. N. (2007). The potential for soil carbon sequestration in three tropical dryland farming systems of Africa and Latin America: A modelling approach. *Soil and Tillage research*, **94**(2), 457-472.
- Folega, F., Haliba, M., Folega, A. A., Ekougoulou, R., Wala, K., & Akpagana, K. (2022). Diversité structurale des ligneux en lien avec l'utilisation des terres du socle éburnéen au Togo. *Annales de la Recherche Forestière en Algérie*, **12**(1), 7-25.
- Fu, G., Charles, S. P., & Yu, J. (2009). A critical overview of pan evaporation trends over the last 50 years. *Climatic change*, **97**(1), 193-214.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., ... & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific data*, **2**(1), 1–21. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Gardelle, J., Hiernaux, P., Kergoat, L., & Grippa, M. (2010). Less rain, more water in ponds: a remote sensing study of the dynamics of surface waters from 1950 to present in pastoral Sahel (Gourma region, Mali). *Hydrology and Earth System Sciences*, **14**(2), 309-324.
- Gaye, D. (2017). Suivi de la pluviométrie au Nord–Sénégal de 1954 à 2013 : étude de cas des stations synoptiques de Matam, Podor et Saint–Louis. *Norois. Environnement, aménagement, société*, **244**, 63–73. <https://doi.org/10.4000/norois.6165>
- Gbetkom, P. G. (2020). *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* (Doctoral dissertation, Aix Marseille University).

- Gbode, I. E., Akinsanola, A. A., & Ajayi, V. O. (2015). Recent changes of some observed climate extreme events in Kano. *International Journal of Atmospheric Sciences*, 2015.
- Giannini, A. (2010). Mechanisms of climate change in the semiarid African Sahel: The local view. *Journal of Climate*, 23(3), 743-756.
- Gibbons, J. D., and S. Chakraborti. (2011). Nonparametric Statistical Inference. 5th Ed., Boca Raton, FL: Chapman & Hall/CRC Press, Taylor & Francis Group. https://doi.org/10.1007/978-3-642-04898-2_420
- Giordano, A. (1994). L'érosion et la lutte contre l'érosion en forêt méditerranéenne. *Forêt méditerranéenne*, 15, 12-21.
- Giorgi, F., Coppola, E., Giuliani, G., Ciarlo, J. M., Pichelli, E., Nogherotto, R., ... & Drofa, O. (2023). The Fifth Generation Regional Climate Modeling System, RegCM5: Description and Illustrative Examples at Parameterized Convection and Convection-Permitting Resolutions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128(6), e2022JD038199.
- Giorgi, F., Coppola, E., Solmon, F., Mariotti, L., Sylla, M. B., Bi, X., ... & Brankovic, C. (2012). RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Climate Research*, 52, 7-29.
- Giorgi, F., Francisco, R., & Pal, J. (2003). Effects of a subgrid-scale topography and land use scheme on the simulation of surface climate and hydrology. Part I: Effects of temperature and water vapor disaggregation. *Journal of Hydrometeorology*, 4(2), 317-333.
- Gong, L., Liu, G., Wang, M., Ye, X., Wang, H. and Li, Z. (2017). Effects of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon in China: A Meta-Analysis. *Chinese Geographical Science*, 27, 188-200.
- Gore, B. T. O., Aman, A., Kouadio, Y. K., Duclos, O. M., & Sato, K. (2023). Estimation of the Carbon Sequestration Dynamics of Senegal's Great Green Wall Based on Land Cover over the Past Three Decades. *Journal of Environmental Protection*, 14(12), 954-983. DOI: [10.4236/jep.2023.1412053](https://doi.org/10.4236/jep.2023.1412053)
- Gore, B. T. O., Aman, A., Kouadio, Y., & Duclos, O. M. (2023). Recent Vegetation Cover Dynamics and Climatic Parameters Evolution Study in the Great Green Wall of Senegal. *Journal of Environmental Protection*, 14(4), 254-284. doi: [10.4236/jep.2023.144018](https://doi.org/10.4236/jep.2023.144018).
- Grell, G. A., Dudhia, J., & Stauffer, D. R. (1994). A description of the fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5).
- Grinsted, A., Moore, J. C., & Jevrejeva, S. (2004). Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear processes in geophysics*, 11(5/6), 561-566. <https://doi.org/10.5194/npg-11-561-2004>
- Hamza I., FODÉ, M., MOHAMED, A. B., & GAYE, A. T (2016). Etude du phénomène de pluie hors saison hivernale au sahel : cas particulier de l'épisode de pluie de mangues des 12 et 13 mars 2016 sur le Burkina Faso et le Niger. *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie, REVIST*, 273-295.
- Hansson, L. (2006). Comparisons of infiltration capacitites in different parklands and farming systems of semi-arid Burkina Faso. *SLU, Dept. of Forest Ecology and Management, Umeå. Umeå: SLU, Dept. of Forest Ecology and Management.* <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:slu:epsilon-s-7355>
- Henry M., Valentini R., Bernoux M., (2011). Soil carbon stocks in ecoregions of Africa. *Biogeosci. Discuss.* <https://doi.org/10.5194/bgd-6-797-2009>
- Henry, M., Picard, N., Trotta, C., Manlay, R., Valentini, R., Bernoux, M., & Saint André, L. (2011). Estimating tree biomass of sub-Saharan African forests: a review of available allometric equations. (2011). Estimating tree biomass of sub-Saharan African forests: a review of available allometric equations
- Hiernaux, P., & Le Houérou, H. N. (2006). Les parcours du Sahel. *Sécheresse*, 17(1-2), 51-71.

- Hollander, M., and D. A. Wolfe. (1999). *Nonparametric Statistical Methods*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.
- Houghton, R. A. and Castanho, A. (2023). Annual emissions of carbon from land use, land-use change, and forestry from 1850 to 2020. *Earth Syst. Sci. Data*, **15**, 2025–2054. <https://doi.org/10.5194/essd-15-2025-2023>, 2023.
- Hu, X., Næss, J. S., Iordan, C. M., Huang, B., Zhao, W., & Cherubini, F. (2021). Recent global land cover dynamics and implications for soil erosion and carbon losses from deforestation. *Anthropocene*, **34**, 100291
- IPBES. (2018b). The IPBES regional assessment report on biodiversity and ecosystem services for Africa. Archer, E., Dziba, L., Mulongoy, K.J., Maoela, M.A. et Walters, M. (sous la dir. de), Secrétariat de la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques, Bonn, Allemagne, 492p.
- IPCC. (2006). *Guidelines for national greenhouse gas inventories*. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Eggleston HS, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K., JAPAN: editors. Published : IGES, Japan
- IRD. (2020). Quantifier le carbone du sol la croisée des enjeux. *Institut de recherche pour le développement (IRD)*. <https://www.ird.fr/quantifier-le-carbone-du-sol-la-croisee-des-enjeux>, consulté le 28/06/2023
- Jarque, C. M., and A. K. Bera. (1987). “A Test for Normality of Observations and Regression Residuals.”. *International Statistical Review.*, Vol. **55**(No. 2), pp. 163–172. <https://doi.org/10.2307/1403192>
- Jerome, W., Scott, K., & Bret, L. (2022). Soil Moisture Retention on the High Plains of North America via Compost Amendments: A Longitudinal Field Study. *Open Journal of Soil Science*, **12**, 295-322. <https://doi.org/10.4236/ojss.2022.127013>
- Kganyago, M. and Shikwambana, L. (2019). Assessing Spatio-Temporal Variability of Wildfires and their Impact on Sub-Saharan Ecosystems and Air Quality Using Multisource Remotely Sensed Data and Trend Analysis. *Sustainability*, **11**(23), p6811. <https://doi.org/10.3390/su11236811>
- Kiehl, K., Eischeid, I., Gettner, S., & Walter, J. (1996). Impact of different sheep grazing intensities on salt marsh vegetation in northern Germany. *Journal of Vegetation Science*, **7**(1), 99-106.
- Koala, J., Kagambega, O. R., & Sanou, L. (2013). Distribution des stocks de carbone du sol et de la biomasse racinaire dans un parc agroforestier à *Prosopis africana* (Guill., et Rich.) Taub au Burkina Faso, Afrique de l'Ouest. *Journal of Applied Biosciences*, **160**(1), 16482-16494
- Kogan, F. N. (2001). Operational space technology for global vegetation assessment. *Bulletin of the American meteorological society*, **82**(9), 1949-1964.
- Koné, B., Diedhiou, A., Sylla, M.B., Giorgi, F., Anquetin, S., Bamba, A., et al. (2018) Sensitivity Study of the Regional Climate Model RegCM4 to Different Convective Schemes over West Africa. *Earth System Dynamics*, **9**, 1261-1278. <https://doi.org/10.5194/esd-9-1261-2018>
- Kouassi, A.A., Kone, B., Silue, S., Dajuma, A., N'datchoh, T.E., Adon, M., Diedhiou, A. and Yoboue, V. (2022) Sensitivity Study of the RegCM4's Surface Schemes in the Simulations of West Africa Climate. *Atmospheric and Climate Sciences*, **12**, 86-104. <https://doi.org/10.4236/acs.2022.121007>
- Le Barbé, L., Lebel, T. and Tapsoba, D. (2002). Rainfall Variability in West Africa during the Years 1950–1990. *Journal of Climate*, **15**, 187–202. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<0187:RVIWAD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<0187:RVIWAD>2.0.CO;2)
- Le Houérou, H. N. (1997). Climate, flora and fauna changes in the Sahara over the past 500 million years. *Journal of Arid Environments*, **37**(4), 619-647.

- Lebel T. & Ali A. (2009). Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990-2007). *Journal of Hydrology*, **375**(1-2), p.52-64.
- L'hôte, Y., Mahé, G., Somé, B., & Triboulet, J. P. (2002). Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues. *Hydrological Sciences Journal*, **47**(4), 563-572.
- Li, W., MacBean, N., Ciais, P., Defourny, P., Lamarche, C., Bontemps, S., Houghton, R. A., and Peng, S. (2018). Gross and net land cover changes in the main plant functional types derived from the annual ESA CCI land cover maps (1992–2015). *Earth System Science Data*,. <https://doi.org/10.5194/essd-10-219-2018>
- Liu, S., Kaire, M., Wood, E., Diallo, O., & Tieszen, L. L. (2004). Impacts of land use and climate change on carbon dynamics in south-central Senegal. *Journal of Arid Environments*, **59**(3), 583-604.
- Loum, M., Viaud, V., Fouad, Y., Nicolas, H., & Walter, C. (2014). Retrospective and prospective dynamics of soil carbon sequestration in Sahelian agrosystems in Senegal. *Journal of arid environments*, **100**, 100-105.
- Lu, X., Bai, H., & Mu, X. (2016). Explaining the evaporation paradox in Jiangxi Province of China: Spatial distribution and temporal trends in potential evapotranspiration of Jiangxi Province from 1961 to 2013. *International Soil and Water Conservation Research*, **4**(1), 45-51.
- Lurton, T., Balkanski, Y., Bastrikov, V., Bekki, S., Bopp, L., Braconnot, P., ... & Boucher, O. (2020). Implementation of the CMIP6 Forcing Data in the IPSL-CM6A-LR Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **12**(4). <https://doi.org/10.1029/2019MS001940>,
- Luxereau, A. & Roussel, B. (1997). Changements écologiques et sociaux dans la région de Maradi au Niger. *Paris, l'Harmattan P*, 239.
- Mahé, G., & Paturel, J. E. (2009). 1896–2006 Sahelian annual rainfall variability and runoff increase of Sahelian Rivers. *Comptes Rendus Geoscience*, **341**(7), 538-546.
- Maillard, É., Angers, D.A., Chantigny, M., Lafond, J., Pageau, D., Rochette, P., Lévesque, G., Leclerc, M.-L., & Parent, L.-E. (2016). Greater Accumulation of Soil Organic Carbon after Liquid Dairy Manure Application under Cereal-Forage Rotation than Cereal Monoculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **233**, 171-178.
- Mallakpour, I., & Villarini, G. (2016). Analysis of changes in the magnitude, frequency, and seasonality of heavy precipitation over the contiguous USA. *Theoretical and Applied Climatology*, **130**(1–2), 345– 363. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1881-z>
- Mansourian S. et Berrahmouni, N. (2021). Examen de la restauration des forêts et des paysages en Afrique. Accra. FAO et AUDA-NEPAD. <https://doi.org/10.4060/cb6111fr>
- Marega, O. (2016). Changements socio-environnementaux et évolution des pratiques agropastorales en Afrique sahélienne : étude comparée entre le Ferlo (Sénégal), le Gourma (Mali) et le Fakara (Niger). *Université paris Diderot-Paris 7*; UMR 8586 PRODIG-CNRS, 2016. Français.
- Marega, O., Emeterio, J. L. S., Fall, A., & Andrieu, J. (2021). Cartographie par télédétection des variations spatio-temporelles de la couverture végétale spontanée face à la variabilité pluviométrique au Sahel: approche multiscalaire. *Physio-Géo. Géographie physique et environnement, (Volume 16)*, 1–28. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.11977>
- Martens, B., Miralles, D. G., Lievens, H., Van Der Schalie, R., De Jeu, R. A., Fernández-Prieto, D., & Verhoest, N. E. (2017). GLEAM v3: Satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture. *Geoscientific Model Development*, **10**(5), 1903-1925. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-1903-2017>
- Mba, B. M. M., Pennober, G., Revillion, C., Rouet, P., & David, G. (2022). Estimations, à partir de séries d'images LANDSAT, des évolutions de stocks de carbone de différentes

- formations en milieu équatorial côtier-cas de Libreville au Gabon. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, **223**, 217-231.
- Mbow, C. (2017). The great green wall in the Sahel. In *Oxford Research Encyclopedia of Climate Science*.
- Mbow, C., Chhin, S., Sambou, B., & Skole, D. (2013). Potential of dendrochronology to assess annual rates of biomass productivity in savanna trees of West Africa. *Dendrochronologia*, **31**(1), 41-51
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, Vol. 17*(No. 22), pp. 179–183.
- Ndiaye, D., Sagna, M.B., Talla, R., Diallo, A., Peiry, J.L. and Guisse, A. (2021). Evaluation of the Aerial Biomass of Three Sahelian Species in the Ferlo (North Senegal): *Acacia tortilis* (Forsk.) Hayn. *essp. Raddiana* (Savi) Brenan, *Acacia senegal* (L.) Willd and *Balanites aegyptiaca* (L.) Del. *Open Journal of Ecology*, **11**, 183-201. <https://doi.org/10.4236/oje.2021.112015>
- Ndiaye, P. M., Bodian, A., & Diop, S. B. (2022). Paradoxe d'évaporation dans la vallée du fleuve Sénégal. *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, **17**, 67-82.
- Ndiaye, P. M., Bodian, A., Diop, L., Deme, A., Dezetter, A., Djaman, K., & Ogilvie, A. (2020). Trend and sensitivity analysis of reference evapotranspiration in the Senegal river basin using NASA meteorological data. *Water*, **12**(7), 1957, 1-19.
- Ndour, Y. B., Sall, S. N., Loum, M., Diouf, A., Wélé, A., Ndiaye, O., ... & Lardy, L. C. (2020). Dynamique de stockage du carbone dans les sols du Sénégal : acquis de la recherche et perspectives. (IRD Éditions, Éd.) In : *Carbone des sols en Afrique : Impacts des usages des sols et des pratiques agricoles*. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.35002>
- N'Goran, A. J. A., Diouf, A. A., Diatta, S., Assouma, M. H., Djagoun, A. J., Assogba, G. G. C., ... & Taugourdeau, S. (2022). Variability of soil carbon stocks under and outside the tree crown in the sylvopastoral zone of Senegal. *Revue d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux*, **75**(3), 67-75.
- Nguyen-Xuan, T., Lam, S. L., Giorgi, F., Coppola, E., Giuliani, G., Gao, X., & Im, E. S. (2022). Evaluation of the performance of the non-hydrostatic RegCM4 (RegCM4-NH) over Southeastern China. *Climate Dynamics*, 1-19.
- Niasse, M., Afouda, A., & Amani, A. (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*. IUCN.
- Nicholson, S. (1993). An Overview of African's Rainfall Fluctuation of the Last Decade. *International Journal of Climatology*, **6**, 1463–1466. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<1463:AOOARF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<1463:AOOARF>2.0.CO;2)
- Nicholson, S. (2001). Climatic and Environmental Change in Africa during the Last Two Centuries. *Climate Research*, **17**, 123–144. <https://doi.org/10.3354/cr017123>
- Nicholson, S. E. (1979). Revised rainfall series for the West African subtropics. *Monthly Weather Review*, **107**(5), 620-623.
- Nicholson, S. E. (2013). The West African Sahel: A review of recent studies on the rainfall regime and its interannual variability. *International Scholarly Research Notices*, 2013.
- Nicholson, S.E., Davenport, M.L. & Malo, A.R. (1990). A comparison of the vegetation response to rainfall in the Sahel and East Africa, using normalized difference vegetation index from NOAA AVHRR. *Climatic Change*, **17**, 209–241. <https://doi.org/10.1007/BF00138369>
- OCDE. (2017). Green Growth Indicators 2017, OECD Green Growth Studies. Paris: Éditions OCDE, Paris. <https://doi.org/10.1787/9789264268586-en>.

- OCDE. (2023). Environment at a Glance Indicators. Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/ac4b8b89-en> (consultée le 26 août 2023).
- Oleson, K. W. (2010). Technical description of version 4.0 of the Community Land Model (CLM). *NCAR Technical Note*, 257.
- Oleson, K. W., Niu, G. Y., Yang, Z. L., Lawrence, D. M., Thornton, P. E., Lawrence, P. J., ... & Qian, T. (2008). Improvements to the Community Land Model and their impact on the hydrological cycle. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, **113**(G1).
- Öner, M., & Deveci Kocakoç, İ. (2017). JMASM 49: a compilation of some popular goodness of fit tests for normal distribution: their algorithms and MATLAB codes (MATLAB). *Journal of Modern Applied Statistical Methods*, **16**(2). <https://doi.org/10.22237/jmasm/1509496200>
- Organisation Météorologique Mondiale, OMM, M. Hayes et D. Wood. (2012). Guide d'utilisation de l'indice de précipitations normalisé. *OMM-N° 1090*, Genève.
- OSS (2015) « Sénégal : Atlas des cartes d'occupation du sol » - *Projet amélioration de la résilience des populations sahéliennes aux mutations environnementales - REPSAHEL*
- Ozer, P., Hountondji, Y. C., Niang, A. J., Karimoune, S., Laminou Manzo, O., & Salmon, M. (2010). Désertification au Sahel : historique et perspectives. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, **54**.
- Pal, J. S., Small, E. E., & Eltahir, E. A. (2000). Simulation of regional-scale water and energy budgets: Representation of subgrid cloud and precipitation processes within RegCM. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **105**(D24), 29579-29594.
- Panthou, G., Vischel, T., & Lebel, T. (2014). Recent trends in the regime of extreme rainfall in the Central Sahel. *International Journal of Climatology*, **34**(15), 3998-4006.
- Parker, D. J., Diop-Kane, M., & Lafore, J. P. (Eds.). (2018). Météorologie de l'Afrique de l'Ouest Tropicale : *In Le manuel du prévisionniste*. EDP Sciences.
- Pasiecznik, N. et C. Reij. (2021). Restauration des terres arides de l'Afrique. *Tropenbos International, Ede, Pays-Bas*. viii, 292.
- Pasiecznik, N., C. Reij. (2020). Restoring African Drylands. *ETFRN News* (60), 266.
- Paturel, J. E., Servat, E., Delattre, M. O., & Lubes-Niel, H. (1998). Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. *Hydrological sciences journal*, **43**(6), 937-946. <https://doi.org/10.1080/02626669809492188>
- Pettitt, A. N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, **28**(2), 126-135. <https://doi.org/10.2307/2346729>
- Pichelli E, Coppola E, Sobolowski S et al (2021) The first multi-model ensemble of regional climate simulations at kilometer-scale resolution part 2: historical and future simulations of precipitation. *Clim Dyn*. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05657-4>
- Plummer, S., Lecomte, P., and Doherty, M. (2017). The ESA Climate Change Initiative (CCI): A European contribution to the generation of the Global Climate Observing System. *Remote Sens. Environ.* **203**, 2-8. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.014>,
- Polo-Akpisso, A., Wala, K., Soulemame, O., Foléga, F., Akpagana, K., & Tano, Y. (2020). Assessment of habitat change processes within the Oti-Keran-Mandouri network of protected areas in Togo (West Africa) from 1987 to 2013 using decision tree analysis. *Sci*, **2**(1).
- Prein AF, Langhans W, Fosser G, Ferrone A, Ban N, Goergen K, Keller M, Tölle M, Gutjahr O, Feser F, Brisson E, Kollet S, Schmidli J, van Lipzig NPM, Leung R (2015) A review on regional convection-permitting climate modeling: demonstrations, prospects, and challenges. *Rev Geophys*, **53**, 323-361. <https://doi.org/10.1002/2014RG000475>

- PROGEDE. (2009). Bilan des réalisations du PROGEDE Janvier 1998-Décembre 2008. *Edition République du Sénégal*, Projet de Gestion Durable et Participative des Energies Traditionnelles et de Substitution, Rapport de travail, Dakar (Sénégal), 33.
- Razali, N. M., & Wah, Y. B. (2011). Power comparisons of Shapiro–Wilk, Kolmogorov–Smirnov, Lilliefors and Anderson–Darling tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, 2(1), 21–33.
- Redelsperger, J. L., Thorncroft, C. D., Diedhiou, A., Lebel, T., Parker, D. J., & Polcher, J. (2006). African Monsoon Multidisciplinary Analysis: An international research project and field campaign. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87(12), 1739–1746. <https://doi.org/10.1175/BAMS-87-12-1739>
- Ren, C., Ren, G., Zhang, P., Tysa, S. K., & Qin, Y. (2021). Urbanization significantly affects pan-evaporation trends in large river basins of China mainland. *Land*, 10(4), 407, p.1-11
- République du Sénégal, Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature. (2016). Rapport d'évaluation des stocks de carbone dans les massifs forestiers de la zone d'intervention du PROGEDE 2.
- Retiere, A. (2015). LAND DEGRADATION NEUTRALITY RAPPORT NATIONAL, Germany: United Nations Convention to Combat Desertification. <https://policycommons.net/artifacts/3135696/republique-du-senegal/3928929/>
- Reynolds, R. W., Rayner, N. A., Smith, T. M., Stokes, D. C., & Wang, W. (2002). An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *Journal of climate*, 15(13), 1609–1625.
- Roose E., Lelong F., Colombani J. (1983). Influence du bioclimat et de l'aménagement des sols sur les éléments du bilan Hydrique en Afrique. *J. Sc. Hydrologiques*, 28(2), 283–309. <https://doi.org/10.1080/02626668309491967>
- Ruster, J. (2009). Evolution du couvert végétal de la région de Tébékéré, par le biais de la télédétection. *Rapport de stage : Géographie. Paris. Université Diderot, Paris7.*, 65p
- Sagna, P. (1988). Perturbation cyclonique en Afrique de l'Ouest et précipitations enregistrées en Sénégal. *Veille Climatique Satellitaire*, (25), 39–46.
- Saley I. A., Sanda S. I., Bell J. P., Ly M., Salack S., Fode M., and A. Diedhiou. (2016). Impacts potentiels de la Grande Muraille Verte sur le climat du Sahel et de l'Afrique de l'Ouest. *Annales de l'Université Abdou Moumouni, Volume 1, Tome XXI–A*.
- Sanogo, S., Fink, A. H., Omotosho, J. A., Ba, A., Redl, R., & Ermert, V. (2015). Spatio-temporal characteristics of the recent rainfall recovery in West Africa. *International Journal of Climatology*, 35(15), 4589–4605.
- Sarr, M. A. (2009). Évolution récente du climat et de la végétation au Sénégal : cas du Bassin versant du Ferlo. (*Doctoral dissertation, Lyon 3*).
- Schucknecht, A., Meroni, M., & Rembold, F. (2016). Monitoring project impact on biomass increase in the context of the Great Green Wall for the Sahara and Sahel Initiative in Senegal. *European Commission Joint Research Centre, Ispra, Italy*. <https://data.europa.eu/doi/10.2788/639268>
- Schulte, J. A. (2015). New methods in wavelet analysis and their application to the understanding of hydroclimate variability in the Mid-Atlantic Region of the United States, Doctoral dissertation, The Pennsylvania State University.
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3/4), 591–611. <https://doi.org/10.2307/2333709> <https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>
- Sitz, L. E., Di Sante, F., Farneti, R., Fuentes-Franco, R., Coppola, E., Mariotti, L., ... & Giorgi, F. (2017). Description and evaluation of the Earth System Regional Climate Model (RegCM-ES). *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 9(4), 1863–1886.

- Solly, B. (2021). Dynamique des formations forestières de la Haute-Casamance (Sénégal) de 1965 à 2018, incidences sur les activités agro-sylvo-pastorales et stratégies d'adaptation (Doctoral dissertation, Université Assane Seck de Ziguinchor (Sénégal)).
- Solly, B., Andrieu, J., Diéye, E. H. B., & Jarju, A. M. (2022). Dynamiques contrastées de reverdissement et dégradation de la couverture végétale au Sénégal révélées par analyse de série temporelle du NDVI MODIS. *VertigO*, *22*(1), 1-24
- Solly, B., Diéye, E.H.B., Sy, O., Jarju A. M., et Sané T. (2021a). Détection des zones de dégradation et de régénération de la couverture végétale dans le sud du Sénégal à travers l'analyse des tendances de séries temporelles MODIS NDVI et des changements d'occupation des sols à partir d'images LANDSAT. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, *223*(1), 1-15. <https://doi.org/10.52638/rfpt.2021.580>
- STAR, N. (2018). Global vegetation health products. *Center for Satellite Applications and Research, NOAA, USA*.
- Sullivan, M. J., Talbot, J., Lewis, S. L., Phillips, O. L., Qie, L., Begne, S. K., ... & Zemagho, L. (2017). *Diversity and carbon storage across the tropical forest biome. Scientific reports*, *7*(1), 39102.
- Sultan, B., & Janicot, S. (2003). The West African monsoon dynamics. Part II: The “preonset” and “onset” of the summer monsoon. *Journal of climate*, *16*(21), 3407-3427.
- Sylla, D., Ba, T., & Guisse, A. (2019). Cartographie des changements de la couverture végétale dans les aires protégées du Ferlo (Nord Sénégal): cas de la réserve de biosphère. *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, (Volume 13), 115–132. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.8178>
- Sylla, D., Ba, T., Sarr, O., Sagna, M. B., Sarr, M. A., & Guisse, A. (2020). Spatio-temporal dynamics of the ecosystems of the Six Forages sylvopastoral reserve (Ferlo, North-Senegal). *SCIREA Journal of Geosciences*, *4*(2), 50–75.
- Sylla, D., Taibou, B. A., Diallo, M. D., Mbaye, T., Diallo, A., Peiry, J. L., & Guisse, A. (2019). Dynamique de l'occupation du sol de la commune de Tèssékéré de 1984 à 2015 (Ferlo Nord, Sénégal). *Journal of Animal & Plant Sciences (J. Anim. Plant Sci.)*, *40*(3), 6674–6689. <https://doi.org/10.35759/JANmPLSci.v40-3.2>
- Sylla, M. B., Pal, J. S., Wang, G. L., & Lawrence, P. J. (2016). Impact of land cover characterization on regional climate modeling over West Africa. *Climate dynamics*, *46*, 637-650.
- Taibou B, Seck D. (2012). Dynamique de l'occupation des sols, cartographie des CLPA, des zones de pêche et mise en place d'un système d'information géographique au Sénégal. *Rapport d'exécution University of Rhode Island, Narragansett RI*, p. 66
- Tappan, G., McGahuey, M., & Winterbottom, R. (2021). Restauration des paysages agricoles et des forêts sèches au Sénégal. *Restauration des terres arides de l'Afrique*, 31
- Teegavarapu, R. S. (2019). Methods for analysis of trends and changes in hydroclimatological time-series. In Trends and changes in hydroclimatic variables. *Elsevier*, pp.1–89. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810985-4.00001-3>
- Teng, H., Rossel, R. A. V., Shi, Z., Behrens, T., Chappell, A., & Bui, E. (2016). Assimilating satellite imagery and visible-near infrared spectroscopy to model and map soil loss by water erosion in Australia. *Environmental Modelling & Software*, *77*, 156
- Tomšik, R. (2019). Power Comparisons of Shapiro–Wilk, Kolmogorov–Smirnov and Jarque–Bera Tests. *Scholars J. Res. Math. Comput. Sci*, *3*(3), 238–243. <https://www.researchgate.net/publication/333133367>
- Touré H. A., Traoré K. et Kyei-Baffour N., (2017): Assessment of changing trends of daily precipitation and temperature extremes in Bamako and Segou in Mali from 1961- 2014. *Weather and Climate Extremes*, *18* (2017) 8–16.

- Touré, A., Emile, T., Claire, G., & Bo, E. (2013). Land use and soil texture effects on organic carbon change in dryland soils, Senegal. *Open Journal of Soil Science*.
- Touré, I., Ickowicz, A., Wane, A., Garba, I., Gerber, P., Atte, I., ... & Yahaya, S. (2012). Atlas des évolutions des systèmes pastoraux au Sahel : 1970-2012, *FAO et CIRAD*, 2012 ISBN : 978-92-5-107152-6.
- Traore, S.B., Ali, A., Tinni, S.H., Samake, M., Garba, I., Maigari, I., Alhassane, A., Samba, A., Diao, M.B., Atta, S., Dieye, P.O., Nacro, H.B. and Bouafou, K.G.M. (2014). AGRHYMET: A Drought Monitoring and Capacity Building Center in the West Africa. *Weather and Climate Extremes*, **3**, 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2014.03.008>
- Tschakert, P. (2004). Carbon for farmers: assessing the potential for soil carbon sequestration in the old peanut basin of Senegal. *Climatic change*, **67**(2-3), 273-290.
- UNCCD. (2018). *Default data: methods and interpretation. A guidance document for 2018 UNCCD reporting*. Bonn, Germany.: United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD)
- UNCCD. (2020). The Great Green Wall Implementation Status and Way Ahead to 2030. *Climatekos* gGmbH. https://catalogue.unccd.int/1551_GGW_Report_ENG_Final_040920.pdf
- Van den Dool, H., Huang, J., & Fan, Y. (2003). Performance and analysis of the constructed analogue method applied to US soil moisture over 1981–2001. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **108**(D16). <https://doi.org/10.1029/2002JD003114>
- Wang, X., Yang, M., & Pang, G. (2015). Influences of two land-surface schemes on RegCM4 precipitation simulations over the Tibetan Plateau. *Advances in Meteorology*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/106891>
- Wu, S., Gao, X., Lei, J., Zhou, N., & Wang, Y. (2020). Spatial and temporal changes in the normalized difference vegetation index and their driving factors in the desert/grassland biome transition zone of the Sahel region of Africa. *Remote Sensing*, **12**(24), 4119. <https://doi.org/10.3390/rs12244119>
- Xue, Y., Shukla, J. (1996). The influence of land surface properties on Sahel climate. Part II: Afforestation. *J. Clim.*, **9**, 3260–3275.
- Yang, Z. L., & Dickinson, R. E. (1996). Description of the Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the Soil Moisture Workshop and evaluation of its performance. *Global and Planetary Change*, **13**(1-4), 117-134.
- Zakey, A. S., Solmon, F., & Giorgi, F. (2006). Implementation and testing of a desert dust module in a regional climate model. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **6**(12), 4687-4704.
- Zeng, L., Xiong, L., Liu, D., Chen, J., & Kim, J. S. (2019). Improving parameter transferability of GR4J model under changing environments considering nonstationarity. *Water*, **11**(10), 2029.
- Zeng, X., Zhao, M., & Dickinson, R. E. (1998). Intercomparison of bulk aerodynamic algorithms for the computation of sea surface fluxes using TOGA COARE and TAO data. *Journal of Climate*, **11**(10), 2628-2644.
- Zhang, C., Ye, Y., Fang, X., Li, H. and Zheng, X. (2020). Coincidence Analysis of the Cropland Distribution of Multi-Sets of Global Land Cover Products. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **17**(3), p.707, p.707. <https://doi.org/10.3390/ijerph17030707>
- Zhang, J., Terrones, M., Park, C. R., Mukherjee, R., Monthieux, M., Koratkar, N., ... & Bianco, A. (2016). *Carbon science in 2016: Status, challenges and perspectives*. *Carbon*, **98**(70), 708-732.
- Zhang, M., Wang, K., Liu, H., Wang, J., Zhang, C., Yue, Y., & Qi, X. (2016). Spatio-temporal variation and impact factors for vegetation carbon sequestration and oxygen production

- based on rocky desertification control in the karst region of Southwest China. *Remote Sensing*, 8(2), 102.
- Zhao, K., Wulder, M. A., Hu, T., Bright, R., Wu, Q., Qin, H., Li, Y., Toman, E., Mallick B., Zhang, X., & Brown, M. (2019). Detecting change–point, trend, and seasonality in satellite time series data to track abrupt changes and nonlinear dynamics: A Bayesian ensemble algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 232, 111181. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.04.034>
- Zida, W.A., (2020). Dynamique du couvert végétal forestier des agrosystèmes sahéliens du nord du Burkina Faso après les sécheresses des années 1970-1980 : implication des pratiques d'aménagement des terres. Thèse partielle de doctorat, *Université du Québec à Montréal* (Canada), XIX, 173 p.

Articles tirés de la thèse

A. Recent Vegetation Cover Dynamics and Climatic Parameters Evolution Study in the Great Green Wall of Senegal.

Gore, B. T. O., Aman, A., Kouadio, Y., & Duclos, O. M. (2023). Recent Vegetation Cover Dynamics and Climatic Parameters Evolution Study in the Great Green Wall of Senegal. *Journal of Environmental Protection*, 14(4), 254-284. doi: [10.4236/jep.2023.144018](https://doi.org/10.4236/jep.2023.144018).

B. Estimation of the Carbon Sequestration Dynamics of Senegal's Great Green Wall Based on Land Cover over the Past Three Decades.

Gore, B. T. O., Aman, A., Kouadio, Y. K., Duclos, O. M., & Sato, K. (2023). Estimation of the Carbon Sequestration Dynamics of Senegal's Great Green Wall Based on Land Cover over the Past Three Decades. *Journal of Environmental Protection*, 14(12), 954-983. DOI: [10.4236/jep.2023.1412053](https://doi.org/10.4236/jep.2023.1412053)

Recent Vegetation Cover Dynamics and Climatic Parameters Evolution Study in the Great Green Wall of Senegal

Bi Tra Olivier Gore^{1,2}, Angora Aman^{1*}, Yves Kouadio¹, Ody-Marc Duclos³

¹Environment and Tropical Climate Sciences Team, UFR SSMT, Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire

²ASECNA, Abidjan, Côte d'Ivoire

³Fondation Cœur Vert, Abidjan, Côte d'Ivoire

Email: *angora.aman@gmail.com

How to cite this paper: Gore, B.T.O., Aman, A., Kouadio, Y. and Duclos, O.-M. (2023) Recent Vegetation Cover Dynamics and Climatic Parameters Evolution Study in the Great Green Wall of Senegal. *Journal of Environmental Protection*, 14, 254-284. <https://doi.org/10.4236/jep.2023.144018>

Received: February 27, 2023

Accepted: April 25, 2023

Published: April 28, 2023

Copyright © 2023 by author(s) and Scientific Research Publishing Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial International License (CC BY-NC 4.0). <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



Open Access

Abstract

The drought recorded in 1970s and 1980s, particularly in the Sahara and Sahel region has greatly affected the population as well as the economies and the eco-systems of this area. In 2007, the African Union launched a Pan-African program, the Great Green Wall for the Sahara, the Sahel Initiative (GGWSSI) to reverse land degradation and desertification by planting a wall of trees stretching from Dakar to Djibouti. The objective is to improve food security, and support local people to adapt to climate change. This paper aims to evaluate the impacts of the reforestation program in Senegal, fifteen years after it was launched. This study uses a time series of satellite-derived vegetation cover and climatic parameters data to analyze the sustainability of these interventions. Change detection approaches were applied to identify and characterize the drives of the eventual changes. A comparative analysis of reforestation on climatic parameters was explored through the temporal analysis of the vegetation index over the periods 2000-2008 and 2009-2020. An increase in vegetation activity was noted through the NDVI at the interannual (+2% to +8%) and seasonal (+1.5% to 7% for the wet season and 1% to 4% for the dry season) scale and a positive and significant evolution is noted on the trace of the GGW. Also, the period 2009-2020 recorded an increase in rainfall of 2% to 8% of the average value 2000-2020 and 4% to 8% of the rainy season. Soil moisture is the climatic parameter that has increased the most, with an increase of 25% to 54% of the 2000-2020 average, *i.e.* between 20 mm and 70 mm more. This study shows a significant improvement in the relationship between NDVI and climate parameters after the different reforestation actions of the GGW.

Keywords

Great Green Wall of Senegal, Vegetation Index, Precipitation, Soil Moisture

1. Introduction

The Sahel is the semi-arid transition region that lies between the arid Sahara Desert and wetter regions of equatorial Africa. It extends from the Atlantic Ocean in the West to the Indian Ocean in the East. The Sahel's latitudinal limits fluctuate with rainfall patterns. This region has experienced some of the most extreme climate events on earth in the 20th century, and data from 1900 shows clear long-term climate change with a tendency towards higher temperatures, lower precipitation and increased frequency of extreme event stressors such as floods and droughts [1]-[11]. The drought recorded particularly in the 1970s and 1980s has greatly affected the population as well as the economies and the ecosystems of this area. This drought observed in the Sahel during this period had no equivalent in the spatial dimension [2]. These dramatic events have severely impacted both populations and the Sahelian agro-pastoral landscapes, resulting in decreasing possibilities for the ecosystems to continue to provide many services, ensuring sustainability. Some of the striking illustrations of the drought are the displacement of the isohyets by about 200 km over the whole region and the dramatic shrinking of the area occupied by free waters in Lake Chad [12]. As we can note, the Sahel region is highly vulnerable to climate change because of its geographic location and the dependence of its population on rain-fed agriculture and transhumance systems.

Since the United Nations convention to combat desertification [13] and the improvement of the resilience of the human and natural systems to climate change, the concept to restore the continent's degraded landscapes and transform millions of lives in the Sahel has been developed by African Union Leaders [14] [15].

In 2007, the African Union launched a Pan-African program, the Great Green Wall for the Sahara, the Sahel Initiative (GGWSSI) to reverse land degradation and desertification in the region, improve food security, and support local people to adapt to climate change [16]. This ambitious project implemented across 22 African countries brings together African countries and international partners under the leadership of the African Union Commission and the Pan-African Agency of the Great Green Wall. Eleven countries in the Sahel-Sahara region-Djibouti, Eritrea, Ethiopia, Sudan, Chad, Niger, Nigeria, Mali, Burkina Faso, Mauritania, and Senegal adopted the GGWSSI to tackle the adverse social, economic and environmental impacts of desertification in the region. In recent years, northern Africa has seen the quality of arable land decline significantly due to climate change and poor land management. The bulk of the work on the ground was originally slated to be concentrated along a stretch of land from Djibouti, Djibouti, in the

east to Dakar, Senegal, in the west an expanse 15 kilometers (9 miles) wide and 7775 kilometers (4831 miles) long (**Figure 1**). Initially, the project was conceived as a way to combat desertification in the Sahel region and hold back the expansion of the Sahara, by planting a wall of trees stretching across the entire Sahel. The modern green wall has since evolved into a program promoting water harvesting techniques, greenery protection and improving indigenous land use techniques, aimed at creating a mosaic of green and productive landscapes across North Africa [14] [15] [17].

The GGW project aims to restore 100 million hectares of degraded land by 2030, capturing 250 million tons of carbon dioxide and creating 10 million jobs in the process. The Great Green Wall is a flagship program that will contribute to the goal of the United Nations Conference on Sustainable Development, or RIO + 20, of “a land degradation neutral world”.

As of March 2019, 15 percent of the wall was complete with significant gains made in Niger, Mauritania, Senegal and Ethiopia. In Senegal, over 18 million trees had been planted. In September 2020, it was reported that the Great Green Wall Senegal had only covered 4% of the planned area, with only 4 million hectares (9.8 million acres) planted [18]. Ethiopia has had the most success with 5.5 billion seedlings planted, but Chad has only planted 1.1 million. Doubt was

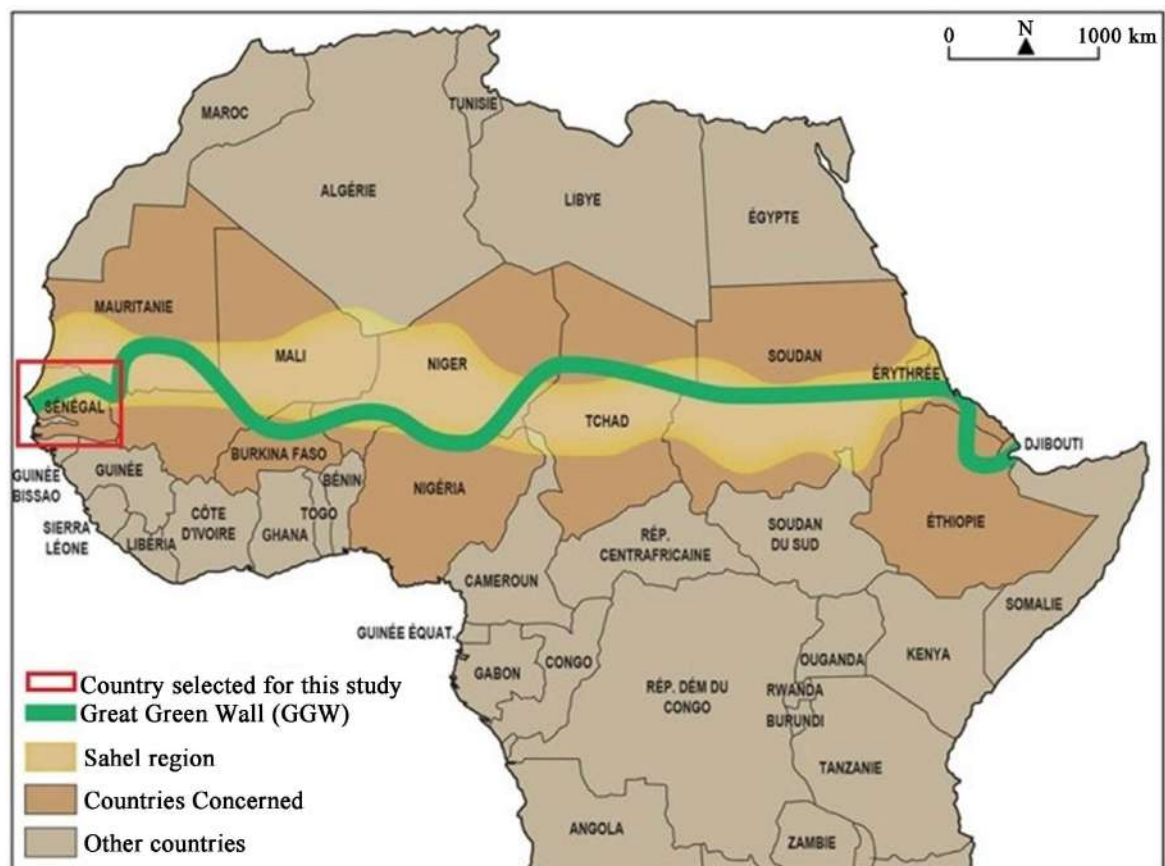


Figure 1. Location of the African Great Green Wall (Source: Agence de la Grande Muraille Verte; Crédit: <http://geoconfluences.ens-lyon.fr>, ENS de Lyon).

raised over the survival rate of the 18 million trees planted in Senegal. Examples of success include more than 50,000 acres of trees planted in Senegal. Many authors reported that progress was best in Senegal. Most of these are the acacia species *Senegalia Senegal*, which has economic value for the commodity it produces, gum arabic (gum arabic is primarily used as a food additive). A small portion of the trees is also fruit-bearing, which, when mature, will help combat the high levels of malnutrition in the country's rural areas. Even more dramatic is the project's potential social impact.

Fifteen years after the launch of the Pan-African program by the African Union, many studies have been conducted to evaluate the effectiveness of restoration and sustainability of the impacts of diverse interventions [16]. The study conducted by [16] focused on the project impact on biomass increase in the context of the GGW for the Sahara and Sahel Initiative Senegal. Time series satellite-derived precipitation estimates and Normalized Difference Vegetation Index data from 1981 to 2014 were utilized by [16] to characterize general precipitation and vegetation characteristics in the region and to compute long and short-term linear trends. This study noted that for some projects, slight positive changes after the intervention could be observed, indicating an increase in biomass. Other projects did not show any visible positive effect of the interventions. Our study utilizes a time series wider (1982-2020) than those of [16] and more climatic parameters to characterize the impacts of tree planting in Senegal. Furthermore, soil moisture which is an excellent indication of climatic change is performed.

In this study, some sites in Senegal were chosen as study areas as information was available through collaboration with the Fondation Cœur Vert. The objective of this study is to utilize a time series of satellite-derived vegetation cover and climatic parameters data to analyze general characteristics and trends.

The specific objectives of this paper are as follows:

- 1) Study the vegetation dynamic since the last 4 decades (1981-2020).
- 2) Analyze the impact of tree planting in Senegal based on climatic parameters from 2000 to 2020.

The structure of this paper could be summarized as follows:

The description of the study area, the data sources (vegetation index and climatic parameters) and the methods are described in Section 2. The results and discussions are presented in Section 3.

2. Data and Methods

2.1. Study Area

Senegal is a country in West Africa located between 12°8'N - 16°41'N and 11°21'W - 17°32'W. It has a surface area of 196,722 km² and an estimated population of 17,215,433 in 2021 [19]. This Sudanese-Sahelian country has few rivers and regular rainfall deficits. It also has a rainy season (from June to October) and a dry

season [20].

The rainy season peaks in August-September and varies with latitude. This rainy season corresponds to the monsoon period in the Sahel. Rainfall is lower in the north than in the south. The northern region of Senegal registers an average annual rainfall of about 400 mm, whereas in the south it reaches 1000 mm (**Figure 2**).

Figure 3 shows the Great African Green Wall (GGW) crossing northern Senegal.

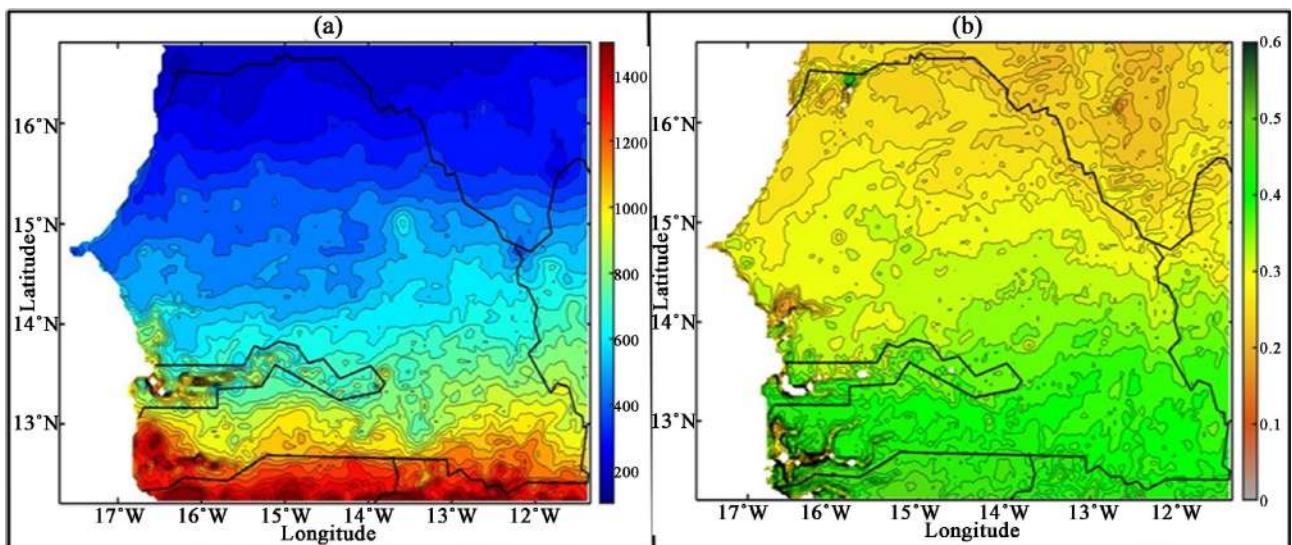


Figure 2. Spatial climatologies of annual (a) precipitation and (b) NDVI index in Senegal (1991-2020).

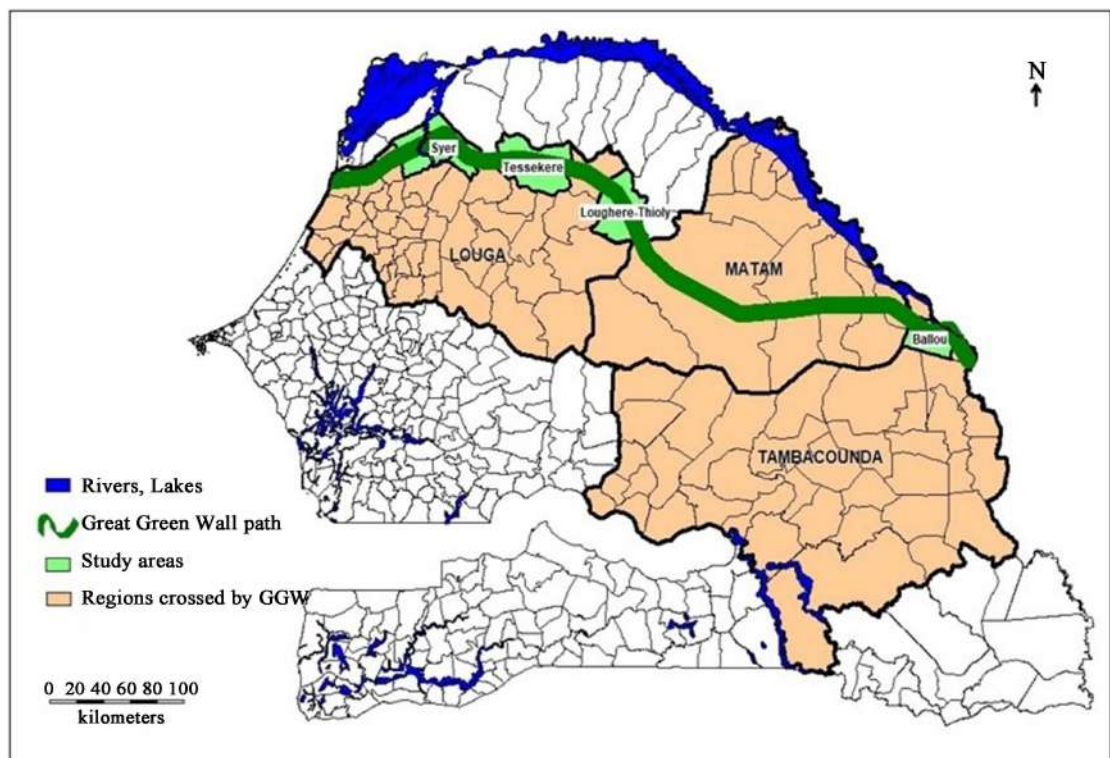


Figure 3. Location of study area and line of the GGW in Senegal.

It is 15 km wide and about 545 km long. It represents 7% of the total length of the GGW. This line covers a surface of 817,500 hectares. It passes through three regions: Louga, Matam and Tambacounda (**Table 1**). For this study, we selected at least one site in each region that has been subjected to various GGW reforestation surveys since 2006 (see **Table 1** and **Figure 3**).

2.2. Data Sources

Vegetation and climate dynamics are studied using Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Vegetation Health (VH), soil moisture, and Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations (CHIRPSs) precipitation data.

NDVI and VH data were obtained from the National Oceanic and Atmospheric Administration Climate Data Record Program (NOAA-CDR, <https://www.ncei.noaa.gov/data/avhrr-land-normalized-difference-vegetation-index/access/>) and Center for Satellite Applications and Research [21] (NOAA-STAR, https://www.star.nesdis.noaa.gov/pub/corp/scsb/wguo/data/Blended_VH_4km/VH/) databases, respectively. The NDVI index is derived from Advanced Very High-Resolution Radiometer (AVHRR) data from NOAA satellites since 1981. The VH are available from 1982 to the present. These indices have a resolution of 4 km and are available at daily to weekly time steps.

CHIRPS precipitation data are a combination of station observations, cloud top temperature data and climatology data. These data were originally produced for climate trend analysis and seasonal drought monitoring [22] [23]. They have a spatial resolution of 5 km and cover the period from 1981 to the present. They are available at <https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/>.

Monthly soil moisture data are from the NOAA Climate Prediction Center (CPC) database and are available since 1948. These data are available on <https://www.psl.noaa.gov/data/gridded/data.cpcsoil.htm>. They represent a monthly average of soil water equivalent with a horizontal resolution of $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ over the entire globe. Soil moisture data are provided by a one-layer hydrological model [24]. The model uses observed precipitation and temperature data to derive soil moisture, evapotranspiration and runoff.

Table 1. Regions, departments and communes covered by GGW in Senegal and sites selected for this study (*) [19].

Administrative regions (inhabitants of region)	Departments	Municipalities	Length of GGB (km)	Inhabitants
Louga (1,091,268)	Louga. Linguere	Leona, NgueuneSarr, Sakal, Keur Momar Sarr, Syer*, Mboula, Tessekere* et Labgar	225	130,057
Matam (760,588)	Kanel.Ranerou	Loughéré-Thioly*, Oudalaye, Ourou Sidy, Dendory et Aoure	250	134,830
Tambacounda (904,032)	Bakel	Ballou*, Gabou et Bele	70	57,334
Total: 3 regions	5	16	545	322,221

2.3. Methodology

2.3.1. Vegetation and Rainfall Variability Analysis

This sub-section outlines the methods used to examine long-term trends and multi-year variations in vegetation and precipitation data. The Locally Estimated Scatterplot Smoothing (LOESS) regression method is used. It allows the adjustment of a window width equal to 100% (*i.e.* long-term trends) and 25% (*i.e.* short-term trends) of the number of values respectively [25].

The calculation of Standardized Precipitation Anomalies (SPIs) and Vegetation Anomalies Index (VAI) is used to remove the seasonal and climatic signal from the monthly and annual series respectively. In the case of SPI, it allows the user to highlight the different modes of variability and the different periods of parameter evolution, such as wetness, drought or vegetation stress. A negative SPI indicates drought, while a positive index denotes wet conditions [26]. **Table 2** shows different SPI values as defined by the World Meteorological Organization [27]. Subsequently, the SPI is used to detect extreme events in vegetation and precipitation.

The VAI is a measure of water stress in vegetation. This monthly quantitative index describes vegetation conditions. A positive value indicates satisfactory vegetation dynamics, while a negative value indicates vegetation stress.

2.3.2. Identifying Breaks in Vegetation and Climate Series

The Pettitt's test [28] is used to check for breaks in vegetation and climatic time-series. The probability associated with this test is interpreted in accordance with **Table 3** [29] to estimate the significance of the break.

The Bayesian Estimator of Abrupt Change, Seasonal Change and Trend

Table 2. SPI index as defined by the World Meteorological Organization (WMO) [27].

≥ 2.0	Extremely wet
1.5 - 1.99	Very wet
1 - 1.49	Moderately wet
-0.99 - 0.99	Nearly normal
-1.0 - -1.49	Moderately dry
-1.5 - -1.99	Very dry
≤ -2.0	Extremely dry

Table 3. Probability related to the Pettitt's test.

Related probability	Class
<1%	Very significant break
1% - 5%	Significant break
5% - 20%	Minor break
>20%	Homogeneous series (non-significant break)

(BEAST) algorithm [30] is also used to search for breaks in the climate and vegetation time series. BEAST decomposes a time series into a seasonal signal, a trend, an abrupt change and a noise signal. The variables that give the seasonal and trend components provide information on the probability, the confidence intervals and the number of abrupt changes that are estimated by the algorithm.

2.3.3. A Comparative Analysis of Vegetation and Climatic Changes before and after Reforestation in the GGW of Senegal

The aim is to compare the evolution of the different climatic parameters and the vegetation between 2000 and 2008, before the reforestation, and between 2009 and 2020, after the reforestation. First, the temporal evolution of the NDVI index between the two periods is compared using Student's and Mann-Whitney-Wilcoxon means tests [31] [32] [33] at 95% and 99% confidence levels. These tests are selected by applying the normality tests of Shapiro [34], Jarque-Bera [35], Kolmogorov-Smirnov and D'Agostino [36] [37] [38] (**Table 4**). The dynamic relationships between vegetation and climatic parameters are then assessed using temporal correlations at 95% and 99% confidence levels.

3. Results and Discussions

3.1. Vegetation Cover and Rainfall Analysis in the Senegalese GGW from 1982 to 2020

This section is devoted to the temporal analysis of the vegetation cover through the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) over the period 1982-2020. Afterwards, an analysis of precipitation indicators variability from 1981 to 2020 is followed.

3.1.1. Analysis of the Vegetation Cover Dynamic in the Senegalese Great Green Wall

1) Monthly Spatial climatology of vegetation index in Senegal

The Senegal normal climatology of the vegetation cover is represented in **Figure 2(b)** based on NDVI data computed over 1991-2020. This figure shows a zonal distribution of the vegetation cover with NDVI values decreasing from south to north (**Figure 4**).

In the south (12°N and 13°N), the NDVI values are between 0.4 and 0.5 and

Table 4. Selecting means comparison tests and computing correlation coefficients.

Verification of data normality	Shapiro-Wilk test, Jarque-Bera test, Kolmogorov-Smirnov test and D'Agostino test	
Normality and tests	Normal (parametric test)	Not Normal (non-parametric test)
Comparison of means	Student's test (95% and 99% confidence levels)	Mann Whitney-Wilcoxon test (95% and 99% confidence levels)
Correlation	Pearson correlation (95% and 99% confidence levels)	Kendall or Spearman correlation (95% and 99% confidence levels)

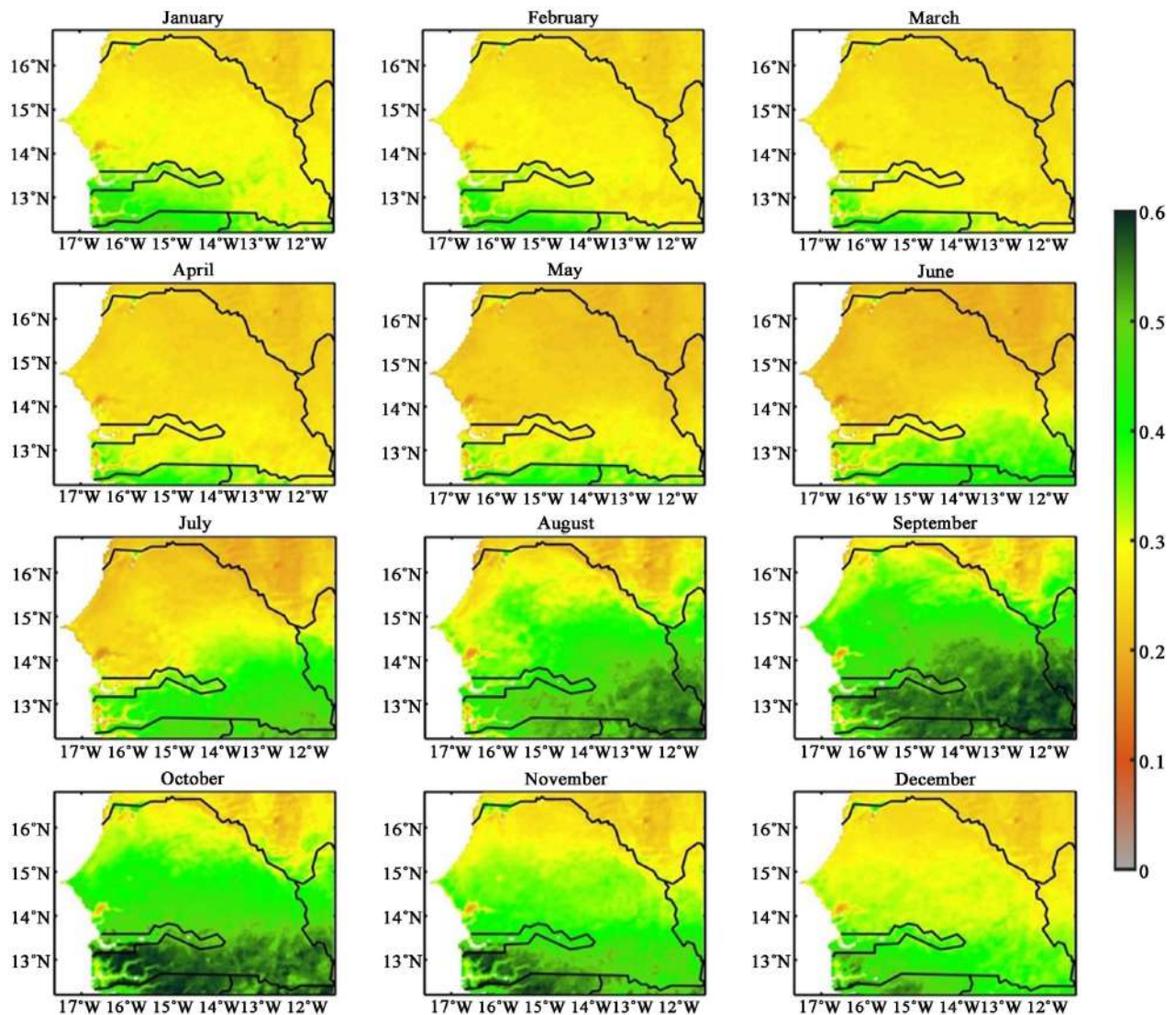


Figure 4. Monthly climatology of the vegetation index (NDVI) in Senegal over the period 1991-2020.

correspond generally to clear and dense forest.

The NDVI values between 0.3 and 0.4 represent savannah areas and are located on the latitude 13°N - 15°N.

The latitude between 15°N - 17°N is dominated by the steppe corresponding to NDVI values varying from 0.2 to 0.3.

The Senegalese growing vegetative season extends from July to November. In the north, this season starts generally in August and ends in October. The highest NDVI values are recorded in the south reaching 0.6 (**Figure 4**).

2) Temporal vegetation cover evolution in the Senegalese GGW (1982-2020)

The analysis of the temporal vegetation cover evolution is based on Vegetation Anomaly Index computed over 1982-2020 period (**Figure 5**). This figure highlights the variability of the vegetation cover evolution. An alternation of negative and positive behavior of the vegetation dynamic is observed in the different regions during the study period. However, the difference in the length of

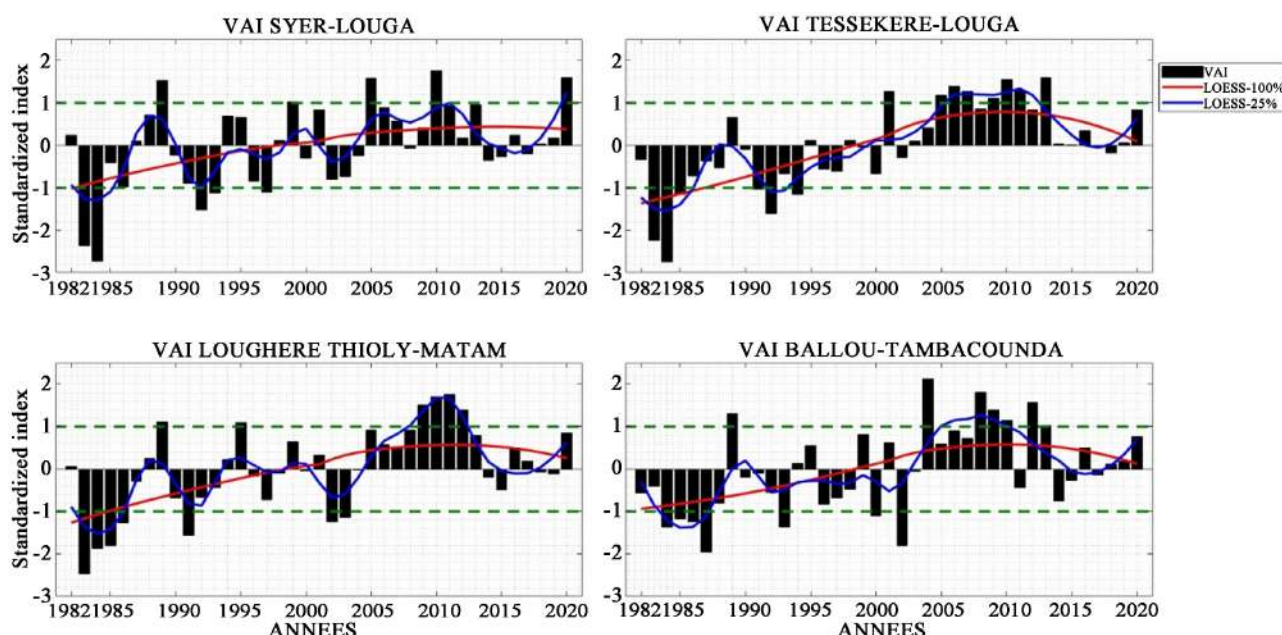


Figure 5. Evolution of vegetation index anomalies in Syer, Tessekere, LoughereThioly and Ballou GGW-Senegal from 1982 to 2020.

time and between the beginning and the end of each period vary from one region to another.

The shape of the long trend lines allows us to group the different sites on two (Tessekere and Loughere-Thioly) and three (Syer and Ballou) vegetation cover dynamics (**Figure 5**).

The long-term trend (LOESS-100%) on Syer (Lougá) and Ballou (Tabacounda) reveals three periods corresponding to two abrupt changes in the vegetation cover dynamics. The first one corresponds to the stress of the vegetation cover (negative dynamic) from 1982 to 1997 on Syer site and at Ballou (1982-1999). The second one (positive anomaly) occurs at Syer (1998-2017/2018) and at Ballou (2000-2019). The third phase (negative dynamic) took place respectively during 2019-2020 (Syer) and 2020 (Ballou).

Two evolution regimes are observed on the long-term trend on Tessekere and Loughere-Thioly sites. There is a shift from negative (1982-1999) to positive (2000-2020) dynamics in 1999 on the two sites.

Globally, we can notice that the vegetation cover index presents a negative anomaly from 1982 to the end of the 1990 decade on all the Senegalese GGW sites.

3.1.2. Temporal Analysis of the Precipitation in the Senegalese Great Green Wall

According to [39], the major causes of land degradation stem from climatic conditions, including an arid environment and low irregular rainfall patterns. The aridity is becoming pronounced due to a reduction in the mean annual rainfall. The analysis of the climatic periods is based on the Standard Precipitation Index (SPI) usually carried out to quantify wetness/dryness of a given rainy season with respect

to the climatology.

Figure 6 shows the evolution of the Standard Precipitation Index in Syer, Tessekere, Loughere-Thioly and Ballou localities. Two and three phases are observed through the non-parametric estimators have been performed. A first phase of a highlighting persistent drought period is observed from 1981 to 1997/1998 including a severe drought during 1981-1985 and 1990-1993 periods ($SPI < -1.5$) for the entire study zone. The second phase indicates a precipitation recovery of the wet conditions since 1998/1999. During this period, consecutive wet years are observed characterizing by a value of SPI greater than 1.5 (Syer and Tessekere: 2009-2011; Loughere-Thioly and Ballou: 2009-2012). In the last phase, a consistently decreasing of the precipitation is noted after the year 2018 (Syer and Tessekere: 2018-2020; Ballou: 2019-2020).

The interannual analysis based on LOESS-25% shows a short period of 3 wet years from 1987 to 1989 in Syer, Tessekere and Loughere-Thioly during the long dry period extending from 1981 to 1998. This observation is valid in 2015-2018 period in which a very short wet condition took place (1999-2020).

3.1.3. Breakpoints Analysis Derived from Vegetation and Climatic Parameters Time Series at Annual and Seasonal Scales in the Study Area

This section focuses on the detection of breakpoints relative to vegetation indices and climatic parameters (precipitation, soil moisture) time series. In statistic and signal processing, step detection is the process of finding abrupt changes in the mean level of a time series or signal. This method could help to establish and identify any probable causes. Parametric and non-parametric approaches are used

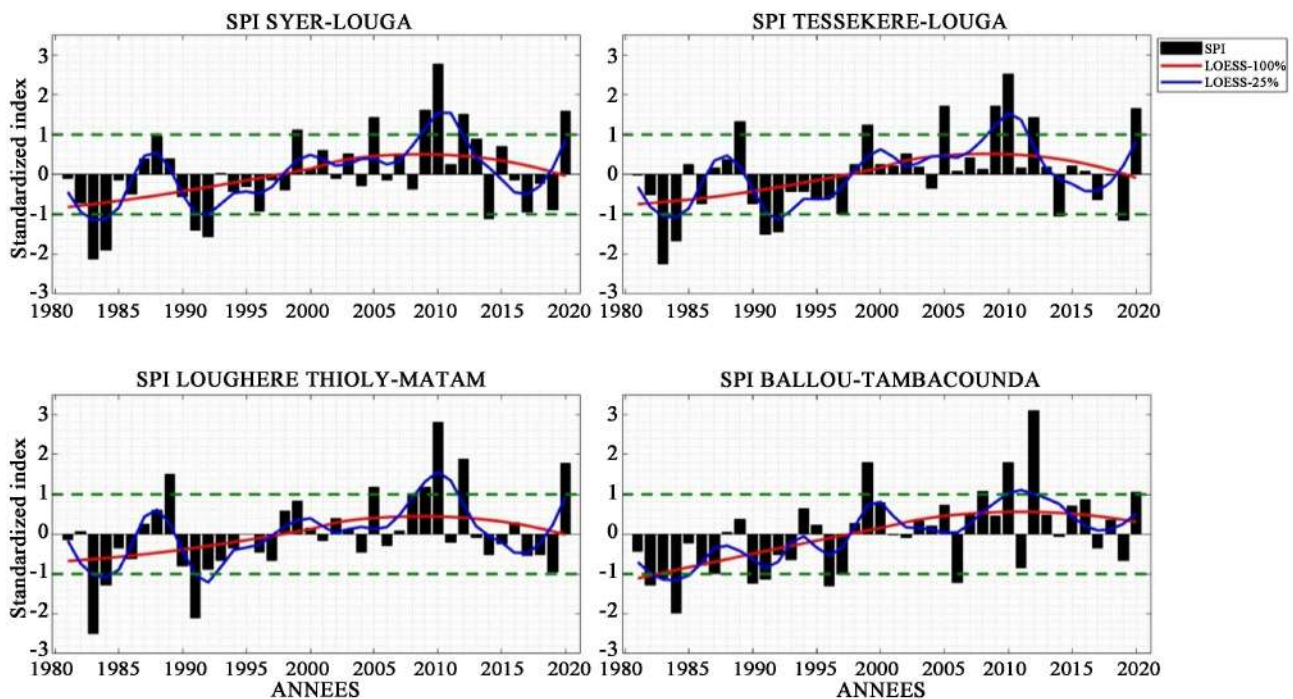


Figure 6. Evolution of precipitation anomalies in Syer, Tessekere, Loughere-Thioly and Ballou GGW-Senegal from 1981 to 2020.

to detect the breakpoints in vegetation indices and climatic parameters. The parametric approaches require features to follow specific statistical distributions, such as normal distribution and they are very sensitive to outliers. The non-parametric approaches do not require any prior assumption about the distribution characteristics of samples [40]. The detection of breakpoints is based on Pettitt's test (parametric approach) which is widely used in hydro-climatological studies for addressing abrupt change within the time series, allowing the detection of a single shift at unknown time t [41]. The second approach is based on Bayesian Estimator of Abrupt Change (non-parametric). This method is developed to identify gradual and abrupt change, allowing the detection of multiple breakpoints, while explicitly considering seasonal variations.

1) Breakpoints detection analysis based on Pettitt's test

Figure 7 and Table 5, Table 6 give the main breakpoints of the mean NDVI, precipitations and soil moisture data during the 1981-2020 period. Regarding the results of Table 5 and Table 6, the significant breakdates of annual precipitation detected are 1997 for Tessekere and Loughere-Thioly and 1998 for Ballou and Syer. The precipitation data relative to the wet seasons presents significant breakpoints. Those of the dry seasons are less significative.

Very significant breakpoints for annual NDVI are observed at Syer (2000), Loughere-Thioly (2004), Ballou (2002) and Tessekere in 2004. At seasonal level, the breakpoints relative to NDVI values are more significant in the dry seasons than in wet seasons. The Vegetation Health Index (VHI) time series present breakdates which occur before those detected in the NDVI data time series or at

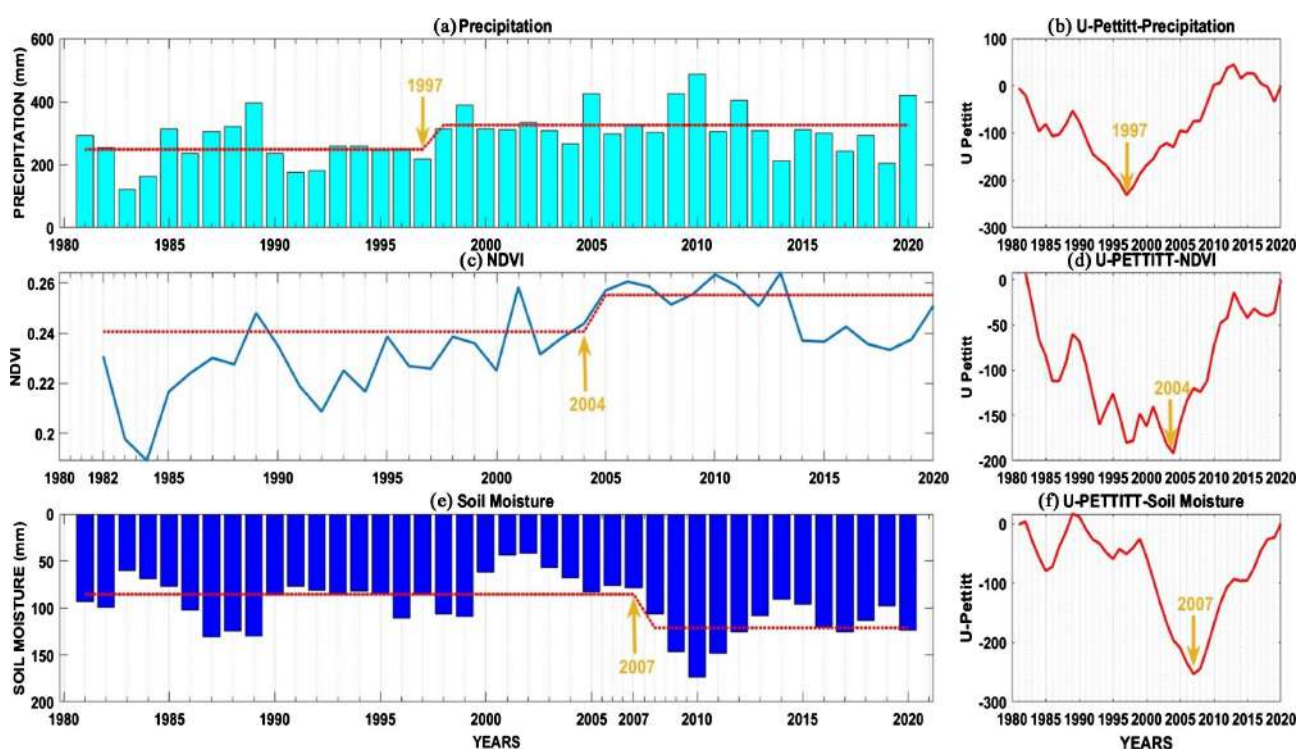


Figure 7. Interannual evolutions of NDVI, precipitation, soil moisture and Pettitt's test from 1981 to 2020 in Tessekere.

the same dates. The breakdates at Syer, Loughere-Thioly, Tessekere and Ballou are respectively detected in 1997, 2003, 2004 and 2002. The significant break-points during the wet seasons based on VHI values are detected in October 1997 at Syer, Tessekere and Loughere-Thioly and October 2002 at Ballou. **Figure 7** showed that the breakdates performed with soil moisture data time series are identified for all of the study areas in 2007, excepted in Ballou where a non-significant break change took place in 2002.

It can be noted that the mean values of NDVI and climatic parameters

Table 5. Break dates and vegetation statistics (NDVI, VHI) of the Pettitt's test.

Pettitt's test Sites	NDVI				VHI			
	Break date	Average before breakdate	Average after breakdate	Pettitt's statistics (U and P-value)	Break date	Average before breakdate	Average after breakdate	Pettitt's statistics (U and P-value)
Annual data								
Syer	2000	0.224	0.248	U = 324 Pv = 6.310^{-5}	1997	42.47	53.66	U = 304 Pv = 2.210^{-4}
Tessekere	2004	0.240	0.255	U = 192 Pv = 0.05	2004	46.50	50.52	U = 112 Pv = 0.58
Loughéré-thioly	2004	0.237	0.257	U = 236 Pv = 0.008	2003	41.82	52.01	U = 202 Pv = 0.03
Ballou	2002	0.274	0.288	U = 256 Pv = 0.003	2002	45.81	51.15	U = 162 Pv = 0.15
Growing season								
Syer	08/2003	0.255	0.295	U = 1826 Pv = 8.310^{-6}	10/1997	41.67	54.88	U = 1576 Pv = 1.910^{-4}
Tessekere	10/2004	0.295	0.320	U = 870 Pv = 0.12	10/1997	44.91	54.68	U = 892 Pv = 0.10
Loughere-thioly	08/2004	0.290	0.321	U = 1150 Pv = 0.01	10/1997	41.86	54.57	U = 1272 Pv = 0.005
Ballou	08/2003	0.38	0.40	U = 760 Pv = 0.23	10/2002	45.82	59.07	U = 1690 Pv = 4.910^{-5}
Dry season								
Syer	07/1997	0.21	0.23	U = 14372 Pv = 7.710^{-13}	03/1998	42.79	53.38	U = 16216 Pv = 3.110^{-16}
Tessekere	07/1997	0.219	0.23	U = 9199 Pv = 1.610^{-5}	11/2004	46.14	48.96	U = 9494 Pv = 0.12
Loughere-thioly	07/2003	0.218	0.236	U = 10864 Pv = 1.610^{-7}	07/2003	40.98	50.59	U = 12222 Pv = 2.110^{-9}
Ballou	06/2003	0.23	0.251	U = 8172 Pv = 1.910^{-4}	06/2003	45.44	49.07	U = 5694 Pv = 0.02

Table 6. Break dates and statistics of precipitation and soil moisture of Pettitt's test.

Pettitt's test Sites	Precipitation				Soil moisture			
	Break date	Average before breakdate	Average after breakdate	Pettitt's statistics (U and P-value)	Break date	Average before breakdate	Average after breakdate	Pettitt's statistics (U and P-value)
Annual data ("precipitation(mm/year)" and "soil moisture (mm/month)")								
Syer	1998	228.53	294.12	U = 212 Pv = 0.03	2007	86.42	108.89	U = 195 Pv = 0.061
Tessekere	1997	248.15	325.65	U = 231 Pv = 0.01	2007	85.49	121.24	U = 253 Pv = 0.005
Loughere-thioly	1997	322.46	388.30	U = 195 Pv = 0.06	2007	88.39	117.32	U = 229 Pv = 0.016
Ballou	1998	481.89	580.90	U = 273 Pv = 0.002	2002	133.33	154.72	U = 142 Pv = 0.32
Wet season (mm/month)								
Syer	07/1997	66.41	87.50	U = 1179 Pv = 0.01	07/2005	102.41	136.13	U = 997 Pv = 0.065
Tessekere	08/1998	71.09	96.63	U = 1481 Pv = 0.001	07/2007	110.58	161.37	U = 1200 Pv = 0.014
Loughere-thioly	09/1997	93.58	114.36	U = 1017 Pv = 0.05	08/2004	115.35	152.10	U = 1049 Pv = 0.045
Ballou	07/1998	133.51	162.22	U = 1140 Pv = 0.02	07/2003	185.97	232.72	U = 1021 Pv = 0.055
Dry season (mm/month)								
Syer	10/1999	2.87	3.31	U = 3653 Pv = 0.36	06/2007	79.09	101.10	U = 5464 Pv = 0.043
Tessekere	05/2012	4.06	4.12	U = 1258 Pv = 1	06/2007	75.98	108.96	U = 8248 Pv = 3.210^{-4}
Loughere-thioly	10/1997	4.69	4.98	U = 174 Pv = 1	06/2007	78.07	104.69	U = 6772 Pv = 0.005
Ballou	03/2012	9.91	10.07	U = 940 Pv = 1	06/2003	113.39	132.65	U = 3794 Pv = 0.31

increase after the breakdates. The NDVI and the precipitation increase respectively from 5% to 10% and from 20% to 31%. The most significant rising value is recorded for the soil moisture with values between 26% to 37%.

2) Breakpoints detection analysis based on Bayesian Estimator of Abrupt Change, Seasonal Change and Trend (BEAST)

Figure 8 and Table 7 provide the breakdates, occurrence of probability breakpoints, the trend slopes of annual data of NDVI, precipitation and soil moisture during the 1991-2020 period. The trend decomposed by BEAST enables

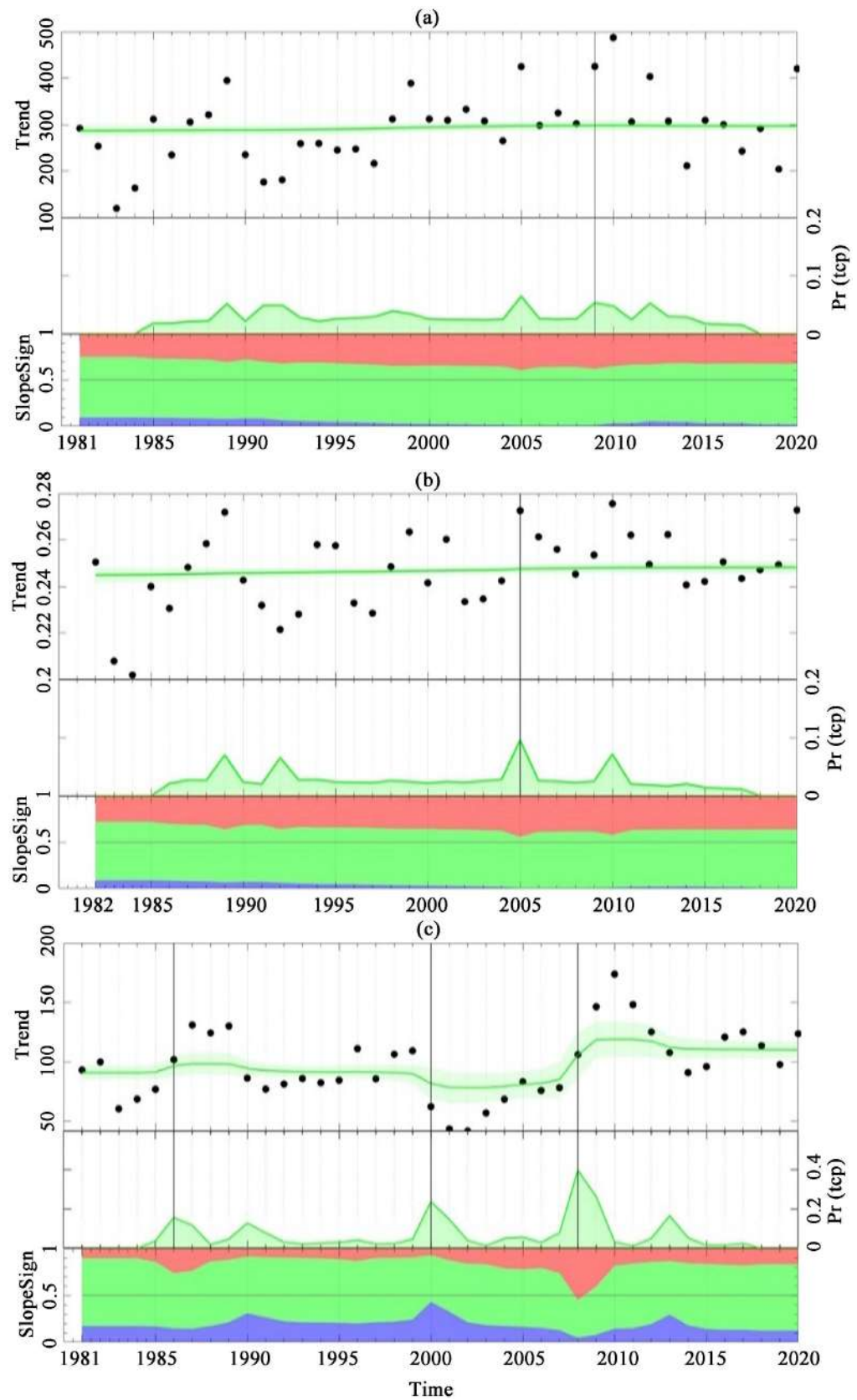


Figure 8. BEAST decomposition for annual (a) precipitation, (b) NDVI and (c) soil moisture from 1981 to 2020 in Tessekere.

Table 7. Break dates, probability of occurrence of breaks, and slope of trends in annual precipitation, NDVI, and soil moisture data of Bayesian BEAST test.

Parameters Sites	Precipitation			NDVI			Soil moisture		
	Year	Probability	Slope	Year	Probability	Slope	Year	Probability	Slope
SYER	2009	0.15	0.73	2014	0.41	−0.006	2010	0.20	0.40
	1992	0.12	0.41	2001	0.29	0.004	2002	0.17	0.12
	2012	0.11	−0.20	2005	0.20	0.001	1991	0.05	−0.001
	1999	0.09	1.20	1989	0.13	0.001			
				1992	0.07	0.0006			
TESSEKERE	1992	0.13	0.38	2005	0.16	0.0004	2008	0.67	18.88
	2012	0.12	−0.47	1989	0.13	0.0001	2000	0.42	−7.43
	1998	0.11	2.04	2010	0.12	9.3910^{-5}	1986	0.29	4.07
				1992	0.11	7.6610^{-5}	2013	0.25	−4.53
				1998	0.07	0.0001	1990	0.24	−3.03
LOUGHERE THIOLY	2010	0.17	0.27	2005	0.21	0.002	2009	0.53	12.38
	1991	0.16	0.12	2014	0.18	−0.001	2000	0.44	−11.76
	1998	0.08	0.65	1987	0.17	0.002	1986	0.38	9.08
	2005	0.07	0.43	1994	0.11	0.0007	1990	0.34	−7.04
							2013	0.30	−5.95
BALLOU	1999	0.31	9.87	2004	0.47	0.004	2002	0.19	0.24
	2010	0.14	1.33	1989	0.26	0.001	1997	0.18	0.05
	2006	0.12	1.06	2014	0.14	−0.0006	1985	0.05	0.09
	1994	0.09	2.71	2008	0.10	3.8610^{-5}			
				1994	0.07	0.0001			

identifying several distinct breakdates. Precipitation time series data exhibits positive trends in the periods 1991/1992, 1998/1999, 2005/2006, 2008/2009 and 2010. A negative trend is recorded in 2012 at Syer and Tessekere. Significant change points in annual mean values of NDVI with positive slopes were detected by BEAST in 1987 (Loughere-Thioly), 1989 (Syer, Tessekere, Ballou), 2001, 2004/2005, 2008 and 2010 (Syer). The break change points associated to negative slope is observed in 2014 in Syer, Loughere-Thioly and Ballou localities. In contrary, only breakpoints with positive slopes are detected in Tessekere.

The soil moisture time series are characterized by many breakpoints associated with high slope values. These breakpoints are detected during the years 1985/1986, 2002, 2008 (Tessekere), 2009 (Loughere-Thioly), 2010 (Syer). In contrast, the breakdates associated with negative slopes are detected in 1990/1991, 2000 and 2013 (Tessekere, Loughere-Thioly). The soil moisture time series of Ballou are characterized by breakpoints associated to positive slopes.

It was observed that changepoints are abrupt variations in time series data and may represent transition between different states. In this study, obtained these results based on the detection of breakdates in time series are in accordance with the standardized anomalies analyses associated with NDVI and precipitation dataset in the study area.

The significant breakdates detected by BEAST and Pettitt's test are similar to those found when analyzing the temporal values of NDVI and climatic standardized anomalies. These result agrees with the analysis of Sahelian SPI in the basis of data from 600 stations monitored by AGRHYMET Regional Centre which mentions two distinct periods [12]: the first period from 1950-1969 was characterized by a persistence of wet years and the second period from 1970 to 1993, by a persistence of over twenty dry years. So, the 1970s marked a change in climate in the Sahel. This study based on AGRHYMET stations shows three wet years recorded in the Sahel 1994-1999-2003.

The results of the NDVI variability, precipitation and the change point detection studies spanning over four decades revealed a negative dynamic of the vegetation cover (land cover degradation) due to the severe drought that occurred between 1982 and the end of 1990s. This period was characterized by many severe episode droughts recorded in 1970s, 1980s and 1990s in all the Sahelian regions [1]-[11]. Land degradation typically stems from both human-related and natural factors. Overfarming, overgrazing, rainfall deficit, and extreme weather are the most common causes of the reduction of the forests, savannah, and cultivated areas during the years 1980s, and 2000s. The rainfall deficit recorded in the study region was 11 to 20% during 1990-2020. In the Sahel, this rainfall deficit represents 15 to 25% comparing to the mean rainfall recorded from 1900 to 2015 and 25 to 50% during the wet period lasting from 1950 to 1967 [10]. During the years classified as drought years, there was a decrease of vegetative activities between 4% - 8.5%. A study conducted by [5] based on rainfall gauges over 1950-2006 period revealed that the period 1970-1990 was characterized by a continuous rainfall deficit of 50% compared to the previous 1950-1969 wet period at 15°N. They also noted a greater rainfall interannual variability during 1970-1990 and a contrast between western Sahel which remained dry and the eastern Sahel returning to wetter conditions.

According to [42], the spontaneous vegetation has undergone a strong regression in the Ferlo (Tessekere) region. [43] noted that the protected areas remained stable but there was a regression of the wooded and tree savannah areas. In the Ferlo region, the wooded and tree savannahs have respectively lost 306,305 and 160,576 ha for the benefits of shrub and wooded savannahs. [43] and [44] noted that the main causes of land degradation (extension of steppe areas) are due to the low irregular rainfall patterns, human activities, increase of the cattle and the human population [6] [7] [8] [9] [10] [45] [46].

One can observed a progressive dynamic of vegetation cover from 2000 to 2020. This progressive dynamic is observed one or two years after the recovery

of the precipitation. The wet condition started in 1997/1998. The regreenness of the vegetation increased from 1.5 to 3%. With the recovery of the precipitation (from 3 to 7% relative to the mean 1991-2020) after the 1980s and 1980s dry years, there was a regrowth of the vegetation cover.

This positive vegetation dynamic lies on the impacts of different projects implemented. In Senegal, several projects (e.g. reforestation, forage, and community gardens) have been implemented in the context of the GGWSSI by the Great Green Wall agency under the responsibility of the ministry of Environment, which concentrates funds for rehabilitation of soils and reforestation in a zone of Senegal (Programme d'Appui au Développement Agricole et à l'Entreprenariat Rural (PADAER) in 2011; [43] [47] [48] [49] and good management of local natural resources [10] [50] [51] [52]. According to [48] [49], 4,000 ha of bare soil have been restored in the Tessekere area. The decrease of the bare soil areas is due to the implementation of the agro-pastoral land development Germano-Senegalese project since 1986 funded by GTZ. This could explain the breakpoints associated with positive slopes detected at Tessekere and Loughere-Thioly respectively in 1989 and 1987. The extension of the cultivated areas in Tessekere was related to the GGW tree plantation project which started in 2005.

Within the GGWSSI, different kinds of projects have been implemented. Over the period 2005-2019, Senegal accounted for 4% of the restored land.

3.2. Comparative Analysis of the Impact of Reforestation over Climatic Parameters from 2000 to 2020 in the GGW Senegal

1) Analysis of normality tests vegetation (NDVI, VHI) and climatic parameters (precipitation, soil moisture) time series data

Tables 8-11 present the results of the tests applied to NDVI, VHI, precipitation and soil moisture data on annual and monthly scales over the period 1981-2020 (case of Syer). The NDVI, VHI, precipitation and soil moisture of annual time series data follow a normal distribution. But the same data set (except VHI) do not follow a normal distribution at monthly scale.

A comparison with student test (parametric test) is performed to assess the mean of annual NDVI and climatic parameters data and monthly VHI data. The comparison Mann Whitney-Wilcoxon (non-parametric test) is carried out in order to compare the NDVI, precipitation and soil moisture monthly mean values.

2) Interannual evolution of vegetation cover and climatic parameters during the period 2000-2020

Table 12 and **Table 13** represent respectively the mean annual statistics and those of mean wet seasonal (July-August-September) values of vegetation (NDVI, VHI) and climatic parameters (Precipitation, soil moisture) over the periods 2000-2020, 2000-2008 and 2009-2020 in the GGW Senegal study areas.

The NDVI shows an increase of 2% to 8% when comparing the periods 2000-2008 and 2009-2020. The NDVI recorded an increase of 1.5% to 7% during

Table 8. Results of normality tests of annual and monthly NDVI series of Syer locality.

Data (NDVI)	Test name	Test statistics	P-value	Normality decision (1: normal, 0: not normal)
Annual (number of years: 39)	Kolmogorov-Smirnov	0.58	0.88	1
	Shapiro-Wilk	0.96	0.18	1
	Jarque-Bera	1.77	0.41	1
	Dagostino & Pearson	2.59	0.27	1
Monthly (number of months 468)	Kolmogorov-Smirnov	1.90	0.001	0
	Shapiro-Wilk	0.96	3.40×10^{-10}	0
	Jarque-Bera	63.48	1.64×10^{-14}	0
	Dagostino & Pearson	49.74	1.59×10^{-11}	0

Table 9. Results of normality tests of annual and monthly VHI series of Syer locality.

Data (VHI)	Test name	Test statistics	P-value	Normality decision (1: normal, 0: not normal)
Annual (number of years: 39)	Kolmogorov-Smirnov	0.86	0.46	1
	Shapiro-Wilk	0.95	0.056	1
	Jarque-Bera	3.065	0.22	1
	Dagostino & Pearson	3.43	0.18	1
Monthly (number of months 468)	Kolmogorov-Smirnov	1.04	0.23	1
	Shapiro-Wilk	0.99	0.19	1
	Jarque-Bera	1.71	0.42	1
	Dagostino & Pearson	1.65	0.44	1

Table 10. Results of normality tests of annual and monthly precipitation series of Syer locality.

Data (precipitation)	Test name	Test statistics	P-value	Normality decision (1: normal, 0: not normal)
Annual (number of years: 40)	Kolmogorov-Smirnov	0.73	0.65	1
	Shapiro-Wilk	0.98	0.76	1
	Jarque-Bera	0.78	0.67	1
	Dagostino & Pearson	1.56	0.46	1
Monthly (number of months 480)	Kolmogorov-Smirnov	6.74	0	0
	Shapiro-Wilk	0.63	0	0
	Jarque-Bera	721.24	0	0
	Dagostino & Pearson	209.32	0	0

Table 11. Results of normality tests of annual and monthly soil moisture series of Syer locality.

Data (soil moisture)	Test name	Test statistics	P-value	Normality decision (1: normal, 0: not normal)
Annual (number of years: 40)	Kolmogorov-Smirnov	0.47	0.98	1
	Shapiro-Wilk	0.98	0.86	1
	Jarque-Bera	0.32	0.85	1
	Dagostino & Pearson	0.61	0.74	1
Monthly (number of months 480)	Kolmogorov-Smirnov	2.47	9.98×10^{-6}	0
	Shapiro-Wilk	0.91	3.33×10^{-16}	0
	Jarque-Bera	101.95	0	0
	Dagostino & Pearson	72.14	2.22×10^{-16}	0

Table 12. Annual mean statistics of the evolution of vegetation activity and climatic parameters of the localities of the GGW-Senegal from 2000-2020 (Student's t-test of comparison of means at the significance levels $\alpha = 0.05(*)$ and $\alpha = 0.01(**)$).

Sites	Parameters	PERIODS			Difference (2009-2020) from (2000-2008)	Evolution in % (2009-2020) and (2000-2008)
		2000-2020	2000-2008	2009-2020		
TESSEKERE (LOUGA)	NDVI	0.252	0.24	0.26	0.02	7.94%
	VHI	49.04	47.90	49.89	1.98	4.06%
	Precipitation	323.27	319.836	325.846	6.01	1.86%
	Soil moisture	99.38	68.57	122.5	53.93**	54.27%
SYER (LOUGA)	NDVI	0.247	0.247	0.25	0.003	1.21%
	VHI	53.31	53.03	53.52	0.49	0.92%
	Precipitation	291.85	282.2	299.08	16.88	5.78%
	Soil moisture	98.74	84.49	109.43	24.94**	25.26%
LOUGHERE-THIOLY (MATAM)	NDVI	0.253	0.247	0.257	0.01	3.95%
	VHI	49.62	46.64	51.86	5.22	10.52%
	Precipitation	385.82	377.77	391.85	14.08	3.65%
	Soil moisture	97.23	68.71	118.62	49.91**	51.33%
BALLOU (TAMBACOUNDA)	NDVI	0.285602	0.285604	0.285601	-3×10^{-6}	0.00%
	VHI	49.19	48.53	49.68	1.15	2.34%
	Precipitation	576.49	561.15	588	26.85	4.66%
	Soil moisture	150.24	151.75	149.1	-2.65	-1.76%

the wet season (JAS). The vegetative activities upgraded respectively 3.33 percent, 0.83 percent and 4.12 percent in Tessekere, Syer and Loughere-Thioly during the dry season. There is an increase of the Vegetation Health Index

Table 13. Mean statistics in wet season “JAS” of the evolution of vegetation activity and climatic parameters of the localities of the GGW-Senegal from 2000-2020 (Mann Whitney-Wilcoxon comparison test at the significance levels $\alpha = 0.05(*)$ and $\alpha = 0.01(**)$).

Sites	Parameters	PERIODS “Wetseason JAS”			Difference (2009-2020) from (2000-2008)	Evolution in % (2009-2020) and (2000-2008)
		2000-2020	2000-2008	2009-2020		
TESSEKERE (LOUGA)	NDVI	0.287	0.287	0.29	0.003	1.05%
	VHI	51.00	51.37	50.72	−0.66	−1.28%
	Precipitation	285.73	279.178	290.65	11.472	4.01%
	Soil moisture	132.45	94.77	160.71	65.94**	49.78%
SYER (LOUGA)	NDVI	0.264	0.266	0.27	0.004	1.52%
	VHI	54.27	54.15	54.36	0.21	0.39%
	Precipitation	261.78	250.5	270.25	19.75	7.54%
	Soil moisture	109.06	93.99	120.36	26.37*	24.18%
LOUGHERE-THIOLY (MATAM)	NDVI	0.282	0.27	0.29	0.02	7.09%
	VHI	50.09	47.91	51.71	3.8	7.59%
	Precipitation	339.86	329	348.01	19.01	5.59%
	Soil moisture	142.7	102.93	172.53	69.6**	48.77%
BALLOU (TAMBACOUNDA)	NDVI	0.369	0.374	0.366	−0.008	−2.17%
	VHI	51.93	52.67	51.37	−1.3	−2.50%
	Precipitation	480	454.68	499	44.32	9.23%
	Soil moisture	221.52	229.2	215.77	−13.43	−6.06%

Table 14. Interannual correlations between NDVI and precipitation, soil moisture of GGW-Senegal localities for the periods 2000-2020, 2000-2008 and 2009-2020 (at the significance levels $\alpha = 0.05(*)$ and $\alpha = 0.01(**)$).

Sites GWW-Senegal	Vegetation index	Climatic parameters	Periods		
			2000-2020	2000-2008	2009-2020
TESSEKERE (LOUGA)	NDVI	Precipitation	0.62**	0.54	0.72**
		Soil moisture	0.47*	0.35	0.69*
SYER (LOUGA)	NDVI	Precipitation	0.56**	0.29	0.75**
		Soil moisture	0.41	−0.07	0.78**
LOUGHERE-THIOLY (MATAM)	NDVI	Precipitation	0.56**	0.28	0.71*
		Soil moisture	0.75**	0.76*	0.85**
BALLOU (TAMBACOUNDA)	NDVI	Precipitation	0.38	0.06	0.72**
		Soil moisture	0.50*	0.55	0.46

(VHI) throughout the study areas from 2009 to 2020. This gain varies from +0.5 to +5.5 which means an evolution of 0.92 percent (Syer), 10.52 percent (Loughere-Thioly). Overall, this reflects an improvement of vegetation indices from the period 2009-2020 (after reforestation).

The annual precipitation values in 2000-2020 are higher than of climatological data computer over 1991-2020 on the GGW Senegal localities (see **Table 12**). An annual precipitation means values comparison between 2000-2008 and 2009-2020 indicates an increase of annual rainfall after 2009. These excesses mean annual rainfall represent 2 to 5 percent of the 2000-2020 rainfall mean value. This is an indicator of excellent wet seasons during JAS.

The interannual mean of soil moisture evolution is positive between the periods 2000-2008 and 2009-2020 in Syer, Tessekere and Loughere-Thioly localities. According to **Table 12**, the soil moisture increased by 25 to 55 percent which represents a depth of water in the ground of +24 to 54 mm. Moreover, there is an increase of soil moisture both in the dry and rainy seasons.

There is an increase of soil moisture from 24 to 50% in comparison of the period 2000-2020. This is equivalent to water in the ground of respectively 26.37 mm, 65.95 mm and 69.6 mm in Syer, Tessekere and Loughere-Thioly (**Table 12** and **Table 13**). The same observation can be noted during the dry season with a soil moisture of 17.49 mm (Syer), 49.93 mm (Tessekere) and 52.49 mm (Loughere-Thioly). In contrast, a decrease of soil moisture is recorded from the periods 2000-2008 to 2009-2020 in Ballou. This loss of water infiltration represents -1.76% at annual scale and -6.06% during the wet season (JAS).

3) Recent intra-seasonal variability of the vegetation index and the climatic parameters during the period 2000-2020

Figure 9 represents the seasonal variability of NDVI and VHI over Tessekere, Syer, Loughere-Thioly and Ballou localities for the periods 2000-2008 and 2009-2020. The graphic representing the NDVI seasonal evolution is unimodal with a pic observed in September. The peaks of the period 2009-2020 are higher than those of 2000-2008. In contrast, the seasonal evolution of the NDVI during the two periods is almost identical in Ballou where the reforestation is weak. In the other hand, the Vegetation Health Index representing in **Figure 9** shows a bimodal distribution. The main one takes place in September and the minor in February.

Figure 10 represents the seasonal precipitations and soil moisture patterns for the two analyzed periods. The cycles associated to these patterns are unimodal. The peaks of precipitation are observed in August for the 2000-2008 period while they occurred in September for 2009-2020. Moreover, the monthly precipitation means recorded during the wet seasons (JAS) in 2009-2020 are greater than those of 2000-2008.

The monthly values of the seasonal soil moisture patterns over the period 2009-2020 are greater than those of 2000-2008 in Syer, Tessekere and Loughere-Thioly localities. Moreover, it is recorded a gain of 50 to 100 mm in September-October in these areas. When comparing the soil moisture of the periods 2000-2008 to 2009-2020, it is observed a difference of around 150 mm/month from August to November for Syer, Tessekere and Loughere-Thioly (**Figure 10**). In contrast, there is a low decrease of soil humidity over 2009-2020 in Ballou.

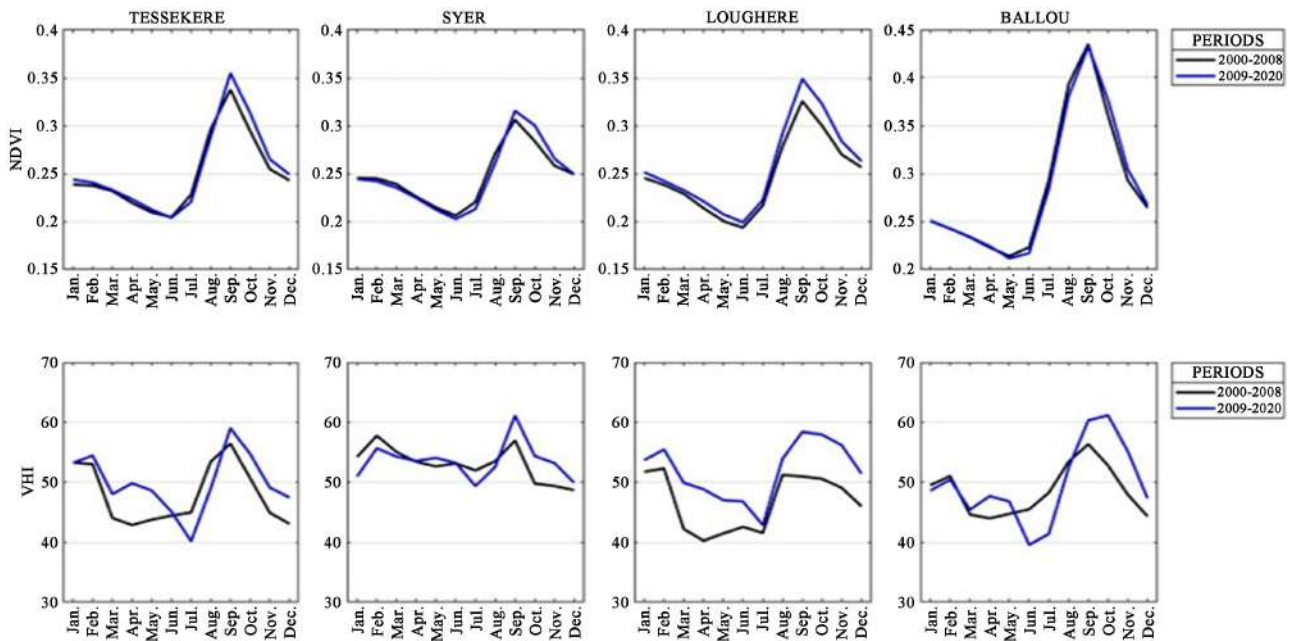


Figure 9. Seasonal cycle of NDVI and VHI of Tessekere, Syer (Louga), Loughere-Thioly (Matam), Ballou (Tambacounda) GGW-Senegal for the periods 2000-2008 and 2009-2020.

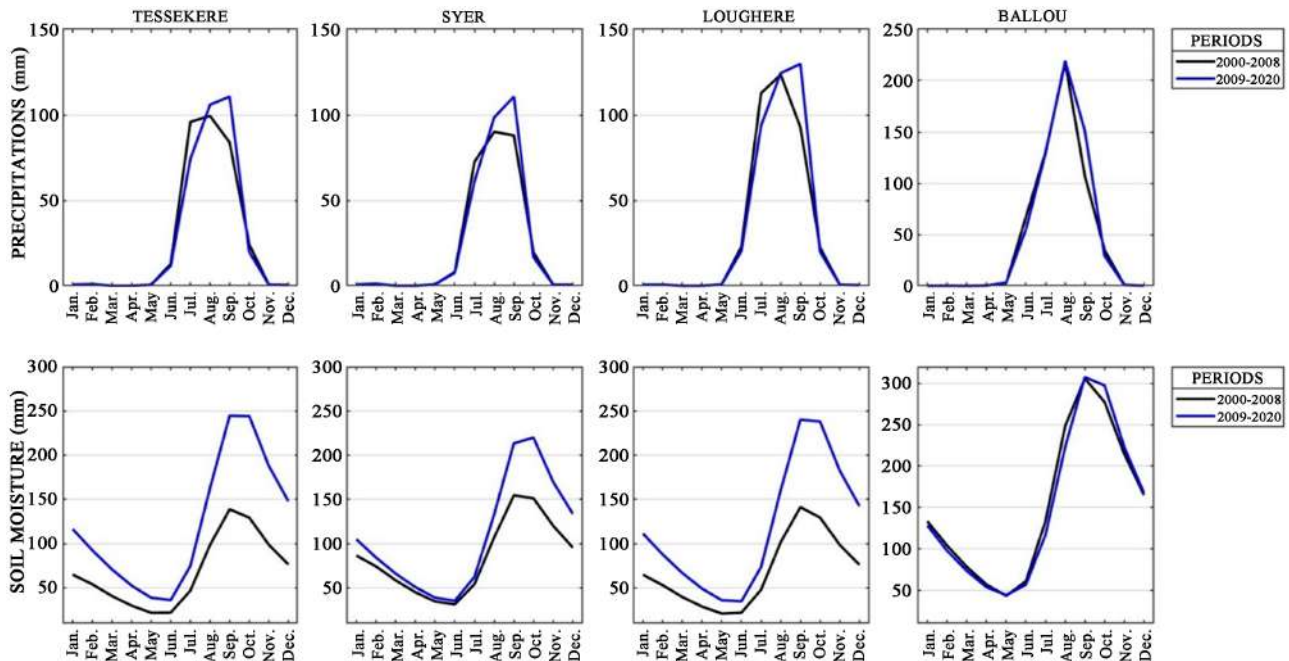


Figure 10. Seasonal cycle of precipitation and soil moisture of Tessekere, Syer (Louga), Loughere-Thioly (Matam), Ballou (Tambacounda) GGW-Senegal for the periods 2000-2008 and 2009-2020.

4) Relationship between vegetation and climatic parameters in the study area.

This part evaluates the temporal variability impacts of the climatic parameters (precipitation and soil moisture) and vegetation indices. So, correlation coefficients are computed to highlight the link between climatic parameters and vege-

tation cover patterns in the study areas (see **Table 14**). This assessment covers two periods: 2000-2008 and 2009-2020. The previous results in this study showed that the vegetation dynamic closely follows the seasonality of rainfall. Some authors have mentioned narrow results eight years after the starting of the reforestation [16]. **Table 14** indicates clearly that the correlation between NDVI and climatic parameters (soil moisture and precipitation) were weak over the period 2000-2008 (except in Loughere-Thioly; $r = 0.76$). In contrast, during the period 2009-2020 (after the reforestation), the correlation coefficient between NDVI and precipitation varies from 0.71 to 0.75.

The results of the comparative analysis of recent dynamics over the wet period 2000-2020 of vegetation cover and climatic conditions, within the reforested sites of the GGW-Senegal, show an increase in vegetation activity, precipitation and soil moisture from 2000-2008 to 2009-2020.

Indeed, this study shows the impact of reforestation (started from 2005 in some localities of the GGW-Senegal), on the increase of the NDVI index from 4% to 8% and from 4% to 10% for the VHI at interannual and seasonal scales. This result corroborates those of [53] which states that the rate of contribution of human activities to the increase in vegetation, in the desert/grassland transition zone over the period 1982-2015, was 97.7% and climatic factors (Temperature and Precipitation) contributed 47.5%. For [9] [10], the regreening of the Sahel is also to be attributed to the local populations who plant and maintain these trees.

Moreover, the reforestation activities carried out would have improved the humidity rate and local rainfall amounts on the different sites studied (2% to 8% of the annual total and 4% to 8% of the JAS rainy season). Thus, the increase in vegetation indices (NDVI and VHI) leads to an increase in evapotranspiration and favors the transport of humidity into the middle layers of the atmosphere [54] [55] [56].

These results are in agreement with the work of [57]-[63] who showed, using regional model simulations, that reforestation in an area impacts rainfall both locally and in distant regions. For [62] this precipitation increase is around 2 to 4 mm/day in the reforested area. In the simulation by [59], replacing the vegetation cover by forest, tall grass, and short grass savanna, the rainfall gain varies between 1.9 to 2 mm/day (Western Sahel [18°W - 10° W and 10°N - 20°N]). And, the simulation by [58] over Senegal shows an increase of 1 to 3 mm/day over northern Senegal.

The results of the correlations between the periods 2000-2008 and 2009-2020, show the improvement of the link between vegetation and precipitation. These results are in line with those of [61] and [53]. The study conducted by [61] showed that during the 1980s, the correlation between NDVI and precipitation was higher than 0.6 in Senegal, Guinea and southern Mali. He subsequently observed a decrease in this value during the 1990s and 2000s. For [53], the correlation coefficient between NDVI and rainfall in the desert/grassland transition zone varied

from -0.55 to 0.83 with a correlation coefficient of 0.24 over the study period 1982-2015. Areas in which NDVI was positively correlated with precipitation represented 86.7% of the total area of the desert/grassland transition zone.

The results of the positive dynamics of soil moisture and vegetation cover confirm the contribution of reforestation to water infiltration on the GGW-Senegal sites. Soil moisture has shown a strong evolution from 22% to 50% of the average for the period 2000-2020. This attests to the capacity of these soils to store more water [64] [65] [66] [67].

Thus, the results of [65] explain that a tree-covered soil favors the infiltration of water into the soil more than other land use. For [64], a forest-covered soil allows almost all the annual rainfall to be infiltrated as opposed to 2% of runoff. In western Burkina, [66] shows a very high capacity for water infiltration under and between trees.

The relationship between NDVI and soil moisture, from 2000-2008 to 2009-2020, showed a remarkable and significant increase in the interannual scale (reforested sites). Reforestation has contributed to water availability in the surface layers and root zone (necessary for plant growth). The study carried out by [68] (in south-west Nigeria) revealed strong relationships between tree volume and the soil moisture indices (correlation coefficients vary between 0.75 and 0.91). This study suggests that tree volume can be predicted based on soil moisture content. And, any negative anomaly in soil moisture content could lead to regression of vegetation.

The decrease in the relationship between NDVI and soil moisture in the locality of Ballou (Tambacounda) from 2000-2008 to 2009-2020 is explained by the lack of reforestation operations in this locality.

In the Ferlo region (Senegal), [69] had shown that the variation in soil moisture was more correlated and significant than precipitation variation on vegetation using the Leaf Area Index (LAI) over the period 2000-2010. In other words, soil moisture appears to be a better indicator to detect anomalies impacting LAI. Thus, for [70], the greenness of vegetation in semi-arid regions is strongly related to soil moisture.

4. Conclusions

This study, which aims to assess the dynamics of vegetation cover within the Great Green Wall of Senegal between 1982 and 2020, analyzed the evolution of vegetation cover using AVHRR-NDVI satellite data (from the NOAA-CDR and NOAA-STAR databases) and also the variability of precipitation (CHIRPS data) over the same period. It reveals a degradation of the cover between the early 1980s and the end of the 1990s. Then, a greening of the different localities is observed with the return of a rainfall higher than 1991-2020 normal.

In fact, the reforestation that began in 2005 and the various reforestation campaigns have made it possible to restore more than 27,000 hectares of degraded land and to put more than 13,000 hectares in the GGW-Senegalese local-

ities studied under protection.

Finally, the comparative analysis of reforestation on climatic parameters was first explored through the temporal analysis of the NDVI vegetation index over the periods 2000-2008 and 2009-2020. And, there is noted an increase in vegetation activity through the NDVI at the interannual (+2% to +8%) and seasonal (+1.5% to 7% for the JAS season and 1% to 4% for the dry season) scale. And a positive and significant evolution is noted in the trace of the GGW-Senegal. Also, the period 2009-2020 records an increase in rainfall of 2% to 8% of the average value 2000-2020 and 4% to 8% of the JAS rainy season. Soil moisture (CPC-NOAA database) is the climatic parameter that has increased the most, with an increase of 25% to 54% of the 2000-2020 average, *i.e.* between 20 mm and 70 mm more.

Moreover, the relationship between the evolution of vegetation activity and climate parameters was compared between the periods 2000-2008 and 2009-2020. It shows a significant improvement in the relationship between NDVI and climate parameters after the different reforestation actions of the GGW.

This study will help the decision-maker community with some of the advances of the Great Green Wall in Senegal and the impact of reforestation on the climate. It will also serve as a reference for the progress of this initiative in other countries in the region. Taking into account the preliminary results presented in this study, it would be desirable to encourage the various countries and partners of the Great African Green Wall initiative to intensify reforestation.

To improve this work, a complementary study of the dynamics of land use within the Great Green Wall initiative sites is underway.

Acknowledgments

The authors would like to thank Fondation Coeur Vert for the availability of *in situ* data and information on the Senegalese GGW. We thank the National Oceanic and Atmospheric Administration Climate Data Record Program and Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations (CHIRPSs) respectively for vegetation cover and precipitation data. Many thanks to the NOAA Climate Prediction Center (CPC) database for the monthly soil moisture data used in this study.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflicts of interest regarding the publication of this paper.

References

- [1] Nicholson, S. (1993) An Overview of African's Rainfall Fluctuation of the Last Decade. *International Journal of Climatology*, **6**, 1463-1466.
- [2] Nicholson, S. (2001) Climatic and Environmental Change in Africa during the Last Two Centuries. *Climate Research*, **17**, 123-144.
- [3] Le Barbé, L., Lebel, T. and Tapsoba, D. (2002) Rainfall Variability in West Africa during

- the Years 1950-1990. *Journal of Climate*, **15**, 187-202.
- [4] Ali, A. and Lebel, T. (2009) The Sahelian Standardized Rainfall Index Revisited. *International Journal of Climatology*, **29**, 1705-1714.
 - [5] Lebel, T. and Ali, A. (2009) Recent Trends in the Central and Western Sahel Rainfall Regime (1990-2007). *Journal of Hydrology*, **375**, 52-64.
 - [6] Sarr, M.A. (2009) Évolution récente du climat et de la végétation au Sénégal: Cas du Bassin versant du Ferlo. Thèse de Doctorat en Géographie et Aménagement, Université Jean Moulin Lyon 3, Lyon, 390 p.
 - [7] Ozer, P., Hountondji, Y.C., Niang, A.J., Karimoune, S., Laminou Manzo, O. and Salmon, M. (2010) Désertification au Sahel: Historique et perspectives. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, **54**, 69-84.
 - [8] Descroix, L., Niang, A.D., Panthou, G., Bodian, A., Sane, Y., Dacosta, H. and Quantin, G. (2015) Évolution récente de la pluviométrie en Afrique de l'ouest à travers deux régions: La Sénégambie et le bassin du Niger moyen. *Climatologie*, **12**, 25-43.
 - [9] Descroix, L. (2018) Processus et enjeux d'eau en Afrique de l'Ouest Sahélo-Soudanienne. Editions des archives contemporaines, France.
 - [10] Descroix, L. and Lambert, L. (2018) Changements climatiques et essor djihadiste au Sahel: Une approche critique pour des solutions adaptées. Regards géopolitiques.
 - [11] Aman, A., Nafogou, M., Bi, H.V.N.G., Kouadio, Y.K. and Kouadio, H.B. (2019) Analysis and Forecasting of the Impact of Climatic Parameters on the Yield of Rain-Fed Rice Cultivation in the Office Riz Mopti in Mali. *Atmospheric and Climate Sciences*, **9**, 479-497.
 - [12] Traore, S.B., Ali, A., Tinni, S.H., Samake, M., Garba, I., Maigari, I., Alhassane, A., Samba, A., Diao, M.B., Atta, S., Dieye, P.O., Nacro, H.B. and Bouafou, K.G.M. (2014) AGRHYMET: A Drought Monitoring and Capacity Building Center in the West Africa. *Weather and Climate Extremes*, **3**, 22-30.
 - [13] Convention des Nations unies de lutte contre la désertification (CNULCD) (1994) Convention des Nations unies de lutte contre la désertification, dans les pays gravement touchés par la sécheresse et/ou la désertification, en particulier l'Afrique. Convention des Nations unies de lutte contre la désertification, dans les pays gravement touchés par la sécheresse et/ou la désertification, en particulier l'Afrique. Texte avec annexes publié par le secrétariat de la Convention, Bonn.
 - [14] Dia, A. and Niang, A.M. (2010) Le Projet Majeur Grande Muraille Verte de l'Afrique: Contexte, historique, approche stratégique, impacts attendus et gouvernance de la Grande Muraille Verte. IRD Éditions.
 - [15] Dia, A. and Duponnois, R. (2012) Le projet majeur africain de la Grande Muraille Verte: Concepts et mise en œuvre. IRD Éditions.
 - [16] Schucknecht, A., Meroni, M. and Rembold, F. (2016) Monitoring Project Impact on Biomass Increase in the Context of the Great Green Wall for the Sahara and Sahel Initiative in Senegal. European Commission Joint Research Centre, Ispra.
 - [17] Diallo, R., IEF, ANGMV (2019) Grande Muraille verte. Ministère de l'Environnement et du Développement Durable du Sénégal.
 - [18] UNCCD (2020) The Great Green Wall Implementation Status and Way Ahead to 2030. Climatekos gGmbH.
https://catalogue.unccd.int/1551_GGW_Report_ENG_Final_040920.pdf
 - [19] Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie (ANSD) (Sénégal) (2021) ANSD/Projections 2021. <http://www.ansd.sn>
 - [20] Gaye, D. (2017) Suivi de la pluviométrie au Nord-Sénégal de 1954 à 2013: Etude de cas des stations synoptiques de Matam, Podor et Saint-Louis. Norois. Environnement,

aménagement, société, **244**, 63-73.

- [21] Star, N. (2018) Global Vegetation Health Products. Center for Satellite Applications and Research, NOAA, USA.
- [22] Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S. and Michaelsen, J. (2015) The Climate Hazards Infrared Precipitation with Stations—A New Environmental Record for Monitoring Extremes. *Scientific Data*, **2**, 1-21.
- [23] Sacré Regis, M.D., Mouhamed, L., Kouakou, K., Adeline, B., Arona, D., Houebag-non Saint, J.C., Koffi Claude, A.K., Talnan Jean, H.C., Salomon, O. and Issiaka, S. (2020) Using the CHIRPS Dataset to Investigate Historical Changes in Precipitation Extremes in West Africa. *Climate*, **8**, Article 84.
- [24] Van den Dool, H., Huang, J. and Fan, Y. (2003) Performance and Analysis of the Constructed Analogue Method Applied to US Soil Moisture over 1981-2001. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **108**, Article No. 8674.
- [25] Dieppois, B., Durand, A., Fournier, M., Sebag, D., Ngatcha, B.N., Massei, N. and Hassane, B. (2011) Variabilité des précipitations au Sahel par analyse du signal: Etude des relations avec l'Océan Atlantique entre 1950 et 2005. In Colloque international: Sciences de l'Eau, du Climat et de l'Environnement pour un développement durable de l'Afrique & Livre des résumés.
- [26] McKee, T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J. (1993) The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, Vol. 17, 179-183.
- [27] Organisation Météorologique Mondiale, OMM, Hayes, M. and Wood, D. (2012) Guide d'utilisation de l'indice de précipitations normalisé. OMM-N° 1090, Genève.
- [28] Pettitt, A.N. (1979) A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, **28**, 126-135.
- [29] Paturel, J.E., Servat, E., Delattre, M.O. and Lubes-Niel, H. (1998) Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. *Hydrological Sciences Journal*, **43**, 937-946.
- [30] Zhao, K., Wulder, M.A., Hu, T., Bright, R., Wu, Q., Qin, H., Li, Y., Toman, E., Mallick B., Zhang, X. and Brown, M. (2019) Detecting Change-Point, Trend, and Seasonality in Satellite Time Series Data to Track Abrupt Changes and Nonlinear Dynamics: A Bayesian Ensemble Algorithm. *Remote Sensing of Environment*, **232**, Article ID: 111181.
- [31] Gibbons, J.D. and Chakraborti, S. (2011) Nonparametric Statistical Inference. 5th Edition, Chapman & Hall, Boca Raton.
- [32] Hollander, M. and Wolfe, D.A. (1999) Nonparametric Statistical Methods. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.
- [33] De Winter, J.F. and Dodou, D. (2010) Five-Point Likert Items: T Test versus Mann-Whitney-Wilcoxon (Addendum Added October 2012). *Practical Assessment, Research, and Evaluation*, **15**, Article 11.
- [34] Shapiro, S.S. and Wilk, M.B. (1965) An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika*, **52**, 591-611.
- [35] Jarque, C.M. and Bera, A.K. (1987) A Test for Normality of Observations and Regression Residuals. *International Statistical Review*, **55**, 163-172.
- [36] Öner, M. and Deveci Kocakoç, İ. (2017) JMASM 49: A Compilation of Some Popular Goodness of Fit Tests for Normal Distribution: Their Algorithms and MATLAB Codes (MATLAB). *Journal of Modern Applied Statistical Methods*, **16**, 547-575.
- [37] Razali, N.M. and Wah, Y.B. (2011) Power Comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmo-

- gorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling Tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, **2**, 21-33.
- [38] Tomšik, R. (2019) Power Comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov and Jarque-Bera Tests. *Scholars Journal of Research in Mathematics and Computer Science*, **3**, 238-243. <https://www.researchgate.net/publication/333133367>
- [39] Bertelsen, M., Heatwole, C., Moore, K. and Badini, O. (2001) Multi-Temporal Classification Land Cover Using Landsat 7 Imagery in Madiama, Mali. *SANREM CRSP Research Scientific Synthesis Conference*, Athens, 28-30 November 2001, Paper No. 200000. https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/65276/192_Bertelsen.pdf?sequence=1
- [40] Teegavarapu, R.S. (2019) Methods for Analysis of Trends and Changes in Hydroclimatological Time-Series. In: *Trends and Changes in Hydroclimatic Variables*, Elsevier, Amsterdam, 1-89.
- [41] Mallakpour, I. and Villarini, G. (2016) Analysis of Changes in the Magnitude, Frequency, and Seasonality of Heavy Precipitation over the Contiguous USA. *Theoretical and Applied Climatology*, **130**, 345-363.
- [42] Marega, O., Emeterio, J.L.S., Fall, A. and Andrieu, J. (2021) Cartographie par télédétection des variations spatio-temporelles de la couverture végétale spontanée face à la variabilité pluviométrique au Sahel: Approche multiscalaire. *Physio-Géo. Géographie Physique et Environnement*, Vol. 16, 1-28.
- [43] Sylla, D., Ba, T. and Guisse, A. (2019) Cartographie des changements de la couverture végétale dans les aires protégées du Ferlo (Nord Sénégal): Cas de la réserve de biosphère. *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, Vol. 13, 115-132.
- [44] Dendoncker, M., Ngom, D. and Vincke, C. (2015) Tree Dynamics (1955-2012) and Their Uses in Senegal's Ferlo Region: Insights from a Historical Vegetation Database, Local Knowledge and Field Inventories. *Bois & Forêts Des Tropiques*, **326**, 25-41.
- [45] Bodian, A. (2011) Approche par modélisation pluie-débit de la connaissance régionale de la ressource en eau: Application au haut bassin du fleuve Sénégal. Thèse de Doctorat, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Dakar, 288 p.
- [46] Bakhoun, A. (2013) Dynamique des ressources fourragères: Indicateur de résilience des parcours communautaires de Tèssékéré au Ferlo (Nord-Sénégal). PhD, Biologie, Productions et Pathologies Animales, Option Ecologie pastorale, FST-UCAD, 115 p.
- [47] Ruster, J. (2009) Evolution du couvert végétal de la région de Tèssékéré, par le biais de la télédétection. Rapport de Stage de Master de Géographi, Université Diderot Paris 7, Paris, 65 p.
- [48] Sylla, D., Ba, T., Sarr, O., Sagna, M.B., Sarr, M.A. and Guisse, A. (2020) Spatio-Temporal Dynamics of the Ecosystems of the Six Forages Sylvopastoral Reserve (Ferlo, North-Senegal). *SCIREA Journal of Geosciences*, **4**, 50-75.
- [49] Sylla, D., Taibou, B.A., Diallo, M.D., Mbaye, T., Diallo, A., Peiry, J.L. and Guisse, A. (2019) Dynamique de l'occupation du sol de la commune de Tèssékéré de 1984 à 2015 (Ferlo Nord, Sénégal). *Journal of Animal & Plant Sciences*, **40**, 6674-6689.
- [50] Brandt, M., Rasmussen, K., Hiernaux, P., Herrmann, S., Tucker, C.J., Tong, X. and Fensholt, R. (2018) Reduction of Tree Cover in West African Woodlands and Promotion in Semi-Arid Farmlands. *Nature Geoscience*, **11**, 328-333.
- [51] Brandt, M., Hiernaux, P., Rasmussen, K., Tucker, C.J., Wigneron, J.-P., Diouf, A.A., Herrmann, S.M., Zhang, W., Kergoat, L., Mbow, C., Abel, C., Auda, Y. and Fensholt, R. (2019) Changes in Rainfall Distribution Promote Woody Foliage Produc-

tion in the Sahel. *Communications Biology*.

- [52] Brandt, M., Tucker, C.J., Kariryaa, A., *et al.* (2020) An Unexpectedly Large Count of Trees in the West African Sahara and the Sahel. ORNL DAAC, Oak Ridge.
- [53] Wu, S., Gao, X., Lei, J., Zhou, N. and Wang, Y. (2020) Spatial and Temporal Changes in the Normalized Difference Vegetation Index and Their Driving Factors in the Desert/Grassland Biome Transition Zone of the Sahel Region of Africa. *Remote Sensing*, **12**, 4119.
- [54] Xue, Y. and Shukla, J. (1996) The Influence of Land Surface Properties on Sahel Climate. Part II: Afforestation. *Journal of Climate*, **9**, 3260-3275.
- [55] Davin, E.L. and de Noblet-Ducoudré (2010) Climatic Impact of Global-Scale Deforestation: Radiative versus Nonradiative Processes. *Journal of Climate*, **23**, 97-112.
- [56] Chen, T., Zhou, S., Liang, C., Hagan, D.F.T., Zeng, N., Wang, J. and Dolman, A.J. (2020) The Greening and Wetting of the Sahel Have Levelled Off since about 1999 in Relation to SST. *Remote Sensing*, **12**, Article 2723.
- [57] Diba, I., Camara, M. and Sarr, A.B. (2016) Impacts of the Sahel-Sahara Interface Reforestation on West African Climate: Intraseasonal Variability and Extreme Precipitation Events. *Advances in Meteorology*, **2016**, Article ID: 3262451.
- [58] Diba, I. and Camara, M. (2017) Analyse De l'Impact Du Changement De La Couverture Végétale Sur La Pluie Et La Température De Surface Au Sénégal. *European Scientific Journal*, **13**, 270-289.
- [59] Diba, I., Camara, M. and Diedhiou, A. (2019) Impacts of the Sahel-Sahara Interface Reforestation on West African Climate: Intra-Annual Variability and Extreme Temperature Events. *Atmospheric and Climate Sciences*, **9**, 35-61.
- [60] Saley, I.A., Sanda, S.I., Bell, J.P., Ly, M., Salack, S., Fode, M. and Diedhiou, A. (2016) Impacts potentiels de la Grande Muraille Verte sur le climat du Sahel et de l'Afrique de l'Ouest. *Annales de l'Université Abdou Moumouni*, **1**, Tome XXI-A.
- [61] Bamba, A., Dieppois, B., Konaré, A., *et al.* (2015) Changes in Vegetation and Rainfall over West Africa during the Last Three Decades (1981-2010). *Atmospheric and Climate Sciences*, **5**, 367-379.
- [62] Bamba, A., Diallo, I., Touré, N.D.E., Kouadio, K., Konaré, A., Dramé, M.S. and Tall, M. (2019) Effect of the African Greenbelt Position on West African Summer Climate: A Regional Climate Modeling Study. *Theoretical and Applied Climatology*, **137**, 309-322.
- [63] Abiodun, B.J., Adeyewa, Z.D., Oguntunde, P.G., Salami, A.T. and Ajayi, V.O. (2012) Modeling the Impacts of Reforestation on Future Climate in West Africa. *Theoretical and Applied Climatology*, **110**, 77-96.
- [64] Roose, E., Lelong, F. and Colombani, J. (1983) Influence du bioclimat et de l'aménagement des sols sur les éléments du bilan Hydrique en Afrique. *Journal des Sciences Hydrologiques*, **28**, 283-309.
- [65] Giordano, A. (1994) L'érosion et la lutte contre l'érosion en forêt méditerranéenne. *Forêt Méditerranéenne*, **15**, 12-21.
- [66] Hansson, L. (2006) Comparisons of Infiltration Capacities in Different Parklands and Farming Systems of Semi-Arid Burkina Faso. MSc Thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, 26 p.
<http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:slu:epsilon-s-7355>
- [67] Jerome, W., Scott, K. and Bret, L. (2022) Soil Moisture Retention on the High Plains of North America via Compost Amendments: A Longitudinal Field Study. *Open Journal of Soil Science*, **12**, 295-322.

- [68] Alo, A.A., Agbor, C.F., Jebiwott, A. and Temiloluwa, O. (2022) Spatial Distribution of Soil Moisture Content and Tree Volume Estimation in International Institute of Tropical Agriculture Forest, Ibadan, Nigeria. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, **10**, 364-384.
- [69] Cissé, S., Eymard, L., Otlé, C., Ndione, J.A., Gaye, A.T. and Pinsard, F. (2016) Rainfall Intra-Seasonal Variability and Vegetation Growth in the Ferlo Basin (Senegal). *Remote Sensing*, **8**, Article 66.
- [70] Nicholson, S.E., Davenport, M.L. and Malo, A.R. (1990) A Comparison of the Vegetation Response to Rainfall in the Sahel and East Africa, Using Normalized Difference Vegetation Index from NOAA AVHRR. *Climatic Change*, **17**, 209-241.

Estimation of the Carbon Sequestration Dynamics of Senegal's Great Green Wall Based on Land Cover over the Past Three Decades

Bi Tra Olivier Gore^{1,2}, Angora Aman^{1*} , Yves K. Kouadio¹, Ody-Marc Duclos³, Kazunao Sato⁴

¹LASMES, UFR SSMT, Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire

²EAMAC, ASECNA, Niamey, Niger

³Fondation Cœur Vert, Abidjan, Côte d'Ivoire

⁴International Council on Environmental Economics and Development (ICEED), New York, NY, USA

Email: *angora.aman@gmail.com

How to cite this paper: Gore, B.T.O., Aman, A., Kouadio, Y.K., Duclos, O.-M. and Sato, K. (2023) Estimation of the Carbon Sequestration Dynamics of Senegal's Great Green Wall Based on Land Cover over the Past Three Decades. *Journal of Environmental Protection*, 14, 954-983.
<https://doi.org/10.4236/jep.2023.1412053>

Received: October 30, 2023

Accepted: December 8, 2023

Published: December 11, 2023

Copyright © 2023 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/>



Open Access

Abstract

The severe drought observed in the Sahel during 1970s, 1980s and 1990s has deeply affected the population as well as the economies and the eco-systems of this climatic area. The GGW Initiative spearheaded by Africa Union in 2007 proposed to combat the land degradation and desertification by planting a wall of trees stretching from Dakar to Djibouti. A reforestation was then conducted in the Senegal's GGW since 2006 as part as other areas in the Sahel. This paper aims to evaluate the carbon sequestration dynamics in the sites of the Senegal's GGW over the last three decades. The method consists firstly of analyzing the evolution of land cover and land use dynamics based on ESA-CCI LC satellite data. There is an improvement of the surface areas of tree and shrub savanna of 11.40% (Tessekere), 8.25% (Syer) and 2.70% (Loughere-Thioly). The greening of the different localities and a positive dynamic observed is explained by the return to normal rainfall and to reforestation actions, agroforestry practices, better management of natural resources undertaken. However, some non-reforested sites showed an opposite trend despite of the normal rainfall. Secondly, the results on land mapping are used as a proxy for the assessment of carbon stocks. The dynamic observed in vegetation cover since the beginning of the reforestation made it possible to sequester 5.8 million tons of carbon representing respectively 2.31% of African GGW. This gain in stored carbon is equivalent to 21.2 million tons of CO₂ captured in the atmosphere. Through this study, it appears that carbon storage becomes significant 8 to 10 years after the start of reforestation. An urbanization without respect for the environmental factors could be a danger for the climate (case of Ballou).

Keywords

Great Green Wall of Senegal, Land Cover-Land Use (LCLU), Carbon Storage

1. Introduction

The Sahel region has experienced some of the most extreme climate events in the 20th century. The drought recorded particularly in the 1970s and 1980s has greatly affected the populations as well as the economies and the ecosystems of this region. The consequence was the displacement of the isohyets by about 200 km over the whole region ([1] [2] [3] [4] [5]). The Sahel became then highly vulnerable to climate change because of the dependence of its population on rain-fed agriculture and transhumance systems. The land degradation due to this drought is characterized by a negative trend in land condition, typically involving the total or partial loss of vegetation cover, soil fertility, productivity and/or biodiversity, leading to a decline in ecosystem services ([6]-[17]).

In the Sahel, among the different initiatives to combat the land degradation and desertification and its impacts on ecosystems is the Great Green Wall Initiative, spearheaded by African Union in 2007 ([18]). This project aims to reverse land degradation and desertification in this emblematic region. The original objective has evolved from a focus on afforestation to an integrated ecosystem management approach that aims to develop a mosaic of different sustainable land use and agricultural productive systems ([19] [20]).

Fifteen years after the beginning of the reforestation in Senegal GGW, many studies were conducted to assess the impacts of these interventions on climatic parameters and vegetation dynamics. According to [17], there is an increase in vegetation activity through the NDVI at the interannual (+2% to +8%) and seasonal (+1.5% to 7% for the wet season and 1% to 4% for the dry season) scale and a positive and significant evolution is noted on the trace of the GGW. Also, the period 2009-2020 recorded an increase in rainfall of 2% to 8% of the average value 2000-2020 and 4% to 8% of the rainy season. The most remarkable result is about the soil moisture which has increased the most between 20 mm and 70 mm during 2000-2009. This change in Land use and, hence, vegetation cover directly impacts surface water, and energy budgets through plant transpiration, surface albedo, emissivity and roughness. They also affect primary production and, therefore, the carbon cycle.

A big issue in this project remains the carbon capture through the regreening of the Sahel region. Many programs have been developed at global scale since 1980s to understand land-atmosphere interactions and their effects on climate. The global monitoring of earth's vegetation cover had been identified as a major task of the International Geosphere-Biosphere program (IGBP), a program which ran from 1987 to 2015. The Global Carbon Project (GCP) was established in 2001 by a shared partnership between the International Geosphere-Biosphere Pro-

gramme (IGBP) the International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change (IHDP), the World Climate Research Programme (WCRP) and Diversitas (<https://www.globalcarbonproject.org/about/index.htm>).

The GGW project aims to restore 100 million hectares of degraded land by 2030, capturing 250 million tons of carbon dioxide.

<https://www.unccd.int/resources/publications/great-green-wall-implementation-status-way-ahead-2030>).

In Senegal, over 18 million trees had been planted. In September 2020, it was reported that the Great Green Wall Senegal had only covered 4% of the planned area, with only 4 million hectares (9.8 million acres) planted [21]. Till now, the balance of the carbon stored derived from the reforestation is not assessed. This study aims to assess the carbon since the beginning of the reforestation and how it is sequestered.

However, the calculation of the stored carbon and the annual sequestration can be difficult to measure directly and requires specialist knowledge. It can be done more simply by using figures that have come from research and are provided in the Carbon MPI look-up tables for forestry and the Emissions Trading Scheme. The look up tables provide a value of tons of carbon dioxide per hectare. In this paper, we suggest to evaluate the carbon stock in the GGW Senegal area from 1992 to 2020. The assessment of carbon in the GGW results of the combination of carbon storage rate associated to a land cover/land-use class and the surface of area of this class. The first step aims at producing land cover and land-use maps. Then, the results on land mapping will be used as a proxy for the assessment of carbon stocks. The specific objectives of this paper are as follow:

- 1) analyzing the Land cover dynamic from 1992 to 2020.
- 2) assessing the carbon stocks due to reforestation.

The structure of this paper could be summarized as follows:

The description of the study area, the data sources (Land cover dataset ESA-CCI LC) and the methods are described in Section 2. The results and discussions are presented in Section 3.

2. Data and Methods

2.1. Study Area

Senegal is a country in West Africa located between 12°8'N-16°41'N and 11°21'W-17°32'W. It has a surface area of 196,722 km² and an estimated population of 17,215,433 in 2021 [22]. This Sudanese-Sahelian country has few rivers and regular rainfall deficits. It also has a rainy season (from June to October) and a dry season.

The rainy season peaks in August-September and varies with latitude. This rainy season corresponds to the monsoon period in the Sahel. Rainfall is lower in the north than in the south. The northern region of Senegal registers an average annual-rainfall of about 400 mm, whereas in the south it reaches 1000 mm. The

Senegalese growing vegetative season extends from July to November. In the north, this season starts generally in August and ends in October [17].

Figure 1 shows the Great African Green Wall (GGW) crossing northern Senegal. It is 15 km wide and about 545 km long. It represents 7% of the total length of the GGW. This line covers a surface of 817500 hectares. It passes through three regions: Louga, Matam and Tambacounda (**Table 1**). For this study, we selected at least one site in each region that has been subjected to various GGW reforestation

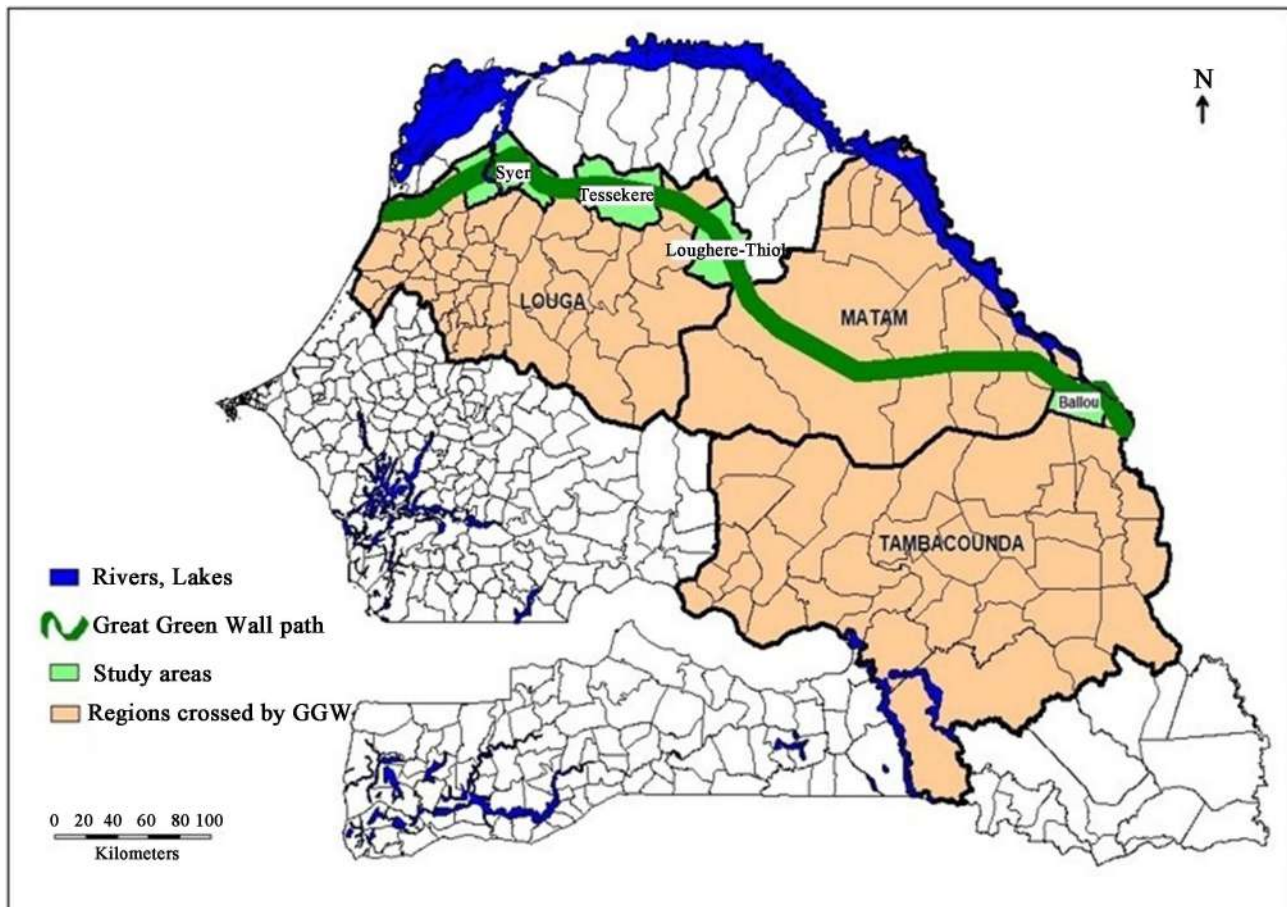


Figure 1. Location of study area and line of the GGW in Senegal (Source: [17]).

Table 1. Climatic characteristics (from [17]) and soil characteristics ([23]) of the sites selected for our study.

Municipalities (Administrative regions)	Precipitations (mm) 2000-2020	Soilmoisture (mm) 2000-2020	Soils types	Main land cover classes	Municipality area (Km ²)
Syer (Louga)	291.85	98.7	Brown Red soils; Ferruginous Tropical soils	TreeSavanna; Steppe/Grassland	2000
Tessékéré (Louga)	323.27	99.4	Ferruginous Tropical soils	TreeSavanna	2100
Loughère-Thioly (Matam)	385.82	97.2	Lithosols soils	Shrub Steppe; Tree Savanna	1800
Ballou (Tambacounda)	576.49	150.2	Hydromorphic soils; sub-arid brown soils	RainfedCrops, Shrub Steppe	1210

surveys since 2006 (See **Tables 1-3** and **Figure 1**).

The main soil types encountered in Senegal are, in order of importance: non-leached and leached tropical ferruginous soils (34.40%), lithosols (21.38%), hydromorphic soils (10.93%), regosols (8.16%), less developed soils (7.74%), red-brown soils (6.15%), ferrallitic soils (5.78%), halomorphics soils (2.90%), vertisols (1.65%), sub-arid brown soils (0.64%) and crude mineral soils (0.27%)

Table 2. Status of GGW implementation in Senegal from 2008 to 2015 (Source: APGMV <https://www.grandemurailleverte.org/>).

Years	Plants products	Area reforested (Ha)	Firebreaks (Km)	Exclosure (Ha)
2008	2,500,000	5000	240	13,000
2009	2,200,000	3000	2100	
2010	2,700,000	3700	2200	
2011	1,650,000	4000	2560	
2012	1,950,000	3900	1200	
2013	2,025,000	5000	1500	13,000
2014	1,380,624	4000	1500	
2015	1,733,800	4700	1500	
Total	16,139,424	33,300	12,800	13,000

Table 3. GGW reforestation campaign and results in Senegal by the Green Heart Foundation from 2006 to 2019 (Source: Green Heart Foundation, <https://fondationcoeurvert.org>).

Years	Sites	Plants products	Area reforested (Ha)
2006	WidouThiengoly (Tessekere)	31,540	250
2007	Loumbol Samba Abdoul (Ouadalaye)	25,000	252
2008	Tessekere	75,000	594
2009	LoughereThioly	192,500	1200
2010	Syer	162,500	1040
2011	Mbar Toubab (Syer)	110,000	443
2012	Mbar Toubab (Syer)	40,000	250
2013	Mbar Toubab (Syer)	110,000	443
2014	BellyGawdy Cherif (Syer)	27,975	225
2015	Bélél Aya (Syer)	50,000	250
2016	Tagar (LoughereThioly)	36,000	180
2017	Mbanar	57,000	220
2018	Kalom	76,250	305
2019	N'Gadou Thiel	88,000	176
Total		1,081,765	5828

[23]. On the other hand, the main soil types crossed by GGW Senegalese, from west to east, are dry sandy soils, ferruginous soils, red-brown soils, lithosols and sub-arid brown soils.

2.2. Data Sources

The land cover dataset is from the European Space Agency Climate Change Initiative Land Cover (ESA-CCI LC) and Copernicus Climate Change. This dataset provides global maps describing the land surface into 22 classes, which were defined using the United Nations (UN) Food and Agriculture Organization (FAO) Land Cover Classification System ([24] [25] [26] [27]). This database has a spatial resolution of 300 meters and available from 1992 to the present, with one year delay (1992-2020). The ESA-CCI LC is a combined product of global surface reflectance from different satellites missions (ENVISAT, MERIS, SPOT 4, SPOT 5, Proba-V, NOAA-15 (AVHRR)). They are available on

<http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download.php> and

<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/satellite-land-cover/>.

Details of the in-depth validation of the land use maps are available in the product quality assessment report

(https://datastore.copernicus-climate.eu/documents/satellite-land-cover/D5.2.3_POAR_ICDR_LC_v2.1.x_PRODUCTS_v1.1.pdf; [28]).

Thanks to long-term data consistency, annual updates and a high level of thematic detail based on global observational data, the ESA-CCI LC map series served as an input for various applications such as the impact of land cover change (LCC) on climate ([29]), long-term historical reconstructions for LC climate modeling and biodiversity accounting ([30] [31] [32] [33]), as well as forest [34] [35] [36]) and desertification monitoring in scientific research ([37] [38]), carbon and climate change models ([36] [39]), policy-making and in the business sector ([40] [41] [42] [43]).

As part of the 2018 reporting to the UNCCD (United Nations Convention to Combat Desertification) and assessment of these indicators (Land Cover Trends; Land Productivity Trends; Organic Carbon Stock Trends), LC ESA-CCI land cover data has been advised and provided to member countries as default level 1 data ([40]).

2.3. Methodology

2.3.1. Cartography and Dynamics of Land Cover

Land cover dynamics is defined as the spatiotemporal evolution of land cover classes, either towards a stage of degradation, or improvement, or towards a more or less stable state of equilibrium ([44] [45]). These dynamics enable us to synthesize the changes in land use classes that have occurred in the same landscape over different periods ([46]).

In this study, the method of comparing differences in land cover class between (diachronic analysis) different periods (1992 to 2020 or 2000 to 2020) is carried out to analyze the dynamics of land cover change. The first step is to map the

vegetation cover based on land cover data (Land Cover ESA-CCI LC) for a given locality over a given period. Then, using image histogram analysis, the area of each class will be calculated. Image histograms visually synthesize the distribution of a continuous numerical variable by measuring the frequency with which certain values appear in the image.

For each map produced, the statistics for the different land-use classes are presented in relative surface area. This is the ratio of the area occupied by a given land-use class to the total area of the locality. The dynamics of land use are the result of the difference between periods (map 2020 and map 1992, for example).

Finally, rates of change (Tc) in land cover and average annual evolution (Te) between two dates were calculated for each land cover class.

$$Tc(\%) = \left(\frac{A2 - A1}{A1} \right) * 100 \quad (1)$$

$A1$ and $A2$ are the initial and final area of the land cover class, respectively.

The average annual rate of evolution for each land cover class was calculated using the formula below:

$$Te(\%) = \left(\frac{100}{t2 - t1} \right) * \ln \frac{A2}{A1} \quad (2)$$

Te : annual evolution rate for class “i”; $A1$: area of class “i” at time $t1$; $A2$: area of class “i” at time $t2$.

2.3.2. Estimation of Carbon Stocks in the Vegetation Cover of the GGW in Senegal

Organic carbon, a major determinant of soil properties and an essential component of carbon and greenhouse gas cycles, is highly sensitive to land use and management: forest, savanna, crop, grassland ([21] [47] [48]). Thus, the estimation and variation of carbon stocks, within the sites of the Great Green Wall of Senegal, uses as proxies land cover (vegetation mapping, [39] [40] [48] [49] [50] [51]), average carbon stock values from bibliographic data from the region ([52]-[57]) and equation (3) below (Table 4).

$$Carbon\ sequestration_{LCi} = Area_{LCi} * Stock_{LCi} \quad (3)$$

where:

- $Carbon\ sequestration_{LCi}$: is the carbon sequestration associated with land cover class “i” in ton Carbon (t.C);
- $Area_{LCi}$: is the surface area of class “i” expressed in hectares (ha);
- $Stock_{LCi}$: is the carbon storage rate of class “i”, expressed in t.C/ha.

These studies provide average carbon stock values per unit area. These carbon storage estimates are based on allometric methods ([56] [58] [59] [60] [61]) and infrared spectrometric analysis of soil samples taken from a site ([52] [62] [63] [64]). Allometric equations make it possible to estimate the amount of carbon stored in an area, from its total biomass using measurable information such as Tree Height, Trunk Diameter, Trunk Circumference, Wood Density. And to measure the carbon stock in a soil sample over a given depth, you need to know

Table 4. Average soil carbon stock values from bibliographic data for the region (Senegal).

Land cover types	Carbon stocks (t C./ha)	Sources
TreeSavanna	32.42 ± 5.4 t.C/ha	[54]
ShrubSavanna	19.44 ± 2.7 t.C/ha	
Shrub steppe	8.29 ± 1.0 t.C/ha	
Open forest/Woodland	40.45 ± 5.0 t.C/ha	[52]
Shrub steppe and Grassland (Northern sandy pastoral region)	14.73 t.C/ha	
Shrubby savannas, often relatively dense (Ferruginous pastoral region)	15.23 t.C/ha	
Tree savannas and wooded savannas (Oriental transition region)	29.37 t.C/ha	[68]
Herbaceous steppes (Ferlo)	2.0 t.C/ha	
Annualcrops (groundnuts + millet)	8.9 t.C/ha	
Tree plantation (Balanites aegyptiaca, Acacia raddiana)	1.73 tC/ha	[55] [56]
Shrubs, grasslands and sparsely vegetated areas	19.18 ± 2.3 tC/ha	
Cropland	17.18 ± 2.2 tC/ha	
Wetlands	59.14 ± 5.0 tC/ha	[53]

the soil's carbon content (in g C·kg⁻¹ soil), its density and the proportion of gravel (>2 mm) in it (in kg·dm⁻³).

Then, to better appreciate soil carbon stock dynamics, we calculated average stocks and standardized carbon stock anomalies over the period 2000-2020. The Buishand (Buishand's U statistic, [65]) and Bayesian BEAST (Bayesian Estimator of Abrupt Change, Seasonal Change and Trend, [66]) statistical tests were used to detect breaks in carbon sequestration time series over the period 2000-2020. The Buishand's test detects a single break, and this break is highly significant when the probability associated with the test is less than 1% (P-value < 1%, [67]). The BEAST test, on the other hand, detects several breaks in the trends, with the probabilities and slopes associated with their occurrence.

The annual estimate of carbon sequestration gain or loss after reforestation is given by the following Equation (4):

$$CSG_{site} = \sum_t^{2020} (CSeqAftRef_t - mean CseqBefRef) \quad (4)$$

where:

- CSG_{site} is the estimating the carbon sequestration gain per site (in t.C);
- $CSeqAftRef_t$ is the annual carbon sequestration after reforestation (in t.C);
- $mean CseqBefRef$ is the average carbon sequestration before reforestation (in t.C).

2.3.3. Calculating the Uncertainties Associated with Results

For the various carbon sequestration results, we have computed the uncertain-

ties in accordance with IPCC guidelines [48]. To carry out these calculations, it is normally necessary to know the uncertainty weights for all the parameters involved in determining soil organic carbon stocks (the different land cover classes). The known information that needs to be combined for the calculations are therefore the uncertainties of the land cover classes and the average stocks associated with each land cover class, where available. The IPCC method for combining uncertainties quantities by multiplication uses Equation (5), and for addition or subtraction Equation (6).

$$I_{\text{totale}} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2} \quad (5)$$

- I_{totale} : Uncertainty in the product of carbon stock quantities;
- I_i : Uncertainties associated with each carbon stock.

$$I_{\text{totale}} = \frac{\sqrt{(x_1 * I_1)^2 + (x_2 * I_2)^2 + \dots + (x_n * I_n)^2}}{|x_1 + x_2 + \dots + x_n|} \quad (6)$$

- I_{totale} : Uncertainty in the sum of carbon stock quantities;
- x_i et I_i : Uncertain carbon stock quantities and the uncertainties associated with them, respectively.

3. Results and Discussions

This section is devoted to land use through land cover (LC) data over the period 1992-2020. Afterwards, an analysis of the estimate and the variability of the carbon stock from 1992 to 2020 is presented.

3.1. Analysis of the Land Cover Dynamic in the Senegalese Great Green Wall from 1992 to 2020

The land use database derived from LC ESA-CCI allowed the establishment of the land cover maps of Syer, Tessekere, Loughere-Thioly and Ballou from 1992 to 2020.

1) Syer (Louga)

The analysis of land use between 1992 and 2020 shows 14 land cover classes in Syer area (**Figure 2**; **Table 5** and **Table 6**). **Figure 2**, **Figure 3** and **Table 5** illustrate the extend of changes in land use during this period. There is an increase in the area of tree and shrub savannas (+8.5%), rainfed crops (0.95%), irrigated crops (+0.68%), mosaic crops (1.55%), tree cover flooded saline (+0.38%). **Table 5** shows that there is a decrease in area of steppe/grassland (−9.8%),

2) Tessekere (Louga)

Figure 4 represents the spatiotemporal distribution of the nine land cover classes over Tessekere site from 1992 to 2020. The main land cover classes are tree savanna and steppe. The rates of evolution and change in area are recorded in **Table 6**.

There is a decline area for steppe/grassland, rainfed crops, mosaic agriculture, natural mosaic vegetation, shrub steppe and bare soils during 1992-2020 varying from 38.7% to 95.74% (**Table 6**). On the other hand, there is a spatial extension

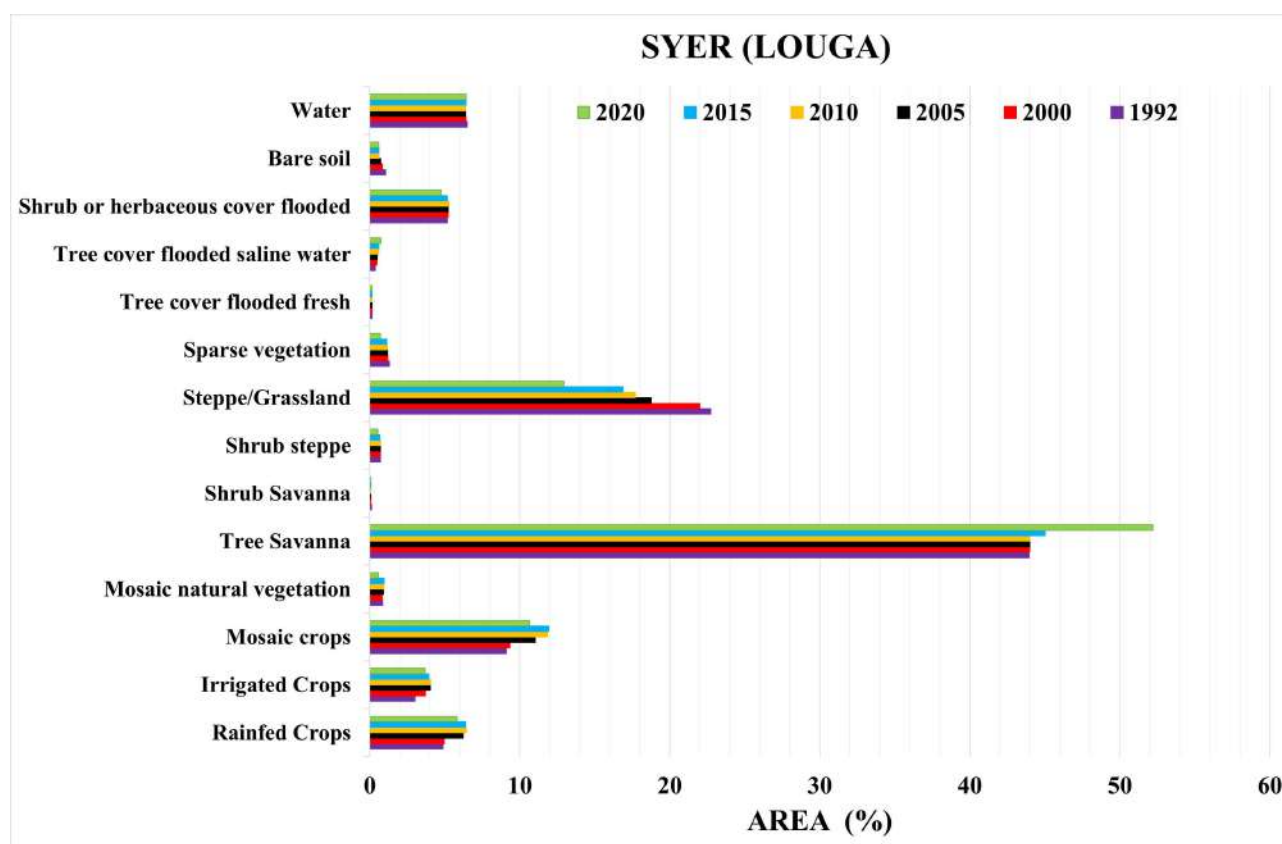


Figure 2. Evolution of land cover classes in Syer (Louga) from 1992 to 2020.

Table 5. Statistics of land cover classes in Syer (Louga) from 1992 to 2020.

Syer (Area 2000 Km ²) Land Cover Classes	Area (%)						Difference 2020-1992 (%)	Difference 2020-2000 (%)
	1992	2000	2008	2010	2015	2020		
Rainfed Crops	4.88	4.96	6.21	6.44	6.37	5.83	0.95	0.86
Irrigated Crops	3.02	3.72	4.05	4.06	3.93	3.7	0.68	-0.01
Mosaic crops	9.1	9.34	11.10	11.85	11.95	10.65	1.55	1.31
Mosaic natural vegetation	0.86	0.83	0.93	0.95	0.97	0.58	-0.28	-0.25
Tree Savanna	43.97	44	44.00	44	45.02	52.22	8.25	8.22
Shrub Savanna	0.12	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	-0.04	0
Shrub steppe	0.72	0.72	0.72	0.72	0.68	0.54	-0.17	-0.17
Steppe/Grassland	22.73	22.01	18.75	17.71	16.89	12.93	-9.8	-9.08
Sparse vegetation	1.32	1.21	1.18	1.16	1.13	0.72	-0.6	-0.48
Tree cover flooded fresh	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0	0
Tree cover flooded saline water	0.38	0.48	0.61	0.6	0.62	0.76	0.38	0.27
Shrub or herbaceous cover flooded	5.18	5.23	5.26	5.26	5.18	4.78	-0.4	-0.44
Bare soil	1.06	0.85	0.73	0.62	0.61	0.6	-0.46	-0.26
Water	6.5	6.41	6.24	6.38	6.42	6.44	-0.06	0.03

Table 6. Rates of evolution and change in area at Syer, Tessekere (Louga), Loughere-Thioly (Matam), Ballou (Tambacounda).

Land Cover Classes	SYER 1992-2020		TESSEKERE 1992-2020		LOUGHERE 1992-2020		BALLOU 1992-2020	
	Rate of Evolution (Te) (%)	Rate of Change (Tc) (%)	Rate of Evolution (Te) (%)	Rate of Change (Tc) (%)	Rate of Evolution (Te) (%)	Rate of Change (Tc) (%)	Rate of Evolution (Te) (%)	Rate of Change (Tc) (%)
Rainfed Crops	0.63	19.37	−1.75	−38.76	−0.28	−7.49	0	0
Irrigated Crops	0.72	22.49					−0.02	−0.68
Mosaic crops	0.56	17.07	−1.23	−29.17	0.96	30.73	0	0
Mosaic natural vegetation	−1.41	−32.58	−1.18	−28.06	0.65	19.84	0	0
Tree Savanna	0.61	18.77	0.48	14.53	0.1	2.71		
Shrub Savanna	−1.59	−36	0	0			1.21	40.5
Shrub steppe	−0.99	−24.16	−0.94	−23.08	−0.01	−0.29	0	0
Steppe/Grassland	−2.01	−43.11	−2.45	−49.62	−1.39	−32.32	0	0
Sparse vegetation	−2.15	−45.26	0	0	0.19	5.56		
Tree cover flooded fresh	0	0						
Tree cover flooded saline water	2.5	101.28						
Shrub or herbaceous cover flooded	−0.29	−7.72					0	0
Bare soil	−2.03	−43.38	−11.28	−95.74				
Water	−0.03	−0.89					0	0
Woodland/ Open forest							−0.57	−14.73
Urban area							2.9	125

of savanna tree and savanna shrub of respectively 78.43% to 89.82% from 1992 to 2020.

3) Loughere-Thioly (Matam)

Seven land cover classes were identified in Loughere-Thioly according to the 1992 land cover map (Figure 5 and Table 6). The spatial extension of these classes from 1992 to 2020 shows that there is an increase of the area corresponding to mosaic agriculture of 1.85%, natural mosaic vegetation (+1.91%), tree savanna (0.76%). The rate of steppe/grassland area declines from 13.30% to 9.0%. The other classes remained stable.

4) Ballou (Tambacounda)

The Ballou land cover data processing provided 11 classes (Figure 6). The main land use classes are rainfed crops (47.33%) and shrub steppe (33.66%). There is a reduction in the surface area of woodland/open forest of 14.73% (Table 6). In the other hand we can observe an increase in the surface area associated to urban and shrub savanna classes of respectively 125% and 40.5%. The other classes areas remained stable from 1992 to 2020. So, we can notice a great

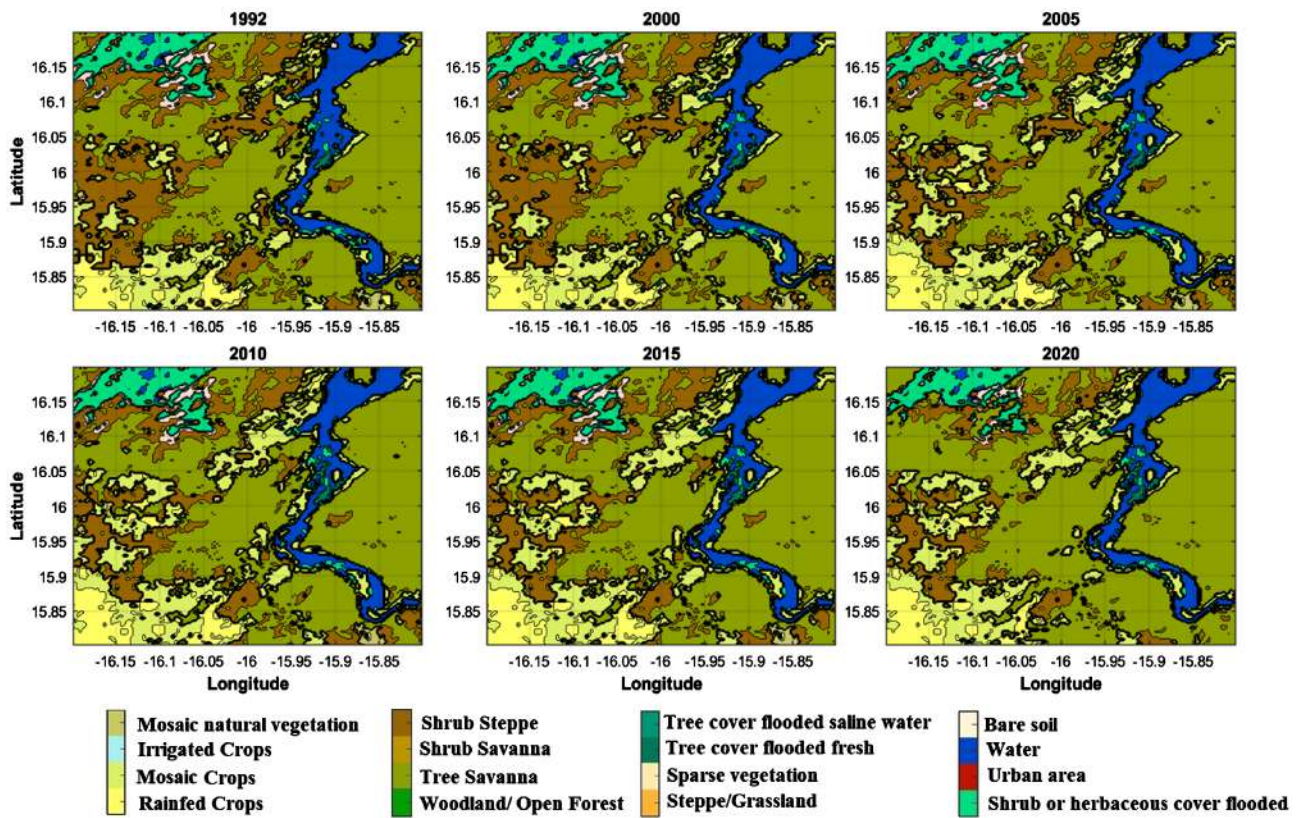


Figure 3. Evolution of land cover map from 1992 to 2020 in Syer (Louga).

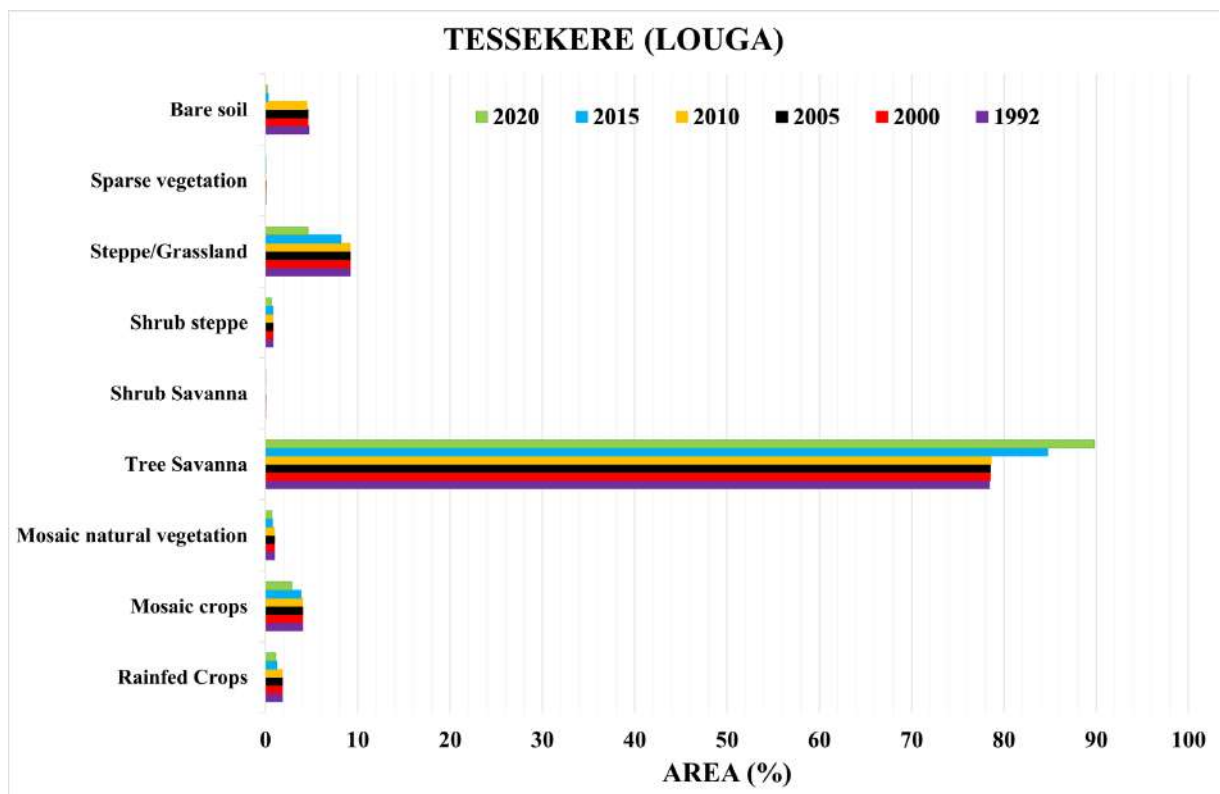


Figure 4. Evolution of land cover classes in Tessekere (Louga) from 1992 to 2020.

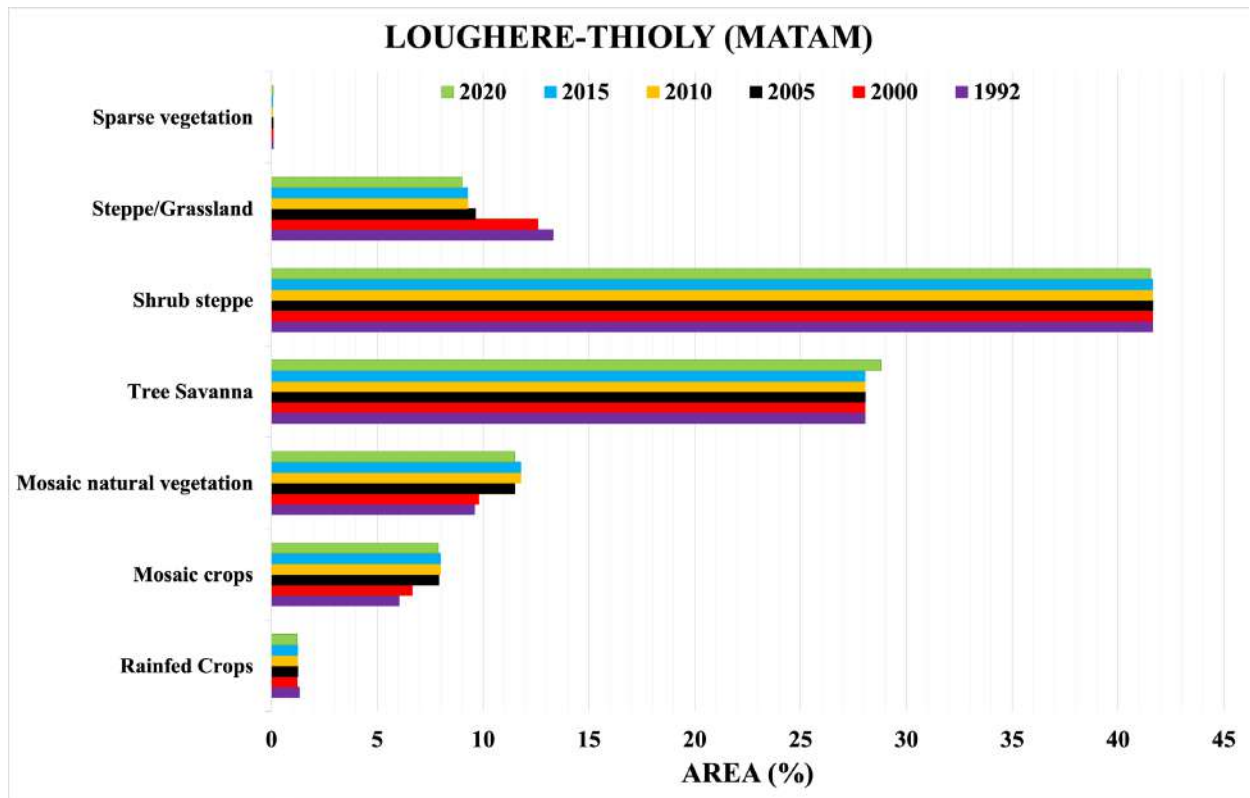


Figure 5. Evolution of land cover classes in Loughere-Thioly (Matam) from 1992 to 2020.

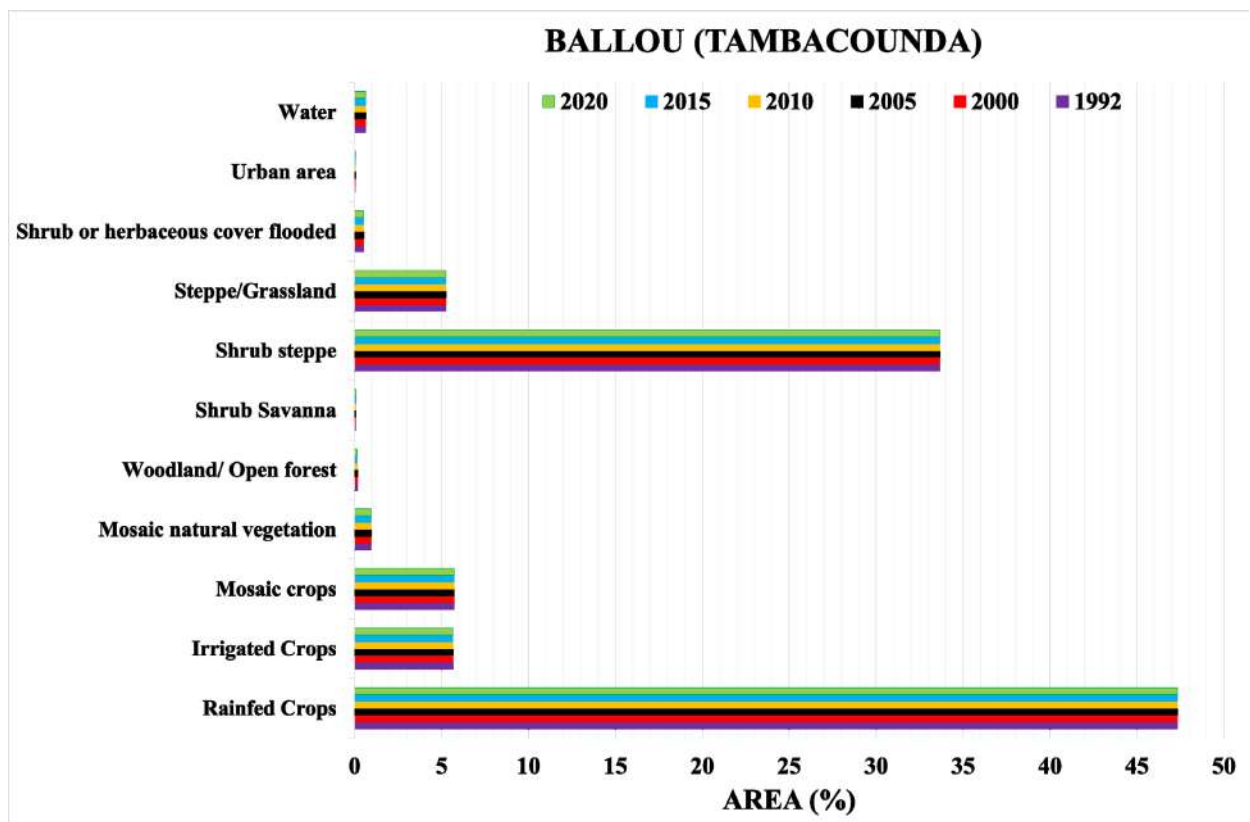


Figure 6. Evolution of land cover classes in Ballou (Tambacounda) from 1992 to 2020.

spatial extension and development of urban areas in Ballou.

The temporal evolution of the land-use maps from 1992-2000 show globally a degradation of the vegetation cover. There is a reduction in the surface area of tree savanna, rainfed and mosaic crops, woodland/open forest and water classes. This situation results from the drought recorded particularly in the 1970s, 1980s and 1990s in the Sahel region ([4] [5] [17] [69] [70] [71] [72] [73]). The overexploitation of land combined with irregular rainfall have caused the reduction of agricultural, tree savanna and forest areas during dryness episodes. The rainfall deficit on the study areas recorded varies from 11% to 20% and the loss of vegetative activities through the vegetation index is between 4% and 8.5% [17]. These results are in agreement with the works of ([6] [9] [11] [15] [74]) in the Ferlo region (north of Senegal).

A study based on 40 years satellite data carried out by the CILSS (Comité Inter-états de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel "CILSS" [9]) during 1975 and 2013 has shown that 26% of the land in Senegal are overexploited, included the agricultural areas causing savanna and open forest fragmentation. According to [15], the spontaneous vegetation has been highly degraded (−13.4%) during 1974-2013 in the Ferlo region (Tessekere). [12] and [75] have shown that the losses in surface of protected areas are low for the steppe and high for the wooded and tree savanna. The land cover degradation results from the human activities and the lack of precipitations ([5] [70] [71] [72] [76]).

A greening of the different localities and a positive dynamic are observed with the return of a rainfall values higher than the those recorded in 1992-2000. Gains in surface of tree savanna and cultivation areas instead of bare soils are observed. There is an improvement of the surface areas of tree and shrub savanna of 11.40% (Tessekere), 8.25% (Syer) and 2.70% (Loughere-Thioly). In spite of the gradual improvement of the rainfall in Ballou after the year 2000, the vegetation cover was continuously in degradation. 37 km² of deciduous forest areas was lost after the year 2000s in benefit to shrub savanna and urbanization area.

With regard to the non-uniform distribution of vegetation cover in the Sahel, particularly in our study area, the return of rainfall could not be the only factor in the vegetation greening ([77]).

Agroforestry practices, reforestation, good management of natural resources should be taken into account in the success of the positive vegetation dynamic ([6] [9] [12] [18] [72] [74] [77] [78] [79]). According to [11] [12], the conversion with improvement of vegetation cover has affected 4000 ha in the Tessekere area. The regressing of bare soil surface areas was also due to the implementation of the Senegalese-German GTZ project since 1986. The progressing of cultivation areas was favored by the planting of trees in the Ferlo region since 2007 (Senegalese Great Green Wall). With the collaboration of the local population, the GGW project has managed to plant 13,000 ha (case of Koyli Alpha Park), 52 plots of forest plantations and agroforestry (18,599 ha), about ten multi-purpose village gardens at Syer, Tessekere, Labgar, Loughere-Thioly and Sakal ([80]) and more than 27000 ha of land restored ([81]).

3.2. Analysis of the Evolution of Carbon Storage in the Senegalese Great Green Wall from 1992 to 2020

1) Analysis of estimated carbon storage on Senegalese GMV sites

The results of the evolution of land use carried out in the first part of this work were used as tools for quantifying and evaluating the dynamics of carbon stocks on our different study sites.

The method uses the different types of land cover and land use over each site and their average carbon stock values. In this way, we are able to estimate the total quantity of carbon and the average stock of plant cover from 1992 to 2020 (Figure 7), and carry out a comparative analysis of the evolution of carbon between these periods.

Figure 7 corresponds to the estimate of average carbon stocks in the different study sites. The carbon values per hectare show two dynamics. Indeed, carbon sequestration increases in the soils of Syer, Tessekere, Loughere-Thioly from 1992 to 2020. On the other hand, Ballou recorded a drop in carbon stock over the same period. Note that the average carbon stock values recorded in our study

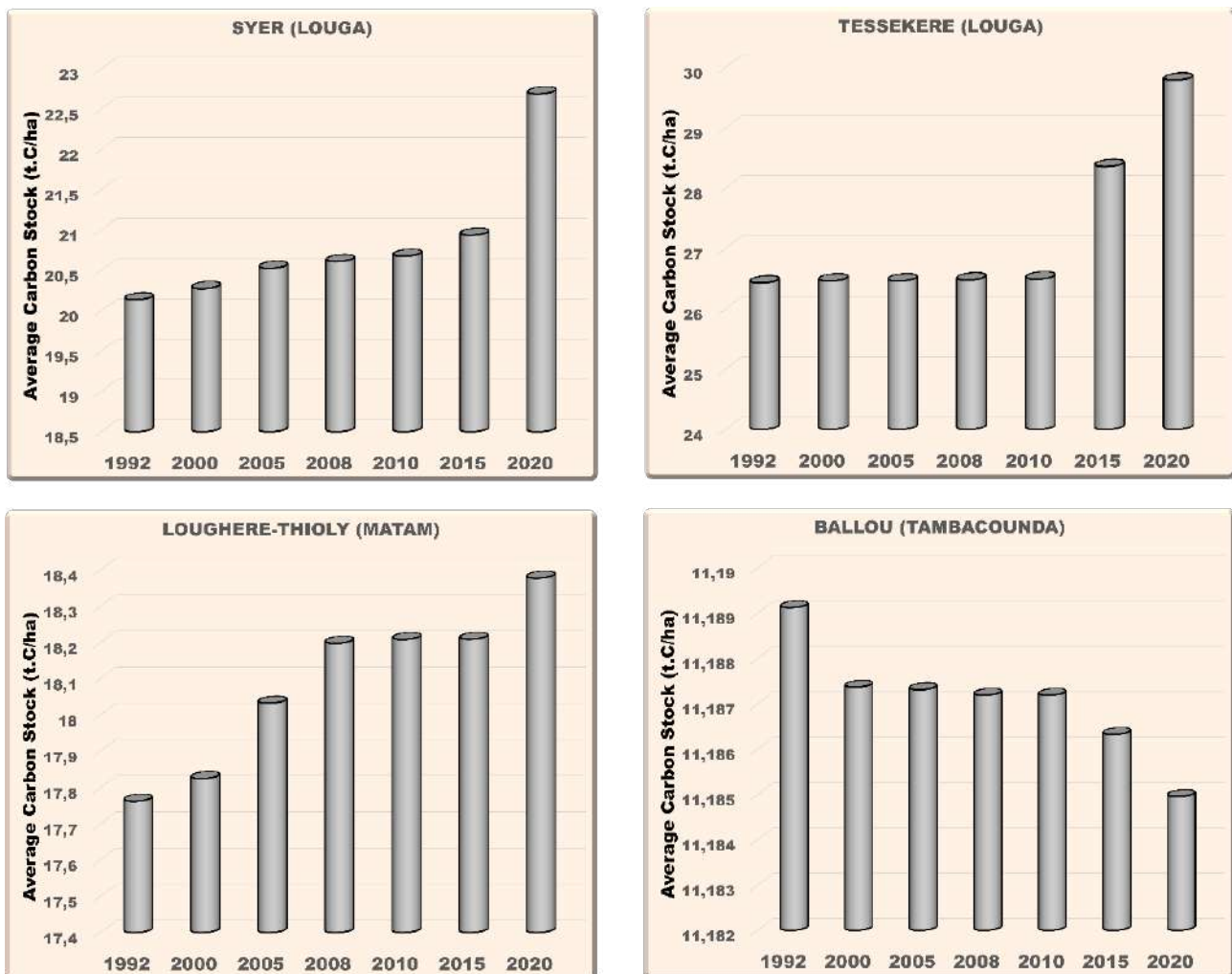


Figure 7. Evolution of average carbon stocks in Syer, Tessekere, Loughere-Thioly and Ballou soils from 1992 to 2020.

sites vary between 11.18 ± 0.001 t.C/ha and 27.33 ± 1.34 t.C/ha. With the highest value observed in the locality of Tessekere (29.80 t.C/ha in 2020) and the lowest in Ballou (11.185 t.C/ha in 2020). For the different localities, the average annual values of organic carbon stocks from 1992 to 2020 range from $4,177,726 \pm 12,539$ t.C (Syer); $5,740,287 \pm 23,306$ t.C (Tessekere); $3,257,418 \pm 7087$ t.C (Loughere-Thioly) and $1,353,630 \pm 2779$ t.C (Ballou). The relative uncertainties of the study sites are in the range 0.2% to 0.4% of the different annual storages.

The results obtained on the quantities of average carbon stocks sequestered in the GGW zones of Senegal present large differences from one site to another in terms of carbon storage potential. This disparity is linked both to climatic conditions ([56] [82] [83]) but it is reinforced by the areas of trees in the different plant covers. Tree savannas, for example, represent on average 81.4% in Tessekere, 45% in Syer and 28% in Loughere-Thioly of the land use of these localities.

These averages of carbon storage are of the same order of magnitude as those reported by [52] [61] [84] [85] [86] [87].

In 1992, the quantities of sequestered carbon were estimated at $4,027,459 \pm 12,360$ t.C (Syer), $5,550,062 \pm 22,785$ t.C (Tessekere), $3,197,238 \pm 7173$ t.C (Loughere-Thioly) and $1,353,884 \pm 2778$ t.C (Ballou). The main land use classes in these localities' contribution vary from 35% to 96% of carbon storage. Tree savanna allows to sequester $2,850,821 \pm 17,305$ t.C (Syer); $5,339,604 \pm 23683$ t.C (Tessekere) and $1,636,259 \pm 13,110$ t.C (Loughere-Thioly) (Table 7).

In 2010, the annual carbon sequestration increased from 0.3% to 2.7% compared to that of 1992 on the Syer, Tessekere and Loughere-Thioly sites. On the other hand, sequestration is down by -0.02% in Ballou site (Table 8) due to the high urbanization.

In 2020, the total carbon storage in the soils of Syer, Tessekere and Loughere-Thioly is estimated between 3.5% and 12.7% compared to 1992. Compared to 2010, carbon sequestration increased from 1% to 12.4% (9.74% in Syer; 12.44% in Tessekere and 0.93% in Loughere-Thioly). In Ballou soils, the storage loss is -0.04% and -0.02% compared respectively to 1992 and 2010.

Table 7. Total quantities of carbon sequestered by the main land cover-land uses (LCLU) in the soils of Syer, Tessekere, Loughere-Thioly and Ballou from 1992 to 2020.

Sites	Main land cover classes	1992 (t.C/year)	2000 (t.C/year)	2010 (t.C/year)	2020 (t.C/year)
Syer (Louga)	TreeSavanna	$2,850,821 \pm 17,305$	$2,852,697 \pm 17,310$	$2,852,697 \pm 17,310$	$3,385,839 \pm 18,859$
	Steppe/Grassland	$90,934 \pm 768$	$88,040 \pm 755$	$70,853 \pm 678$	$51,736 \pm 579$
Tessékéré (Louga)	TreeSavanna	$5,339,604 \pm 23,683$	$5,346,412 \pm 23,698$	$5,353,220 \pm 23,713$	$6,115,422 \pm 25,345$
Loughéré-Thioly (Matam)	Shrub Steppe	$1,104,182 \pm 7259$	$1,104,182 \pm 7259$	$1,104,182 \pm 7259$	$1,100,999 \pm 7249$
	Tree Savanna	$1,636,259 \pm 13,110$	$1,636,259 \pm 13,110$	$1,636,259 \pm 13,110$	$1,680,537 \pm 13,286$
Ballou (Tambacounda)	RainfedCrops	$509,699 \pm 3834$	$509,699 \pm 3834$	$509,699 \pm 3834$	$509,699 \pm 3834$
	Shrub Steppe	$599,886 \pm 5351$	$599,886 \pm 5351$	$599,886 \pm 5351$	$599,886 \pm 5351$

The improvement in the areas of land use classes of tree savannas, shrub savannas and crop areas to the detriment of bare soils, steppes and grassland generated a gain of $510,756 \pm 26,490$ t.C. in Syer, $705,834 \pm 47,560$ t.C in Tessekere and $110,784 \pm 14,357$ t.C. in Loughere-Thioly between 1992 and 2020. The spatial extension of the urban zone and shrub savanna classes at the expense of woodland/open deciduous forest, generated a loss in carbon stock in Ballou site of -505 ± 5557 t.C.

2) Analysis of carbon storage dynamics from 2000-2020

Figure 8 which represents the evolution of standardized carbon sequestration anomalies in the soil from 2000 to 2020 exhibits two dynamics.

The localities of Syer, Tessekere and Loughere-Thioly present a period with a negative anomaly followed by a second phase of positive anomaly. The positive periods began in 2007, 2013 and 2014 respectively for Loughere-Thioly, Tessekere and Syer. The positive sequestration anomalies became significant (greater than 1) in 2017 (Tessekere), 2018 (Syer) and 2019 (Loughere-Thioly). On the other hand, the dynamic in the locality of Ballou is reversed. This evolution of carbon storage is decreasing. Indeed, a negative anomaly is observed since 2010 in this site. The significance of soil carbon storage in reforested sites occurs 8 to 10 years after the start of the various tree plantations of the Senegalese GGW.

Table 8. Total quantities of carbon sequestered in Syer, Tessekere, Loughere-Thioly and Ballou soils from 1992 to 2020.

Sites	1992 (t.C/year)	2000 (t.C/year)	2010 (t.C/year)	2020 (t.C/year)
Syer (Louga)	$4,027,459 \pm 12,360$	$4,055,389 \pm 12,289$	$4,135,511 \pm 12,053$	$4,538,215 \pm 14,130$
Tessékéré (Louga)	$5,550,062 \pm 22,785$	$5,556,871 \pm 22,800$	$5,563,679 \pm 22,816$	$6,255,896 \pm 24,776$
Loughéré-Thioly (Matam)	$3,197,238 \pm 7173$	$3,208,478 \pm 7148$	$3,277,503 \pm 7005$	$3,308,022 \pm 7184$
Ballou (Tambacounda)	$1,353,884 \pm 2779$	$1,353,671 \pm 2778$	$1,353,650 \pm 2778$	$1,353,379 \pm 2779$

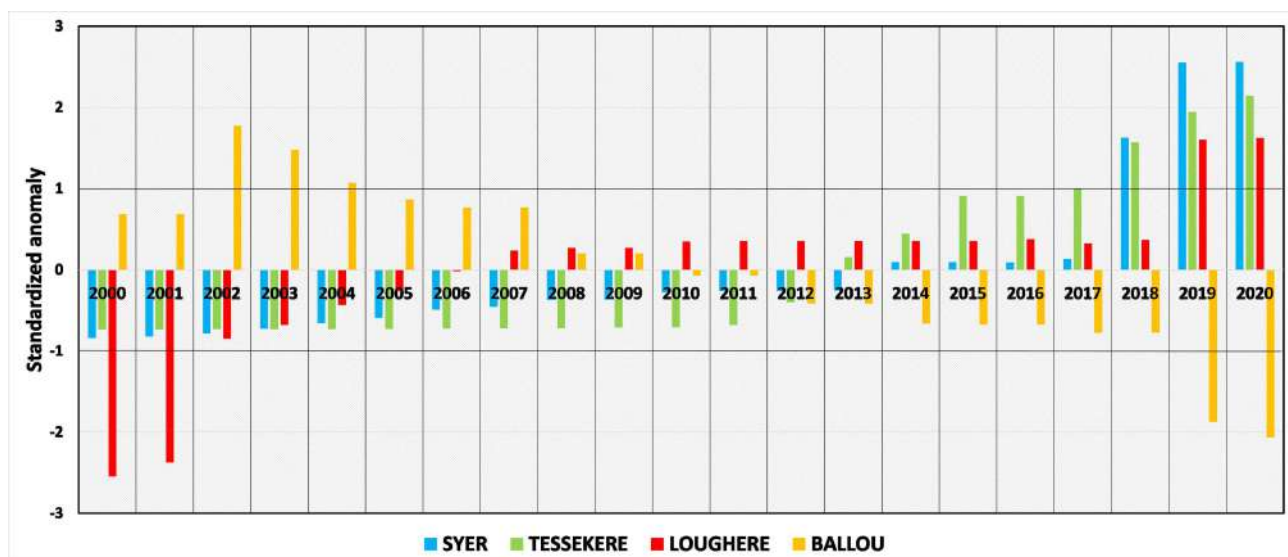


Figure 8. Evolution of carbon stock anomalies in Syer, Tessekere, Loughere Thioly and Ballou GGW-Senegal from 2000 to 2020.

For Ballou, the loss of capacity to store carbon in the soil is observed and became significant since 2019.

The results of the break tests applied to the carbon sequestration data are presented in the **Table 9** and **Figure 9**. The Buishand test, which shows the main break in the time series, reveals very significant breaks in the different localities. These breaks occurred in 2012 (Tessekere) 2013 (Syer), i.e., 3 to 4 years after the beginning of reforestation on these sites, and in 2006 at Loughere-Thioly. The

Table 9. Break dates, carbon storage statistics of the Buishand's test, and probability of occurrence of breaks, and slope of trends of Bayesian BEAST test.

Tests		Buishand's test			Bayesian BEAST test		
Sites	Break date	Average before break date (t.C/ha)	Average after break date (t.C/ha)	Buishand's statistics (U and P-value)	Break date	Probability	Slope
Syer	2013	20.51	20.60	U = 1.25 Pv = 2.2×10^{-16}	2017	0.994	0.39
					2008	0.012	0.04
					2012	0.936	0.44
Tessékéré	2012	26.50	28.62	U = 1.58 Pv = 2×10^{-16}	2016	0.162	0.28
					2007	0.004	3×10^{-04}
Loughéré-thioly	2006	18.02	18.23	U = 1.28 Pv = 5×10^{-05}	2006	0.502	0.03
					2017	0.275	0.01
Ballou	2009	11.19	11.18	U = 1.68 Pv = 2.1×10^{-16}	2004	0.513	-2.1×10^{-04}
					2016	0.028	-1.5×10^{-04}

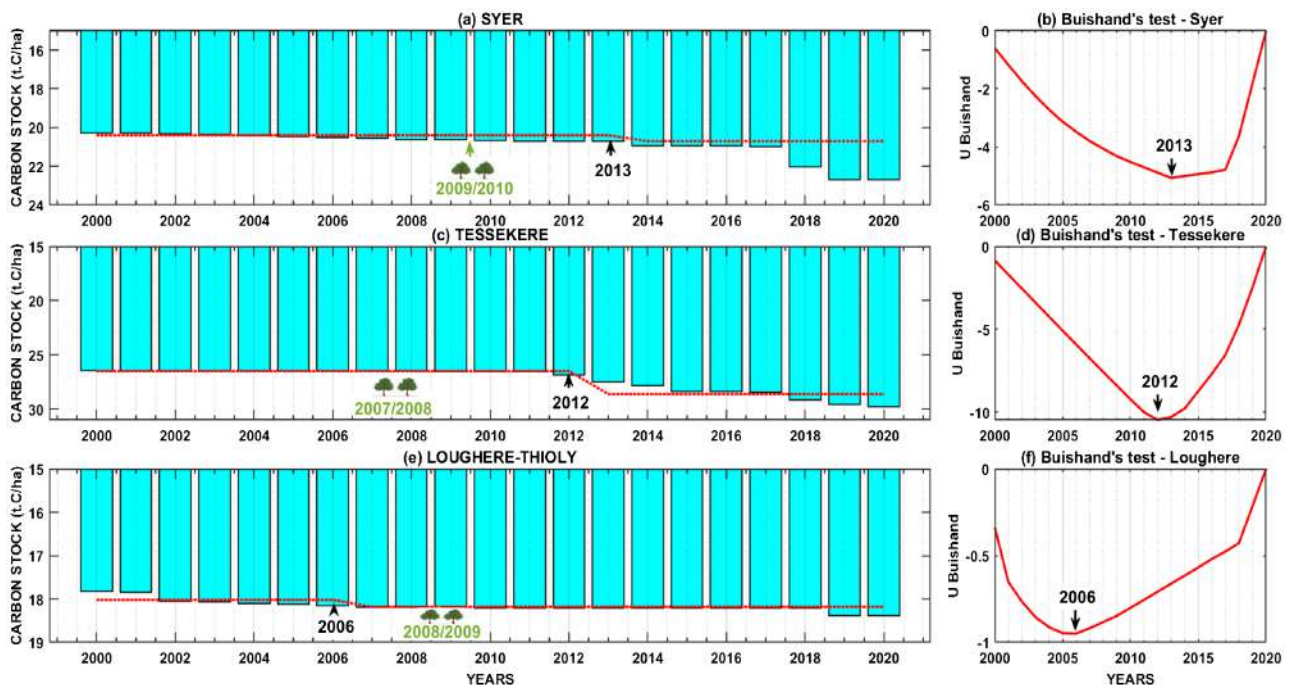


Figure 9. Annual evolutions of carbon storage and Buishand's test from 2000 to 2020 in Syer, Tessekere and Loughere-Thioly.

results of the BEAST test, which detect several breaks, show a change break in the trend in 2006, 2007, 2008 respectively in Loughere-Thioly, Tessekere and Syer. These years correspond to the beginning of tree planting on these sites. Then other breaks are located in the trends of the carbon storage series in 2016 (Tessekere) and 2017 (Syer and Loughere-Thioly). This second break corresponds to the year when carbon sequestration became significant in these localities. This result is in agreement with the representation of the standardized anomalies. The Bayesian test confirms the break change in 2012 at Tessekere. In the non-reforested locality (case of Ballou), the breaks are observed in 2004, 2009 and 2016. That of 2009 corresponds to the beginning of loss of open forest area.

One can note also that the average carbon stocks (t.C/ha) are still increasing and the slopes of the trends remain positive after the breaks in the reforested localities. On the other hand, in the locality not yet reforested, the average carbon stock is decreasing and the slopes are negative.

3) Quantity of carbon sequestered on GGW sites since reforestation.

One of the objectives of the Great Green Wall initiative is to sequester 250 million tons of carbon in the soil by 2030. Thus, this part of the work is dedicated to the assessment of the quantity of carbon stored on each site after the reforestation campaigns of the GGW initiative in Senegal.

In the commune of Syer, the quantity sequestered after 2010 is estimated at $1,679,931 \pm 127,085$ t.C. which represents an annual gain of $119,406 \pm 9550$ t.C/year. In Tessekere the carbon stock for the period 2009-2020 represents $3,729,318 \pm 283,822$ t.C and corresponds to $248,848 \pm 17,420$ t.C/year. In Loughere-Thioly after the various reforestation campaigns (started in 2009), the sequestration of organic carbon amounts to $362,902 \pm 29,032$ t.C, or $30,495 \pm 1525$ t.C/year. For all of the reforested sites in our study, the gain in carbon sequestration amounts to $5,772,151 \pm 439,939$ t.C or $398,749 \pm 27,910$ t.C/year.

On the other hand, on the non-reforested site of Ballou, the loss is estimated at -3055 ± 153 t.C, or -204 ± 10 t.C/year (see [Figure 10](#)).

The results of the organic carbon storage estimation in GGW Senegalese soils show an upward dynamic in carbon sequestration for the reforested sites of Syer, Tessekere (Louga), Loughere-Thioly (Matam) and a loss capacity to store carbon on non-reforested sites (case of Ballou in Tambacounda region) over the period 1992-2020. Other works ([\[17\]](#) [\[50\]](#)) had shown a positive dynamic of reforested sites based on vegetation indices (NDVI and VHI). The results of these studies reinforce ours on the positive dynamics of carbon sequestration observed in the different reforested soils of the GGW. Carbon storage and emission could be considered as good integrators of the state of plant cover health and anthropogenic pressures [\[88\]](#).

In the Senegal Sudanian zone, land cover and land use have a strong impact on the storage of organic carbon [\[84\]](#). This study shows that the conversion of forests to peanut fields causes a transformation of soil texture and a loss of organic carbon. Indeed, the carbon storage of dominant crop soils, in this case

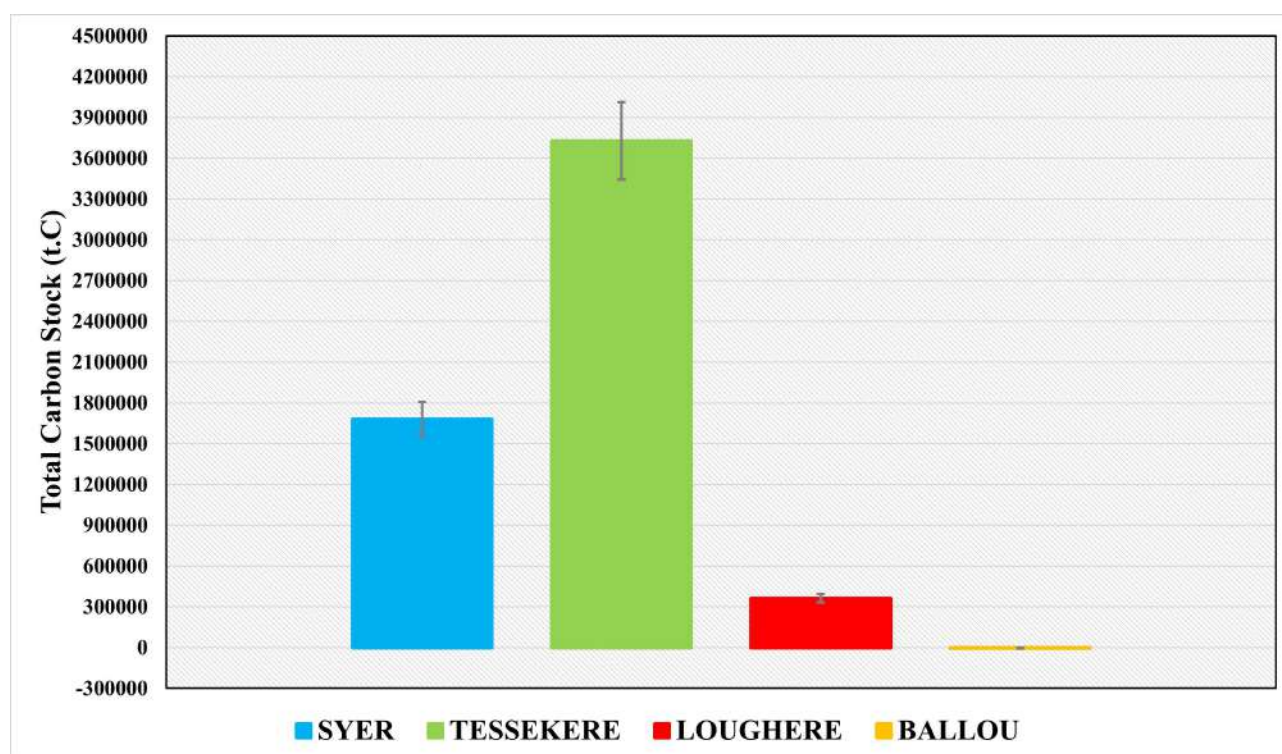


Figure 10. Gains and losses of sequestered carbon at Syer, Tessekere, Loughere-tioly and Ballou after reforestation.

peanut fields, is 27% to 35% lower than in semi-natural savanna soils. Organic carbon stock total is lower for sandy soils than in sandy clay soils. Furthermore, the study of [52] which was carried out on carbon stock measurements of 15 sites ranging from the North (Dagana department) At the South-East (Tambacounda region) in Senegal made a comparison between soil carbon stocks under the canopy and outside the canopy of trees. The study reveals that under the crown the carbon stock is estimated to 22.1 t.C/ha compared to 17.6 t.C/ha of outside the crown.

In the sub-region particularly in the agroforestry park of Saria in Burkina Faso, it is shown that the first layers of the soil contained 91% of the total carbon stock and these quantities varied between 8.74 ± 6.05 t.C/ha and 26.59 ± 7.94 t.C/ha ([85]). In the semi-arid landscape of Dano (Burkina Faso), the average stock is estimated at 24 t.C/ha. This study mentioned that the gallery forest soils stored more carbon (30.2 ± 15.6 t.C/ha) than those of savanna (22.1 ± 6.1 t.C/ha), forests (22 ± 8.2 t.C/ha), tree savanna (21.4 ± 7.4 t.C/ha), and cultivated land (14.9 ± 5.7 t.C/ha) ([86]). For these authors, these dry zone forest management systems play an important ecological role by contributing significantly to the fight against climate change through the strong potential for carbon sequestration. Trees and shrubs used in agroforestry systems increase carbon storage thanks to the addition of aerial and root biomass ([56] [85] [87] [89]). In Mali, the quantity of carbon sequestered varies depending on the agroforestry system and the maintenance techniques of these systems [89]. The rate of sequestered carbon differs from one system to another. It is estimated at 26 t.C/ha in the

Fallow system followed by the Savanna orchard system of 19 t.C/ha and 8 t.C/ha for the Plantation system.

The dynamics of the average carbon stock of the different reforested sites is increasing. In municipalities not yet reforested, the temporal evolution of organic carbon storage is decreasing. This is the case of areas in full urbanization (Ballou).

In Senegal, the estimation of the temporal evolution of carbon storage in soils is often based on modeling approaches ([55] [56] [84] [90]). The Century and RothC models were the most frequently used to predict soil carbon dynamics under different agronomic and soil scenarios ([56] [90]). [90] applied the Century model to Senegalese agrosystems. The different modes of agricultural land use lead to a reduction in soil organic carbon stocks between 2002 and 2050. Continuous crop rotation (groundnut-millet) without external carbon input leads to the greatest reduction in carbon stocks (−1.4 to −3.9 t.C/ha). On the other hand, agroforestry based on *Faidherbia albida* plantations generates the greatest increase in soil organic carbon stocks of +11 t.C/ha between 2002 and 2050 or 0.23 t.C/ha/year. The application of the RothC model in the same region shows that crop rotation (groundnut-millet) leads to the most significant reduction in organic carbon stocks from −1.8 to −5.1 t.C/ha ([55] [56]). Organic carbon stocks (from layer 0 - 25 cm) went from 8.1 t.C/ha in 2009 to 3.3 t.C/ha in 2050, a loss of 4.8 t.C/ha. By integrating an agroforestry scenario based on *Faidherbia Albida*, the increase in carbon stock is estimated at +12 t.C/ha between 2009 and 2050, i.e., an annual gain of 0.29 t.C/ha/year. In northern Senegal, [91] quantified carbon stock dynamics with the GEMS model. In 2000, the average carbon stock, taking into account land use (cultivated plots, fallow plots, forest areas, savannas and reforestation), was estimated at 28 t.C/ha in the 0 - 40 cm layer. According to [91], carbon stocks derived from bare soils vary between 5 t.C/ha and 15 t.C/ha for soils on irrigated cropping systems [91].

In the semi-arid region of Dano in Burkina Faso, the results of the HadGEM2-ES and MPI-ESM-MR models by 2070 showed that climate change could affect the carbon storage potential of woody species in different land use and land cover (LULC). These models estimate the reduction in carbon storage capacity of 90% for the HadGEM2-ES model and 89.4% for the MPI-ESM-MR model ([86]).

The results of the temporal evolution of carbon sequestration from these different simulations corroborate the dynamics observed on our study sites. On the other hand, a difference is noted between the carbon stock values obtained by the models and that derived from land use and land Cover maps. This difference could be explained by the input parameters used in the models (choice of planted species, soil texture, crop rotation, plantation ages) and the land cover data only taken into account in our study. Indeed, taking into account the species of reforested trees and the age of the plantations could improve the estimate of carbon storage ([86] [92]). The study carried out by [92] in Sudan, showed that above-

ground biomass in Acacia-Senegal plantations (*Senegalia Senegal*) is more important in 45-year-old plantations than in plantations of 16-year-old trees. Then, the average stock of sequestered carbon is 11.9 t.C/ha for 35-year-old plantations and 1.2 t.C/ha for 16-year-old plantations.

This study, which was carried out in certain localities of the GGW in Senegal shows the impact of reforestation (started in 2006 on certain sites) on the capacity of trees to capture atmospheric carbon dioxide and bury it in the soil. The results of our study estimated the average total sequestration has $4,177,726 \pm 12,539$ t.C to Syer; $5,740,287 \pm 23,306$ t.C in Tessekere; $3,257,418 \pm 7087$ t.C in Loughere-Thioly and $1,353,630 \pm 2779$ t.C for Ballou. After reforestation, the storage of carbon in the soil and the reduction of CO₂ in the atmosphere of these different sites increased by +3.5% at Loughere-Thioly and by +12.7% at Syer and Tessekere.

These results are consistent with the work of [93] [94] [95]. This work shows that vegetation restoration is an effective tool for increasing plant biomass and organic carbon content. And, Soil organic carbon content is significantly higher in natural vegetation restoration than in managed vegetation and plowed land.

In Senegal, the implementation and inventories of forest areas as part of the PROGEDE 1 and 2 projects (Sustainable and Participatory Management of Traditional and Alternative Energy Project; [54] [96]) in seven regions of Senegal since 1998, have made it possible to quantify 15.37 million tons of sequestered carbon and 56.41 million tons of CO₂. The highest values of stored carbon were recorded in the forests of eastern and southern Senegal. The carbon quantities of the Koar, Guimara and Kandiator sites were 3,488,107 t.C respectively; 2,444,917 t.C and 2,422,389 t.C.

In China, the implementation of Grain to Green Program (GTGP) and eco-environmental emigration in the rocky Karstic desert region (Southwest China) have made it possible to sequester carbon and produce oxygen. Between 2000 and 2010, [97] showed the impact of ecological rehabilitation initiatives started in 1999 in this region on soil carbon storage and oxygen production. It notes a significant annual increase of 20.94% in carbon sequestration and oxygen production. The total increase in carbon and oxygen production in different counties in this region was estimated to be 7.66 million tons and 3.51 million tons respectively in Baise and Huanjiang.

4. Conclusions

This study, which aims to evaluate the carbon sequestration dynamics in the sites of the Great Green Wall (GGW) of Senegal over the last three decades, made it possible to initially analyze the evolution of land cover and land use based on ESA-CCI LC satellite data. It reveals a degradation of the vegetation cover between 1992 and 2000. This situation is a consequence of the droughts during 1970s, 1980s and 1990s periods. Unfavorable climatic conditions associated with overexploitation of land led to reductions in agricultural areas, tree

savannas and forests. During the decades 2000-2020, a greening of different localities was observed. The gains in surface area of tree savannas and crop areas instead of steppes, grassland and bare soils vary between +2.7% to +11.4%. This greening of different localities and the improvement in the areas of tree and shrub savannas are due to above-normal rainfall on the one hand and to reforestation actions, agroforestry practices, better management of natural resources undertaken on the other hand. However, some non-reforested sites showed an opposite trend despite good rainfall.

Then, the carbon sequestration of the different localities of GGW Senegalese is computed according to the maps derived from the land cover. Estimated results for average total carbon sequestration range from 1.3 million t.C to 5.7 million t.C. Improvement of vegetation cover, mainly areas of tree and shrub savannas, by planting more than 18 million trees, restoring 15% of land, 9% of the GGW tree planting objective of Senegal and the setting aside of 13,000 ha, made it possible to sequester 2.31% of the African GGW objective. This gain in stored carbon amounts to 5.8 million tons of carbon which represents 21.2 million tons of CO₂ captured in the atmosphere. It appears from this study that carbon storage becomes significant 8 to 10 years after the start of reforestation. This study shows a loss of capacity to store carbon on non-reforested sites (case of Ballou). These results show the importance of implementing intelligent and sustainable land use management practices, intensifying reforestation in order to increase the carbon sequestration potential of these localities and combating the harmful effects of climatic changes.

Finally, the present results could be improved by integrating in future work the species of trees planted and the age of the consolidated plantations and serve as a reference level to evaluate the objectives of land restoration, carbon sequestration of the African GGW.

Acknowledgements

The authors would like to thank Fondation Coeur Vert for the availability of in situ data and information on the Senegalese GGW. We thank the European Space Agency Climate Change Initiative Land Cover (ESA-CCI LC) and Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS) for land cover data used in this study.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflicts of interest regarding the publication of this paper.

References

- [1] Nicholson, S.E. (1993) An Overview of African Rainfall Fluctuations of the Last Decade. *Journal of Climate*, **6**, 1463-1466.
[https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<1463:AOOARF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<1463:AOOARF>2.0.CO;2)
- [2] Nicholson, S.E. (2001) Climatic and Environmental Change in Africa during the

- Last Two Centuries. *Climate Research*, **17**, 123-144.
<https://doi.org/10.3354/cr017123>
- [3] Le Barbé, L., Lebel, T. and Tapsoba, D. (2002) Rainfall Variability in West Africa during the Years 1950-90. *Journal of Climate*, **15**, 187-202.
[https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<0187:RVIWAD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<0187:RVIWAD>2.0.CO;2)
 - [4] Ali, A. and Lebel, T. (2009) The Sahelian Standardized Rainfall Index Revisited. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, **29**, 1705-1714. <https://doi.org/10.1002/joc.1832>
 - [5] Ozer, P., Hountondji, Y.C., Niang, A.J., Karimoune, S., Laminou Manzo, O. and Salmon, M. (2010) Désertification au Sahel: Historique et perspectives. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, **54**, 69-84.
 - [6] Tappan, G., McGahuey, M. and Winterbottom, R. (2021) Restauration des paysages agricoles et des forêts sèches au Sénégal. *Restauration des terres arides de l'Afrique*, **31**, 31-39.
 - [7] Pasiecznik, N. and Reij, C. (2021) Restauration des terres arides de l'Afrique. *Tropenbos International, Ede, Pays-Bas*, **viii**, 292.
 - [8] Pasiecznik, N. and Reij, C. (2020) Restoring African Drylands. *ETFRN News*, **60**, 266.
 - [9] CILSS (2016) Landscapes of West Africa: A Window on a Changing World. CILSS, Ouagadougou.
 - [10] Andrieu, J., Cormier-Salem, M.C., Descroix, L., Sané, T. and Ndour, N. (2019) Correctly Assessing Forest Change in a Priority West African Mangrove Ecosystem: 1986-2010 An Answer to Carney et al. (2014) Paper "Assessing Forest Change in a Priority West African Mangrove Ecosystem: 1986-2010". *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, **13**, 337-347.
<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.12.001>
 - [11] Sylla, D., Ba, T. and Guisse, A. (2019) Cartographie des changements de la couverture végétale dans les aires protégées du Ferlo (Nord Sénégal): Cas de la réserve de biosphère. *Physio-Géo: Géographie physique et environnement*, **13**, 115-132.
<https://doi.org/10.4000/physio-geo.8178>
 - [12] Sylla, D., Ba, T., Sarr, O., Sagna, M.B., Sarr, M.A. and Guisse, A. (2020) Spatio-Temporal Dynamics of the Ecosystems of the Six Forages Sylvopastoral Reserve (Ferlo, North-Senegal). *SCIREA Journal of Geosciences*, **4**, 50-75.
 - [13] Diedhiou, I. (2019) Entre utilisation et préservation des ressources ligneuses en Afrique de l'Ouest: Dynamique des paysages forestiers en Sénégal méridionale. Master's Thesis, Université de Paris et Université Assane Seck de Ziguinchor, Ziguinchor.
 - [14] Solly, B., Oumar, S.Y., Jarju, A.M. and Tidiane, S.A.N.E. (2021) Détection des zones de dégradation et de régénération de la couverture végétale dans le sud du Sénégal à travers l'analyse des tendances de séries temporelles MODIS NDVI et des changements d'occupation des sols à partir d'images LANDSAT. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, **223**, 1-15. <https://doi.org/10.52638/rfpt.2021.580>
 - [15] Marega, O., Emeterio, J.L.S., Fall, A. and Andrieu, J. (2021) Cartographie par télédétection des variations spatio-temporelles de la couverture végétale spontanée face à la variabilité pluviométrique au Sahel: Approche multiscalaire. *Physio-Géo: Géographie physique et Environnement*, **16**, 1-28.
<https://doi.org/10.4000/physio-geo.11977>
 - [16] Solly, B., Andrieu, J., Dièye, E.H.B. and Jarju, A.M. (2022) Dynamiques contrastées de reverdissement et dégradation de la couverture végétale au Sénégal révélées par analyse de série temporelle du NDVI MODIS. *Vertigo*, **22**, 1-24.

- <https://doi.org/10.4000/vertigo.35589>
- [17] Gore, B.T.O., Aman, A., Kouadio, Y. and Duclos, O.M. (2023) Recent Vegetation Cover Dynamics and Climatic Parameters Evolution Study in the Great Green Wall of Senegal. *Journal of Environmental Protection*, **14**, 254-284.
<https://doi.org/10.4236/jep.2023.144018>
 - [18] Schucknecht, A., Meroni, M. and Rembold, F. (2016) Monitoring Project Impact on Biomass Increase in the Context of the Great Green Wall for the Sahara and Sahel Initiative in Senegal. Publications Office of the European Union, Ispra.
 - [19] Dia, A. and Duponnois, R. (2012) Le projet majeur africain de la Grande Muraille Verte: Concepts et mise en œuvre. IRD Éditions, Wellington.
 - [20] Dia, A. and Niang, A.M. (2010) Le Projet Majeur Grande Muraille Verte de l'Afrique: Contexte, historique, approche stratégique, impacts attendus et gouvernance de la Grande Muraille Verte. IRD Éditions, Wellington.
<https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.2106>
 - [21] UNCCD (2020) The Great Green Wall Implementation Status and Way Ahead to 2030. Climatekos gGmbH.
https://catalogue.unccd.int/1551_GGW_Report_ENG_Final_040920.pdf
 - [22] Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie (ANSD) (2021) ANSD/ Projections 2021. Sénégal. <http://www.ansd.sn/>
 - [23] CSE (2020) Rapport sur l'État de l'Environnement au Sénégal, édition 2020. Ministère de l'Environnement et du Développement Durable (MEDD), Centre de Suivi Ecologique (CSE).
 - [24] Di Gregorio, A. and Jansen, L.J.M. (2005) Land Cover Classification System (LCCS): Classification Concepts and User Manual. Food & Agriculture Organization.
<https://www.fao.org/3/x0596e/x0596e00.htm>
 - [25] ESA (2017) ESA Land Cover CCI Product Validation and Intercomparison. Report (PVIR) v2. <https://climate.esa.int/en/projects/land-cover/key-documents/>
 - [26] Defourny, P., Bontemps, S., Lamarche, C., Brockmann, C., Boettcher, M., *et al.* (2017) Land Cover CCI: Product User Guide Version 2.0.
http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download/ESACCI-LC-Ph2-PUGv2_2.0.pdf
 - [27] Copernicus Climate Change Service (2019) Land Cover Classification Gridded Maps from 1992 to Present Derived from Satellite Observation. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS).
 - [28] ECMWF (2021) C3S Product Quality Assurance Document—ICDR Land Cover 2020.
https://datastore.copernicus-climate.eu/documents/satellite-land-cover/D3.3.11-v1.0_PUGS_CDR_LC-CCI_v2.0.7cds_Products_v1.0.1_APPROVED_Ver1.pdf
 - [29] Duveiller, G., Caporaso, L., Abad-Viñas, R., Perugini, L., Grassi, G., Arneth, A. and Cescatti, A. (2020) Local Biophysical Effects of Land Use and Land Cover Change: Towards an Assessment Tool for Policy Makers. *Land Use Policy*, **91**, Article ID: 104382. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104382>
 - [30] Houghton, R.A. and Castanho, A. (2023) Annual Emissions of Carbon from Land Use, Land-Use Change, and Forestry from 1850 to 2020. *Earth System Science Data*, **15**, 2025-2054. <https://doi.org/10.5194/essd-15-2025-2023>
 - [31] Klein Goldewijk, K., Beusen, A., Doelman, J. and Stehfest, E. (2017) Anthropogenic Land Use Estimates for the Holocene-HYDE 3.2. *Earth System Science Data*, **9**, 927-953. <https://doi.org/10.5194/essd-9-927-2017>
 - [32] Lurton, T., Balkanski, Y., Bastrikov, V., Bekki, S., Bopp, L., Braconnot, P., Boucher, O., *et al.* (2020) Implementation of the CMIP6 Forcing Data in the IPSL-CM6A-LR

- Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **12**, e2019MS001940. <https://doi.org/10.1029/2019MS001940>
- [33] Georgievski, G. and Hagemann, S. (2019) Characterizing Uncertainties in the ESA-CCI Land Cover Map of the Epoch 2010 and Their Impacts on MPI-ESM Climate Simulations. *Theoretical and Applied Climatology*, **137**, 1587-1603. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2675-2>
- [34] Akinyemi, F.O. and Mashame, G. (2018) Analysis of Land Change in the Dryland Agricultural Landscapes of Eastern Botswana. *Land Use Policy*, **76**, 798-811. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.03.010>
- [35] Kganyago, M. and Shikwambana, L. (2019) Assessing Spatio-Temporal Variability of Wildfires and Their Impact on Sub-Saharan Ecosystems and Air Quality Using Multisource Remotely Sensed Data and Trend Analysis. *Sustainability*, **11**, Article 6811. <https://doi.org/10.3390/su11236811>
- [36] Li, W., MacBean, N., Ciais, P., Defourny, P., Lamarche, C., Bontemps, S., Houghton, R.A. and Peng, S. (2018) Gross and Net Land Cover Changes in the Main Plant Functional Types Derived from the Annual ESA CCI Land Cover Maps (1992-2015). *Earth System Science Data*, **10**, 219-234. <https://doi.org/10.5194/essd-10-219-2018>
- [37] Plummer, S., Lecomte, P. and Doherty, M. (2017) The ESA Climate Change Initiative (CCI): A European Contribution to the Generation of the Global Climate Observing System. *Remote Sensing of Environment*, **203**, 2-8. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.014>
- [38] Zhang, C., Ye, Y., Fang, X., Li, H. and Zheng, X. (2020) Coincidence Analysis of the Cropland Distribution of Multi-Sets of Global Land Cover Products. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **17**, Article 707. <https://doi.org/10.3390/ijerph17030707>
- [39] Hu, X., Naess, J.S., Iordan, C.M., Huang, B., Zhao, W. and Cherubini, F. (2021) Recent Global Land Cover Dynamics and Implications for Soil Erosion and Carbon Losses from Deforestation. *Anthropocene*, **34**, Article ID: 100291. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2021.100291>
- [40] UNCCD: United Nations Convention to Combat Desertification (2018) Default Data: Methods and Interpretation. A Guidance Document for 2018 UNCCD Reporting. Bonn.
- [41] OCDE: Organisation for Economic Co-Operation and Development (2023). Environment at a Glance Indicators. Éditions OCDE, Paris. <https://doi.org/10.1787/ac4b8b89-en>
- [42] OCDE: Organisation for Economic Co-Operation and Development (2017) Green Growth Indicators 2017, OECD Green Growth Studies. Éditions OCDE, Paris.
- [43] FAO: Food and Agriculture Organization (2022) FAOSTAT Land, Inputs and Sustainability, Land Cover. Rome, ITALIE. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/LC>
- [44] Biga, I., Amani, A., Soumana, I., Bachir, M. and Mahamane, A. (2020) Dynamique spatio-temporelle de l'occupation des sols des communes de Torodi, Gothèye et Tagazar de la région de Tillabéry au Niger. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **14**, 949-965. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v14i3.24>
- [45] Taibou, B. and Seck, D. (2012) Dynamique de l'occupation des sols, cartographie des CLPA, des zones de pêche et mise en place d'un système d'information géographique au Sénégal. Rapport d'exécution University of Rhode Island, Narragansett RI.
- [46] Barima, Y.S.S., Egnankou, W.M., N'doumé, A.T.C., Kouamé, F.N. and Bogaert, J.

- (2010) Modélisation de la dynamique du paysage forestier dans la région de transition forêt-savane à l'est de la Côte d'Ivoire. *Télédétection: Revue de Recherche et d'Application en Télédétection*, **9**, 129-138.
- [47] IRD: Institut de recherche pour le développement (2020) Quantifier le carbone du sol la croisée des enjeux. <https://www.ird.fr/quantifier-le-carbone-du-sol-la-croisee-des-enjeux>
- [48] IPCC (2006) Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. The National Greenhouse Gas Inventories Programme.
- [49] Aitali, R., Snoussi, M., Kolker, A., Oujidi, B. and Mhammdi, N. (2022) Effects of Land Use/Land Cover Changes on Carbon Storage in North African Coastal Wetlands. *Journal of Marine Science and Engineering*, **10**, Article 364. <https://doi.org/10.3390/jmse10030364>
- [50] Dai, X., Yang, G., Liu, D. and Wan, R. (2020) Vegetation Carbon Sequestration Mapping in Herbaceous Wetlands by Using a MODIS EVI Time-Series Data Set: A Case in Poyang Lake Wetland, China. *Remote Sensing*, **12**, Article 3000. <https://doi.org/10.3390/rs12183000>
- [51] Mba, B.M.M., Pennober, G., Revillion, C., Rouet, P. and David, G. (2022) Estimations, à partir de séries d'images LANDSAT, des évolutions de stocks de carbone de différentes formations en milieu équatorial côtier-cas de Libreville au Gabon. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, **223**, 217-231. <https://doi.org/10.52638/rfpt.2021.556>
- [52] N'Goran, A.J.A., Diouf, A.A., Diatta, S., Assouma, M.H., Djagoun, A.J., Assogba, G.G.C., Taugourdeau, S., *et al.* (2022) Variability of Soil Carbon Stocks under and outside the Tree Crown in the Sylvopastoral Zone of Senegal. *Revue d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux*, **75**, 67-75. <https://doi.org/10.19182/remvt.36984>
- [53] Retiere, A. (2015) République Du Senegal—Land Degradation Neutrality Rapport National. United Nations Convention to Combat Desertification. <https://policycommons.net/artifacts/3135696/republique-du-senegal/3928929/>
- [54] République du Sénégal, Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature (2016) Rapport d'évaluation des stocks de carbone dans les massifs forestiers de la zone d'intervention du PROGEDE 2. https://chm.cbd.int/api/v2013/documents/444E5F03-4B67-2DB2-66C0-D5BDD9529058/attachments/RAPPORT_EVALUATION_STOCKS_DE_CARBONE_PROGEDE_2_word%5B1%5D.docx
- [55] Loum, M., Viaud, V., Fouad, Y., Nicolas, H. and Walter, C. (2014) Retrospective and Prospective Dynamics of Soil Carbon Sequestration in *Sahelian agrosystems* in Senegal. *Journal of arid environments*, **100**, 100-105. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2013.10.007>
- [56] Ndour, Y.B., Sall, S.N., Loum, M., Diouf, A., Wélé, A., Ndiaye, O., Lardy, L.C., *et al.* (2020) Dynamique de stockage du carbone dans les sols du Sénégal: Acquis de la recherche et perspectives. In: IRD Éditions, Éd., *Carbone des sols en Afrique: Impacts des usages des sols et des pratiques agricoles*. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.35002>
- [57] Chevallier, T., Razafimbelo, T., Chapuis-Lardy, L. and Brossard, M. (2020) Carbone des sols en Afrique: Impacts des usages des sols et des pratiques agricoles. IRD Éditions, FAO, Rome. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.34867>
- [58] Ndiaye, D., Sagna, M.B., Talla, R., Diallo, A., Peiry, J.L. and Guisse, A. (2021) Evaluation of the Aerial Biomass of Three Sahelian Species in the Ferlo (North Senegal):

- Acacia tortilis* (Forsk.) Hayn essp. Raddiana (Savi) Brenan, *Acacia senegal* (L.) Willd and *Balanites aegyptiaca* (L.) Del. *Open Journal of Ecology*, **11**, 183-201. <https://doi.org/10.4236/oje.2021.112015>
- [59] Mbow, C., Chhin, S., Sambou, B. and Skole, D. (2013) Potential of Dendrochronology to Assess Annual Rates of Biomass Productivity in Savanna Trees of West Africa. *Dendrochronologia*, **31**, 41-51. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2012.06.001>
- [60] Henry, M., Picard, N., Trotta, C., Manlay, R., Valentini, R., Bernoux, M. and Saint André, L. (2011) Estimating Tree Biomass of Sub-Saharan African Forests: A Review of Available Allometric Equations. *Silva Fennica*, **45**, Article ID: 38. <https://doi.org/10.14214/sf.38>
- [61] Henry, M., Valentini, R. and Bernoux, M. (2009) Soil Carbon Stocks in Ecoregions of Africa. *Biogeosciences Discussions*, **6**, 797-823. <https://doi.org/10.5194/bgd-6-797-2009>
- [62] Barthès B.G. and Chotte, J.L. (2020) Infrared Spectroscopy Approaches Support Soil Organic Carbon Estimations to Evaluate Land Degradation. *Land Degradation & Development*, **32**, 310-322. <https://doi.org/10.1002/ldr.3718>
- [63] Teng, H., Rossel, R.A.V., Shi, Z., Behrens, T., Chappell, A. and Bui, E. (2016) Assimilating Satellite Imagery and Visible-Near Infrared Spectroscopy to Model and Map Soil Loss by Water Erosion in Australia. *Environmental Modelling & Software*, **77**, 156-167. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.11.024>
- [64] Cambou, A., Cardinael, R., Kouakoua, E., Villeneuve, M., Durand, C. and Barthès, B.G. (2016) Prediction of Soil Organic Carbon Stock Using Visible and Near Infrared Reflectance Spectroscopy (VNIRS) in the Field. *Geoderma*, **261**, 151-159. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.007>
- [65] Buishand, T.A. (1984) Tests for Detecting a Shift in the Mean of Hydrological Time Series. *Journal of Hydrology*, **73**, 51-69. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(84\)90032-5](https://doi.org/10.1016/0022-1694(84)90032-5)
- [66] Zhao, K., Wulder, M.A., Hu, T., Bright, R., Wu, Q., Qin, H., Li, Y., Toman, E., Mallick B., Zhang, X. and Brown, M. (2019) Detecting Change-Point, Trend, and Seasonality in Satellite Time Series Data to Track Abrupt Changes and Nonlinear Dynamics: A Bayesian Ensemble Algorithm. *Remote Sensing of Environment*, **232**, Article ID: 111181. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.04.034>
- [67] Paturel, J.E., Servat, E., Delattre, M.O. and Lubes-Niel, H. (1998) Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. *Hydrological Sciences Journal*, **43**, 937-946. <https://doi.org/10.1080/02626669809492188>
- [68] Elberling, B., Touré, A. and Rasmussen, K. (2003) Changes in Soil Organic Matter Following Groundnut-Millet Cropping at Three Locations in Semi-Arid Senegal, West Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **96**, 37-47. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00010-0](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00010-0)
- [69] Lebel, T. and Ali, A. (2009) Recent Trends in the Central and Western Sahel Rainfall Regime (1990-2007). *Journal of Hydrology*, **375**, 52-64. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.11.030>
- [70] Sarr, M.A. (2009) Évolution récente du climat et de la végétation au Sénégal: Cas du Bassin versant du Ferlo. Master's Thesis, Université Jean Moulin Lyon 3, Lyon.
- [71] Bakhom, A. (2013) Dynamique des ressources fourragères: Indicateur de résilience des parcours communautaires de Tessekere au Ferlo (Nord-Sénégal). Ph.D. Biologie, Productions et Pathologies Animales, Option Ecologie Pastorale, FST-UCAD, 115 p.

- [72] Descroix, L. (2018) Processus et enjeux d'eau en Afrique de l'Ouest Sahélo-Soudanienne. Editions des archives contemporaines, France.
- [73] Aman, A., Nafogou, M., Bi, H.V.N.G., Kouadio, Y.K. and Kouadio, H.B. (2019) Analysis and Forecasting of the Impact of Climatic Parameters on the Yield of Rain-Fed Rice Cultivation in the Office Riz Mopti in Mali. *Atmospheric and Climate Sciences*, **9**, 479-497. <https://doi.org/10.4236/acs.2019.93032>
- [74] Sylla, D., Taibou, B.A., Diallo, M.D., Mbaye, T., Diallo, A., Peiry, J.L. and Guisse, A. (2019) Dynamique de l'occupation du sol de la commune de Tèssékéré de 1984 à 2015 (Ferlo Nord, Sénégal). *Journal of Animal & Plant Sciences*, **40**, 6674-6689. <https://doi.org/10.35759/JAnmPlSci.v40-3.2>
- [75] Dendoncker, M., Ngom, D. and Vincke, C. (2015) Tree Dynamics (1955-2012) and Their Uses in Senegal's Ferlo Region: Insights from a Historical Vegetation Database, Local Knowledge and Field Inventories. *Bois & Forêts Des Tropiques*, **326**, 25-41. <https://doi.org/10.19182/bft2015.326.a31281>
- [76] Bodian, A. (2011) Approche par modélisation pluie-débit de la connaissance régionale de la ressource en eau: Application au haut bassin du fleuve Sénégal. Master's Thesis, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Dakar. <https://doi.org/10.4000/cdg.1027>
- [77] Zida, W.A. (2020) Dynamique du couvert végétal forestier des agrosystèmes sahéliens du nord du Burkina Faso après les sécheresses des années 1970-1980: Implication des pratiques d'aménagement des terres. Master's Thesis, Université du Québec à Montréal (Canada), Montreal.
- [78] Brandt, M., Tucker, C.J., Kariryaa, A., Rasmussen, K., Abel, C., Small, J.L., Chave, J., Rasmussen, L.V., Hiernaux, P., Diouf, A.A., Kergoat, L., Mertz, O., Igel, C., Gieseke, F., Schöning, J., Li, S., Melocik, K.A., Meyer, J.R., Sinno, S., Romero, E., Glennie, E., *et al.* (2020) An Unexpectedly Large Count of Trees in the West African Sahara and the Sahel. *Nature*, **587**, 78-82. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2824-5>
- [79] Brandt, M., Hiernaux, P., Rasmussen, K., Tucker, C.J., Wigneron, J.P., Diouf, A.A., Herrmann, S.M., Zhang, W., Kergoat, L., Mbow, C., Abel, C., Auda, Y. and Fensholt, R. (2019) Changes in Rainfall Distribution Promote Woody Foliage Production in the Sahel. *Communications Biology*, **2**, Article No. 133. <https://doi.org/10.1038/s42003-019-0383-9>
- [80] Diallo, R. and Angmv, I.E.F. (2019) Grande Muraille verte. Ministère de l'Environnement et du Développement Durable du Sénégal.
- [81] Wu, S., Gao, X., Lei, J., Zhou, N. and Wang, Y. (2020) Spatial and Temporal Changes in the Normalized Difference Vegetation Index and Their Driving Factors in the Desert/Grassland Biome Transition Zone of the Sahel Region of Africa. *Remote Sensing*, **12**, Article 4119. <https://doi.org/10.3390/rs12244119>
- [82] FAO: Food and Agriculture Organization (2019) Measuring and Modelling Soil Carbon Stocks and Stock Changes in Livestock Production Systems—A Scoping Analysis for the LEAP Work Stream on Soil Carbon Stock Changes. Rome.
- [83] Maillard, É., Angers, D.A., Chantigny, M., Lafond, J., Pageau, D., Rochette, P., Lévesque, G., Leclerc, M.L. and Parent, L.E. (2016) Greater Accumulation of Soil Organic Carbon after Liquid Dairy Manure Application under Cereal-Forage Rotation than Cereal Monoculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **233**, 171-178. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.09.011>
- [84] Touré, A., Emile, T., Claire, G. and Bo, E. (2013) Land Use and Soil Texture Effects on Organic Carbon Change in Dryland Soils, Senegal. *Open Journal of Soil Science*, **3**, 253-262. <https://doi.org/10.4236/ojss.2013.36030>
- [85] Koala, J., Kagambega, O.R. and Sanou, L. (2013) Distribution des stocks de carbone

- du sol et de la biomasse racinaire dans un parc agroforestier à *Prosopis africana* (Guill., et Rich.) Taub au Burkina Faso, Afrique de l'Ouest. *Journal of Applied Biosciences*, **160**, 16482-16494. <https://doi.org/10.35759/JABs.160.5>
- [86] Dimobe, K., Kouakou, J.L.N.D., Tondoh, J.E., Zoungrana, B.J.B., Forkuor, G. and Ouédraogo, K. (2018) Predicting the Potential Impact of Climate Change on Carbon Stock in Semi-Arid West African Savannas. *Land*, **7**, Article 124. <https://doi.org/10.3390/land7040124>
- [87] Boukeng, E.J.D., Avana, M.L.T., Zapfack, L., Desrochers, A., Dzo, I.G.M. and Khasa, D. (2023) Stocks de carbone des systèmes agroforestiers de la zone soudano-sahélienne du Cameroun, Afrique centrale. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, **27**, 19-30. <https://doi.org/10.25518/1780-4507.20143>
- [88] Sullivan, M.J., Talbot, J., Lewis, S.L., Phillips, O.L., Qie, L., Begne, S.K., Zemagho, L., *et al.* (2017) Diversity and Carbon Storage across the Tropical Forest Biome. *Scientific Reports*, **7**, Article No. 39102. <https://doi.org/10.1038/srep39102>
- [89] Fane, S., Maharazy, A.Y., Karembe, Y. and Karembe, M. (2022) Séquestration de carbone par les arbres des systèmes agroforestiers en zone soudanienne de la Région de Dioïla au Mali. <https://www.researchgate.net/publication/360555300>
- [90] Tschakert, P. (2004) Carbon for Farmers: Assessing the Potential for Soil Carbon Sequestration in the Old Peanut Basin of Senegal. *Climatic Change*, **67**, 273-290. <https://doi.org/10.1007/s10584-004-1821-2>
- [91] Dieye, A.M., Roy, D.P., Hanan, N.P., Liu, S., Hansen, M. and Toure, A. (2012) Sensitivity Analysis of the GEMS Soil Organic Carbon Model to Land Cover Land Use Classification Uncertainties under Different Climate Scenarios in Senegal. *Biogeosciences*, **9**, 631-648. <https://doi.org/10.5194/bg-9-631-2012>
- [92] Abass, F.E.A., Khugali, S.S.M., Ahmed, N.A.M., Laamrani, A., Elhadi, E.A., Siddig, A.A.H. and Kouassi, E.K. (2023) Estimating Ecological Characteristics and Carbon Stock in Uneven-Aged Plantations of *Acacia senegal* L. in the Savannah Woodlands of Sudan. *Journal of Environmental Protection*, **14**, 404-418. <https://doi.org/10.4236/jep.2023.145024>
- [93] Zhang, J., Terrones, M., Park, C.R., Mukherjee, R., Monthieux, M., Koratkar, N., Bianco, A., *et al.* (2016) Carbon Science in 2016: Status, Challenges and Perspectives. *Carbon*, **98**, 708-732. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.11.060>
- [94] Gong, L., Liu, G., Wang, M., Ye, X., Wang, H. and Li, Z. (2017) Effects of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon in China: A Meta-Analysis. *Chinese Geographical Science*, **27**, 188-200. <https://doi.org/10.1007/s11769-017-0858-x>
- [95] Bacar, T.S., Cheng, Y., Wang, Y., Kaboul, K. and Lopes, N.D.R. (2022) The Effect of Vegetation Restoration in Soil Organic Carbon Storage. *Open Journal of Soil Science*, **12**, 427-445. <https://doi.org/10.4236/ojss.2022.129017>
- [96] PROGEDE (2009) Bilan des réalisations du PROGEDE Janvier 1998 Décembre 2008. Edition République du Sénégal, Projet de Gestion Durable et Participative des Energies Traditionnelles et de Substitution. Rapport de travail, Dakar (Sénégal).
- [97] Zhang, M., Wang, K., Liu, H., Wang, J., Zhang, C., Yue, Y. and Qi, X. (2016) Spatio-Temporal Variation and Impact Factors for Vegetation Carbon Sequestration and Oxygen Production Based on Rocky Desertification Control in the Karst Region of Southwest China. *Remote Sensing*, **8**, Article 102. <https://doi.org/10.3390/rs8020102>