

Travail de fin d'études

Auteur : Hien, Koufanou

Promoteur(s) : Djaby, Bakary

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master de spécialisation en gestion des risques et des catastrophes

Année académique : 2021-2022

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/16412>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



ULiège - Faculté des Sciences

Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

**Master de spécialisation en Gestion des Risques et des
Catastrophes**

Année académique : 2021–2022

**Caractérisation de la dynamique environnementale au Sahel dans le contexte du
changement climatique à partir des indicateurs environnementaux dérivés
l'imagerie satellitaire basse résolution : cas du Burkina Faso**

Présenté par Koufanou HIEN

*Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master de Spécialisation en
Gestion des risques et des Catastrophes*

Promoteur :

Dr. Bakary Djaby

Comité de lecture

Dr. Abdoul-Hamid M. Sallah

Dr. Moussa El Jarroudi

Septembre 2022

Dédicace

À

Mes parents : mon père et ma mère

ET

À celui qui m'est très cher : Yiviel Yves-Junior HIEN

Remerciements

Au terme de cette formation, nous voudrions adresser nos remerciements à tous ceux qui ont concouru à sa réussite . Nos remerciements vont premièrement à l'endroit du **Ministère de l'Agriculture du Burkina Faso et au Centre de Compétence WASCAL** pour les facilités accordées afin de prendre part à cette formation. Nous tenons également à remercier **l'Académie de Recherche pour l'Enseignement Supérieur en Belgique (ARES) et le PACODEL** pour l'opportunité offerte à travers cette bourse de formation. De façon précise, nous tenons à exprimer notre gratitude :

- ◆ à **l'Université de Liège** , pour nous avoir accueillis au sein de l'institution pour ce Master de spécialisation ;
- ◆ à **Monsieur le Coordonnateur du Master de Spécialisation en Gestion des Risques et des Catastrophes (Ms - GRC), Dr. Pierre OZER** , pour son rôle déterminant dans la bonne marche de cette formation ;
- ◆ **au Corps professoral interne et externe** à l'Université pour avoir bien voulu partager leurs connaissances et nous orienter dans nos objectifs de formation ;
- ◆ **au Dr. Bakary Djaby**, notre promoteur, qui malgré son calendrier chargé a accepté nous orienter, nous conseiller et nous guider pour notre travail de fin d'études. Qu'il trouve ici toutes notre reconnaissance.

Nous remercions particulièrement au **Dr Seyni SALACK** pour son soutien et sa confiance à mon égard

Nous faisons une mention spéciale aux camarades étudiants de l'Université de Liège (ULiège), et spécialement à ceux du Master GRC 2021 -2022, pour l'année passée ensemble. Que des hauts et des bas mais nous avons su former une famille pour la vie.

Je n'oublie pas toutes ces personnes qui ont toujours été à nos côtés, de loin ou de près, et dont les noms n'ont pu être cités ; qu'elles trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

Nous ne terminerons ces mots de remerciement sans avoir une pensée spéciale pour nos parents, qui ont toujours été à nos côtés pour nous soutenir et nous guider tout au long de notre vie (...).

Liste des figures

1	Evolution de l'indice de précipitation au Sahel Source : http://research.jisao.washington.edu/data/sahel/	
2	Différents métriques phénologiques Source : Eklundh and Jönsson (2017)	7
3	Zones agroclimatiques au Burkina Faso	8
4	Algorithme des grandes opérations de la méthodologie	11
5	Exemple de formatage des données sous xview	12
6	Variabilité pluviométrique interannuelle au niveau quelques stations suivant le gradient Nord-Sud (barre rouge : année sèche et barre bleue : année humide)	17
7	Rupture dans la dynamique pluviométrique au niveau de quelques localités sur la période 1990-2020)	18
8	Variabilité du NDVI maximum suivant les zones agroclimatiques	20
9	Variation moyenne annuelle du NDVI au Burkina Faso de 1999 à 2020	20
10	Variation moyenne intra-annuelle du NDVI au Burkina Faso de 1999 à 2020	21
11	: Tendances du NDVI entre 1999 et 2020 au Burkina Faso [seuil de 5%]	21
12	: Relation entre la pluie et le NDVI dans quelques localités à tendance régressive du NDVI	23
13	: Répartition spatiale des classes des pentes dans les zones à forte variabilité entre 1999 et 2020 au Burkina Faso	24
14	Les différents bassins versants nationaux	I
15	Tendance de la pluviométrie sur la période 1991-2020 dans les départements	II
16	Evolution des superficies emblavées dans différentes localités de 2011 à 2020	III
17	Corrélation entre pluie cumulée sur trois mois et NDVI max	IV

Liste des tableaux

1	Définition des classes selon les tendances	15
2	Répartition des tendances de la variabilité pluviométrique	19
3	Répartition des localités étudiées selon le test de tendances de Mann-Kendall . . .	22

Sigles et Abréviations

CRA : Centre Régional AGHRYMET

CILSS : Comité permanent Inter-Etats de lutte contre la Sécheresse au Sahel

INSD : Institut National de la statistique et de la démographie

ANAM : Agence Nationale de la Météorologie du Burkina Faso

OMM : Organisation Météorologique Mondiale

VCE : Variable Climatique Essentielle

IV : Indice de Végétation

FCover : Fraction de Couverture Végétale

LAI : Indice de Surface Foliaire

GIEC : Groupe Inter-gouvernemental pour l'Evolution du Climat

NDVI : Indice de Végétation par Différence Normalisée

EVI : Indice de Végétation Amélioré

MERH : Ministère de l'Environnement et des Ressources Halieutiques

PANA : Programme National d'Adaptation aux Changements Climatiques

MEE : Ministère de l'Environnement et de l'Eau

FAO : Organisation des Nations-Unies pour l'Alimentation et la Faim

MEF : Ministère de l'Economie et des Finances

NDVI_x : Indice de Végétation par Différence Normalisée maximum

RUE : Indice d'utilisation efficiente de l'eau

Table des matières

Dédicace	i
Remerciements	ii
Liste des figures	iii
Liste des tableaux	iv
Sigles et Abréviations	v
Résumé	vii
Abstract	viii
1 Introduction	1
1.1 Contexte et justification	1
1.2 Objectifs, Questions et hypothèses de l'étude	2
1.2.1 Objectif général (OG)	3
1.2.2 Objectifs spécifiques (OS)	3
1.3 Hypothèses de l'étude	3
1.4 Contribution de l'étude	3
2 État de l'art	5
2.1 Contexte agro-climatique et environnemental	5
2.2 Indicateurs environnementaux et agro-climatiques	5
2.2.1 Variables environnementales	6
2.2.2 Variables agroclimatiques	7
3 Matériel, Données et Méthodes	8
3.1 Zone d'étude	8
3.2 Données	9
3.2.1 Données sur les indices de végétation (NDVI)	9
3.2.2 Données climatiques	9
3.3 Outils d'analyse	10
3.3.1 R et Rstudio	10
3.3.2 Outil SPIRITS	10
3.3.3 Logiciel SIG (QGIS)	10
3.4 Méthodologie et analyse	11
3.4.1 Pré-traitement des données	11
3.4.2 Extraction des données (indices de végétation et données climatiques)	12
3.4.3 Variabilité climatique et environnementale	13
3.4.4 Caractérisation des tendances et identification des zones de forte variabilité (zones de "hots spots")	14
3.4.5 Lien entre climat et indices de végétation	15
4 Résultats	17

4.1	Caractéristiques environnementales et climatiques	17
4.1.1	Variabilité interannuelle des pluies	17
4.1.2	Variabilité de l'indice de végétation dans les différentes zones climatiques	19
4.2	Caractérisation des zones de changement ou de "hots spot"	20
4.3	Relation NDVI - Pluie	22
5	Discussions	25
	Conclusion	28
	Bibliographie	30
	Annexe	I
.1	Carte des bassins versants du Burkina Faso	I
.2	Carte des tendances de la pluie au niveau national	II
.3	Situations des emblavures	III
.4	Corrélation entre NDVI - Pluie	IV

Résumé

Le Burkina Faso, à l'instar des autres pays du Sahel, est confronté aux problématiques environnementales liées en partie aux facteurs climatiques et anthropiques. En effet, la forte variabilité climatique observée dans cette zone géographique depuis des décennies combinée à la croissance démographique et les migrations internes engendrent une forme de pressions sur l'environnement entraînant des modifications au fil du temps. Ainsi, pour une meilleure compréhension et réponse aux différents changements environnementaux, un suivi spatio-temporel de la dynamique environnementale est indispensable. C'est dans ce cadre que s'inscrit cette étude. L'objectif global est de contribuer à une meilleure caractérisation de la variabilité environnementale à l'échelle départementale du Burkina Faso au cours des deux dernières décennies (1999-2020) à partir des indicateurs environnementaux dérivés de l'imagerie satellitaire, à savoir le NDVI, en vue d'identifier « les zones potentiellement vulnérables ». Pour ce faire, les données de pluie CHIRPS (Estimations des précipitations à partir des pluviomètres et des observations satellitaires - résolution d'environ 4-5 km) et celles du Système pour l'Observation de la Terre (SPOT – végétation - résolution spatiale de 1 km) couvrant l'ensemble des départements sur la période 1999-2020 ont été acquises, prétraitées et analysées sous la forme de séries temporelles. L'approche d'extraction des données à l'échelle des départements utilisée est celle du plus proche voisin (PPV) pour les données de pluie et de la moyenne globale du des valeurs du NDVI excluant les classes d'occupation de sol. L'approche d'analyse appliquée est celle d'une approche statistique basée sur l'analyse des tendances dans les séries. L'indice de l'utilisation efficiente de l'eau (RUE) et la corrélation de Pearson ont été utilisés pour analyser les relations entre la pluie et la végétation dans les différentes zones. Il ressort des résultats que la dynamique pluviométrique et environnementale au niveau du Burkina Faso a été caractérisée par une forte variabilité avec différentes tendances. En ce qui concerne les pluies, 95% des localités ont connu une tendance progressive des pluies avec 45% de cas significatifs. Du côté de la végétation, il a été observé un changement régressif du couvert végétal dans 63% des départements dont 14%, soit 51 départements, qui ont présenté une tendance significative au seuil de 5% du test de Mann-Kendall. Ces changements observés sont en partie due à la pression anthropique liée à des fins agricoles. En effet, l'analyse des relations pluie-NDVI a montré des corrélations négatives (plus de 50% des départements); de même qu'une tendance à la baisse du ratio RUE. A l'opposé les données des statistiques agricoles dans ces zones ont montré une augmentation des superficies agricoles emblavées au cours de la période 2010-2020 pouvant atteindre 50% d'augmentation comme dans les provinces de la Tapoa, du Gourma, des Banwa etc. Ces résultats permettent de comprendre les changements dans la dynamique environnementale au Burkina Faso de ces dernières décennies. Elles peuvent servir de base pour une étude plus approfondie en vue de la planification d'une réponse et d'une gestion plus rationnelle à ce risque environnemental à savoir la dégradation du couvert végétal.

Mots-clés : Burkina Faso, NDVI, SPOT et CHIRPS, Tendance , Environnement

Abstract

Burkina Faso, like the other countries of the Sahel, faces environmental issues partly linked to climatic and anthropogenic factors. Indeed, the strong climatic variability observed in this geographic area for decades combined with population growth and internal migrations generate a form of pressure on the environment leading to changes over time. Thus, for a better understanding and response to the various changes environmental factors, spatio-temporal monitoring of environmental dynamics is essential. This study falls within this framework. The overall objective is to contribute to a better characterization of environmental variability at the departmental scale in Burkina Faso over the past two decades (1999-2020) from environmental indicators derived from satellite imagery, namely the NDVI, with a view to identifying “potentially vulnerable areas”. To do this, CHIRPS rain data (precipitation estimates from rain gauges and satellite observations - resolution of about 4-5 km) and those of the Earth Observation System (SPOT - vegetation - spatial resolution of 1 km) covering all the departments over the period 1999-2020 were acquired, pre-processed and analyzed in the form of time series. The data extraction approach used at the level of the departments is that of the nearest neighbor (PPV) for the rain data and of the global average excluding land cover classes for the NDVI data. The analytical approach applied is that of a statistical approach based on the analysis of trends in the series. The water use efficiency (RUE) index and the Pearson correlation were used to analyze the relationships between rainfall and vegetation in the different zones. The results show that the rainfall and environmental dynamics in Burkina Faso were characterized by high variability with different trends. With regard to the rains, 95% of the localities experienced a progressive trend of rains with 45% of significant cases. On the vegetation side, a regressive change in plant cover was observed in 63% of the departments, including 14%, or 51 departments, which showed a significant trend at the 5% threshold of the Mann-Kendall test. These observed changes are partly due to anthropogenic pressure related to agricultural purposes. Indeed, the analysis of rainfall-NDVI relationships showed negative correlations (more than 50% of departments); as well as a downward trend in the RUE ratio. In contrast, agricultural statistics data in these areas showed an increase in sown agricultural areas during the 2010-2020 period of up to 50%, as in the provinces of Tapoa, Gourma, Banwa, etc. These results make it possible to understand the changes in the environmental dynamics in Burkina Faso of the latter. They can serve as a basis for a more in-depth study with a view to planning a more rational response and management to this environmental risk, namely the degradation of the vegetation cover.

Key words : Burkina Faso, NDVI, SPOT et CHIRPS, Trend , Environment

1 Introduction

1.1 Contexte et justification

Le changement climatique est considéré de nos jours comme l'un des défis majeurs de l'humanité. Il constitue une préoccupation majeure du continent africain et plus particulièrement pour les pays sahéliens (CILSS, 2016)¹. En effet, il engendre actuellement des impacts sur l'environnement et l'activité socio-économique. Le Sahel, où la variabilité climatique observée au cours de ces dernières décennies est considérée comme l'une des plus importantes au monde, apparaît comme une région où les populations et les écosystèmes sont les plus vulnérables aux aléas climatiques (Lebel & Ali, 2009; Katie & Emilly, 2015; USAID, 2017). Les perturbations climatiques qui se traduisent par des sécheresses ou des inondations dégradent les ressources naturelles, indispensables aux moyens d'existence agropastoraux qui sont à la base de l'économie de plus de 80% des populations de la région (NDjafa, 2010).

Le Burkina Faso, à l'instar des autres pays du Sahel, est soumis aux mêmes contraintes climatiques, sociales, économiques et environnementales. En effet, la population est estimée à plus de 20 millions avec un taux d'accroissement annuel de plus de 3%. En plus, près de 75% de cette population est rurale, vit de l'agriculture, de l'élevage et de l'exploitation des productions forestières comme principale source économique et de revenu (INSD, 2020, 2021).² Le secteur agricole, à lui seul, emploie près de 92% de la population rurale active pour une contribution au Produit Intérieur Brut (PIB) estimée à environ 30 % (FAO, 2015; MEF, 2021). Ainsi, le secteur rural demeure stratégique pour le pays.

Malheureusement, la forte variabilité climatique observée au Burkina Faso, comme au Sahel, entraîne des impacts négatifs pour les populations, les ressources en eau, les rendements et la sécurité alimentaire, l'écosystème et contribue à une dégradation environnementale (NDjafa, 2010; OMM, 2021; IPCC, 2022). En outre, elle a un impact sur la modulation spatio-temporelle des profils de certaines variables agroclimatiques des saisons telles que les dates de début et de fin de saison, les longueurs des saisons, et les cumuls saisonniers etc. (Sultan *et al.*, 2013; Agali *et al.*, 2013; MERH, 2015). Enfin, elle influence l'activité photosynthétique et la dynamique du couvert végétal en sus de l'accroissement très fort des populations, accompagné des pressions importantes sur l'environnement entraînant des modifications parfois très importantes de l'environnement (défrichement, déforestation, feux etc).

Cette problématique de la dynamique environnementale en lien avec les facteurs climatiques et anthropiques a fait l'objet de plusieurs études pour la zone du Sahel. En effet, plusieurs auteurs dans la littérature ont mis en évidence le lien entre la dynamique végétale et la variabilité climatique, notamment pluviométrique (Eklundh & Olsson, 2003; Herrmann *et al.*, 2005; Hountoundji, 2008; Rasmus & Rasmussen, 2011; Zamble & Brou, 2013; Agbanou *et al.*, 2018; Gansaonre *et al.*, 2020

1. Comité Permanent Inter-Etats de lutte contre la sécheresse au Sahel

2. Institut National de la statistique et de la démographie

etc.). Dès lors, un suivi spatio-temporel régulier de la dynamique végétale est indispensable afin de s'assurer de son évolution surtout dans le contexte actuel du changement climatique et de forte pression anthropique. C'est dans ce cadre que depuis les années 1990s, avec l'avènement de la télédétection satellitaire, les suivis à grande échelle sont effectués grâce aux indices de végétation (Dardel *et al.*, 2015). A ce sujet, la littérature abonde sur le Sahel avec diverses approches.

Dans le contexte particulier du Burkina Faso, plusieurs auteurs se sont intéressés à la problématique de la dynamique environnementale en utilisant des données satellitaires pour détecter les différents changements (Soulaman *et al.* (2015); Tankoano *et al.* (2016); Zougrana (2016) etc.). Les approches utilisées par la plupart de ces auteurs sont basées sur une analyse diachronique à travers l'analyse des images.; Très peu ont utilisé les paramètres environnementaux dérivés des données satellitaires tels que l'indice par différence normalisée de végétation (NDVI) (Hountondji *et al.* (2006); Hountondji (2008); Gansaonre *et al.* (2020) etc.). En outre, ceux qui ont abordé la question sur la base des indicateurs environnementaux ne l'ont pas fait sur l'intégralité du territoire et à une échelle plus fine comme celles des départements ou des communes; même si Hountondji *et al.* (2006) a analysé la dynamique à partir de cent vingt-huit (128) stations réparties sur le Burkina Faso mais sur la période 1982-1999. Enfin, certaines études n'ont pas concerné les différents changements observés au cours de ces dernières années. Or, le suivi régulier à une échelle plus fine et couvrant l'ensemble du pays est fondamental pour apprécier les changements locaux en lien avec la variation locale du climat. Face à cette situation, la question sur la caractérisation du territoire en termes de variabilité des paramètres environnementaux dérivés de l'imagerie satellitaire au Burkina Faso pour le suivi environnemental demeure posée. C'est pourquoi, dans le cadre de notre travail de fin d'études (TFE), nous nous intéressons à la problématique de la variabilité environnementale observée au cours de ces dernières décennies et basée sur les indices de végétations, principalement sur l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI), à travers le thème : «Caractérisation de la dynamique environnementale au Sahel dans le contexte du changement climatique à partir des indicateurs environnementaux dérivés de l'imagerie satellitaire basse résolution : cas du Burkina».

1.2 Objectifs, Questions et hypothèses de l'étude

Le présent travail pose la réflexion autour de la question centrale de recherche suivante : **quel est l'état des lieux de la caractérisation du territoire en termes de variabilité de la dynamique environnementale dans le contexte du changement climatique ?** .

A travers cette question, deux sous questions pourraient-être posées :

- ◆ *quelle est la dynamique environnementale actuelle au Burkina Faso ?*
- ◆ *Existe-t-il des zones à très fort changement négatif ("hots spots") au niveau du pays au plan environnemental ?*

- ◆ *Quel est lien entre la variabilité et le changement climatique et l'état de la dynamique environnementale dans le contexte actuel ?*

L'appréhension de cette question de recherche à travers les réponses est déclinée autour d'un objectif global et des objectifs spécifiques.

1.2.1 Objectif général (OG)

L'objectif global visé par cette étude est de **caractériser la dynamique de la tendance environnementale actuelle au niveau national à partir des données de NDVI**.

1.2.2 Objectifs spécifiques (OS)

D'un point de vue spécifique, il s'agit de :

- ◆ **OS1** : Analyser la dynamique environnementale et climatique actuelle.
- ◆ **OS2** : Evaluer les niveaux de changements dans les tendances environnementales au niveau local et d'identifier les différentes les zones à très forte variabilité ("hots spots").
- ◆ **OS3** : Analyser le lien entre la variabilité climatique (pluviométrique) et la dynamique environnementale dans les zones à forte tendance négative.

1.3 Hypothèses de l'étude

Pour ce faire, deux hypothèses vont guider nos recherches à savoir :

- ◆ **Hypothèse 1** : La dynamique environnementale et climatique est marquée par une forte variabilité interannuelle
- ◆ **Hypothèse 2** : La tendance de la dynamique environnementale est régressive avec des zones de forte variabilité observée au cours de ces dernières décennies
- ◆ **Hypothèse 3** : La variabilité climatique influence négativement la dynamique environnementale dans les zones de "hots spots".

1.4 Contribution de l'étude

La présente étude s'inscrit dans la dynamique de la contribution de l'utilisation des produits satellitaires pour le suivi agro-environnemental et l'aide à la prise de décision stratégique dans la gestion des risques agroclimatiques et environnementaux au Burkina Faso surtout en contexte de changement climatique. Dans ce cadre, les résultats pourraient entre autres servir d'information de base pour caractériser les zones "à risque" afin de définir des programmes de surveillance et de réponses adaptées pour la gestion des dites zones au Burkina Faso.

Le présent travail est structuré autour des points suivants : *i)Etat de l'art* qui fait le point sur la revue de littérature. Cette section aborde la problématique environnementale et climatique au Sahel en général, les indicateurs environnementaux et les questions de la télédétection et du suivi agro-environnemental ; *ii) Matériel et méthodes* : cette section traite des outils utilisés dans le cadre de ce travail, des données et surtout présente l'approche méthodologique pour l'analyse des données ; *iii) Résultats et discussions* : c'est la dernière section du travail. Elle présente les différents résultats obtenus, analyse et discute lesdits résultats en rapport avec la littérature.

2 État de l'art

2.1 Contexte agro-climatique et environnemental

Le Sahel est une mosaïque de zones éco-climatiques contrastées et d'écosystèmes soumise à une forte variabilité climatique. Le contexte agro-climatique est marqué par une alternance entre des périodes humides et des périodes sèches depuis les années 50s. En effet, selon Botoni & Reij (2009), l'analyse de la pluviométrie au Sahel montre un déficit pluviométrique chronique sur une période quasiment continue de plus de 25 ans qui a touché l'ensemble les pays du Sahel, mais tout particulièrement la partie Ouest du Sahel se traduisent par une baisse des totaux pluviométriques annuels (environ -200mm) et une réduction du nombre de jours de pluie.

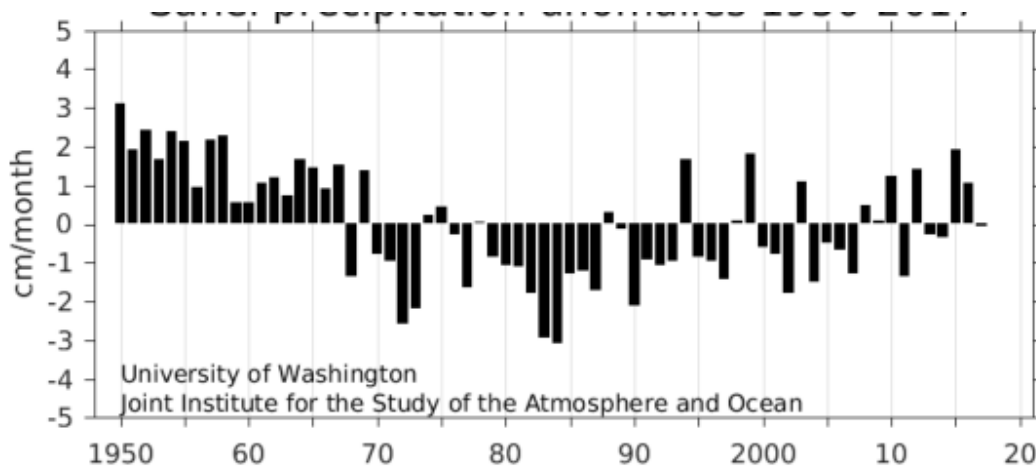


FIGURE 1 Evolution de l'indice de précipitation au Sahel

Source : <http://research.jisao.washington.edu/data/sahel/>

En ce qui concerne les caractéristiques agroclimatiques au Sahel, les différentes études sur les tendances indiquent que les dates d'installation des saisons sont de plus en plus tardives (Agali *et al.*, 2013; CRA/CILSS, 2015) avec des saisons courtes. Le contexte climatique au Burkina Faso est quasi-identique à celui du Sahel. Il est prévu une hausse ds températures globalement avec très peu de changement dans la quantité totale de précipitations annuelles (Gornott *et al.*, 2015). Cette situation climatique observée aussi bien au Sahel qu'au Burkina Faso contribue à accentuer la dégradation des conditions environnementales.

2.2 Indicateurs environnementaux et agro-climatiques

Les profils des saisons sont caractérisés par des paramètres ou métriques fondamentaux appelés indicateurs agroclimatiques. Ils sont dérivés des données climatiques mais aussi des données de la végétation issues de la télédétection. Ils jouent un grand rôle dans la dynamique agro-environnementale. On distingue les variables environnementales et les variables agro-climatiques

2.2.1 Variables environnementales

Il existe plusieurs indicateurs environnementaux utilisés dans le suivi agro-environnemental. Parmi ceux-ci, les plus utilisés sont entre autres le NDVI, le LAI, la Fcover et EVI etc. Dans cette section, nous passons en revue ces différents indicateurs.

◆ Indice de végétation par différence normalisé (NDVI)

Le NDVI est l'une des variables climatiques essentielles (VCE) qui permet d'apprécier l'état de la végétation. C'est l'un des indices les plus utilisés pour le suivi spatial et temporel de la végétation et la production à cause de la facilité de sa mise en œuvre et surtout de sa corrélation avec la densité du couvert végétal. Développé dans les années 70s, il est le résultat d'une transformation normalisée de la différence entre la réflectance maximale et minimale de la végétation (Didan *et al.*, 2019). Il est exprimé de la façon suivante :

$$NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R} \quad (1)$$

avec PIR pour proche infrarouge et R pour rouge. Les valeurs du NDVI varient entre -1 et 1 ; avec des valeurs négatives qui correspondent à des surfaces autres que la végétation, tandis que les valeurs proches de 1 traduisent un bon état de la végétation. Le sol nu est caractérisé par des valeurs nulles du NDVI. Dans le cadre des études environnemental au Sahel, plusieurs auteurs ont déjà utilisé cet indice (Eklundh & Olsson, 2003 ; Hountoundji, 2008 ; Zamble & Brou, 2013 ; Rasmussen *et al.*, 2014 etc.).

◆ Fraction de couverture végétale (FCover)

La Fcover est une variable climatique essentielle qui mesure la couverture du sol par la végétation verte. Elle est largement utilisée dans la recherche connexe sur le changement climatique, le sol et l'hydrologie (Zhang *et al.*, 2019) et permet d'apprécier la couverture spatiale du sol. Selon Filipponi *et al.* (2018), la FCover se présente comme un bon paramètre dans le suivi des écosystèmes pour comprendre les changements de la couverture végétale, pour soutenir les évaluations des services écosystémiques sur des zones d'étendue variable et pour des processus s'étendant sur une période de temps variable (événements brusques ou processus à long terme).

◆ Indice de végétation amélioré (EVI)

Le EVI est un indice proche du NDVI développé par l'équipe scientifique MODIS. Il est utilisé pour le suivi de la végétation. Il se calcule de la façon suivante :

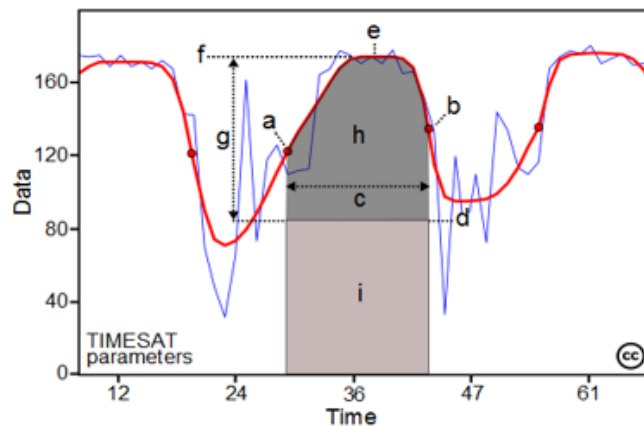
$$EVI = 2.5 \cdot \frac{PIR - R}{PIR + 2.4R + 1} \quad (2)$$

avec PIR pour proche infrarouge et R pour rouge. A la différence du NVID, EVI est plus sensible aux

différences dans les zones à forte végétation. Ainsi, il permet d'apprécier la dynamique de changement dans les zones moins denses d'un point de vue de la végétation. Plusieurs auteurs ont utilisé le EVI pour apprécier la dynamique de la végétation. Au vu de son importance, [Hu et al. \(2021\)](#) ont utilisé cet indice pour suivre la dynamique de changements de la végétation au Pendjab, au Pakistan.

2.2.2 Variables agroclimatiques

Dans la littérature, plusieurs auteurs ont traité des questions relatives aux variables agroclimatiques pour caractériser les profils des saisons ([Sivakumar, 1988](#) ; [Boubacar, 2012](#) ; [Agali et al., 2013](#) ; [Sultan et al., 2013](#) ; [Eklundh & Jönsson, 2017](#)). Diverses approches ont été développées pour définir les métriques agroclimatiques. Certaines sont basées sur les données d'observations météorologiques et d'autres sur les données satellitaires. L'approche classique de dérivation des indicateurs agroclimatiques est basée sur les données d'observation météorologique. Ces approches utilisent des critères de seuil de pluie tombée sur une période donnée à une station. Plusieurs auteurs ont utilisé cette approche pour définir les métriques agroclimatiques au Sahel ([Cocheme & Franquin, 1967](#) ; [Stern, Dennett & Garbutt, 1981](#) ; [Sivakumar, 1988](#) ; [Balme, Galle & Lebel, 2005](#)). Toutefois, ces méthodes présentent certaines limites portant sur un problème de résolution spatiale de donnée, de disponibilité de données de bonne qualité, denses spatialement (...) ([Balme et al., 2005](#)).



(a)- SOS (b)- EOS (c)- Durée de la saison (d)- Valeur de Base (en unité d'indice de végétation) (e)- Milieu de la saison (f)- Maximum de l'indice de végétation (g)- Amplitude de l'indice de végétation (h)- Petite intégrale (h et i)- Grande intégrale,

FIGURE 2 Différents métriques phénologiques

Source : [Eklundh and Jönsson \(2017\)](#)

La seconde approche de dérivation des indicateurs agroclimatiques basée sur la télédétection utilise les métriques phénologiques comme proxy pour dériver les différents indicateurs agroclimatiques. Elle est basée sur l'exploitation des séries temporelle de NDVI. [Eklundh & Jönsson \(2017\)](#) , à partir des séries temporelles de NDVI dérivées de l'imagerie satellitaire, présentent un certain nombre de métriques phénologiques qui décrivent les différents stades de développement de la végétation au cours de la saison (voir 2).

3 Matériel, Données et Méthodes

3.1 Zone d'étude

La présente étude porte sur le Burkina Faso. Au plan administratif, le pays est subdivisé en *treize (13) régions, quarante-cinq (45) provinces et trois cent cinquante et un (351) départements*. Sur le plan climatique, trois zones caractérisent le pays à savoir ((voir figure ~3 ; page~8)) : zone Sahélienne (300-600mm/an), Soudano-sahélienne (600-900mm/an) et Soudanienne (au-delà de 900mm/an). Le contexte climatique est caractérisé par un climat tropical sec avec un régime pluviométrique unimodal et marqué par une forte variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie (MERH, 2015 ; USAID, 2017).

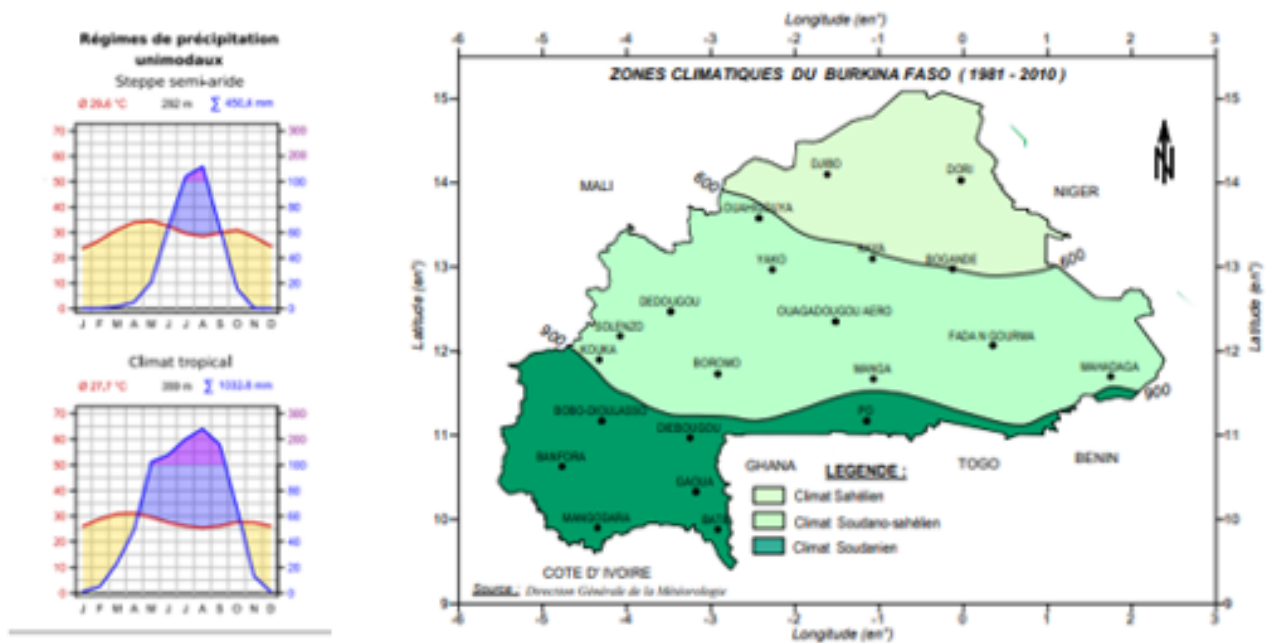


FIGURE 3 Zones agroclimatiques au Burkina Faso

Le réseau hydrographique du pays est dominé par trois (03) bassins versants internationaux (la Volta, le Niger, la Comoé), subdivisés en quatre (4) bassins nationaux à savoir le bassin du Niger (83.442 km²), le bassin du Mouhoun (91.036 km²), le bassin de la Comoé (17.590 km²) et le bassin du Nakanbé (81.932 km²) caractérisent. En ce qui concerne les sols, les différentes études pédologiques réalisées indiquent que le pays est dominé par huit (08) types de sol. Quant à la végétation, elle est dominée en partie de formations ligneuses et des herbacées avec une régression des superficies en moyenne de 243.450 ha/an suites aux facteurs climatiques anthropiques. Selon MECV (2004), les principales formations forestières naturelles au Burkina Faso sont la forêt claire, la forêt galerie, la savane arbustive, la savane arborée, et la steppe. La superficie occupée par ces formations naturelles est estimée à plus de 13.305.238 hectares, soit 48,75 % du territoire national. Les travaux sur la classification phytos-géographiques faites par divers auteurs et repris par CILSS (1996), classent la végétation au Burkina Faso en trois

domaines bien distincts : i) le **domaine Sahélien** au nord ; ii) Le **domaine Soudanien** au centre et iii) le **domaine Soudano-guinéen** au Sud. En fin, En ce qui concerne l'occupation du sol, la cartographie établie par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) montre que le pays est caractérisé par sept grandes classes d'occupations du sol (voir carte) avec une forte dominance des zones agricoles et des zones de pâturage.

3.2 Données

Les différents jeux de données utilisés dans le cadre de ce travail sont essentiellement des données satellitaires portant à la fois sur les indicateurs environnementaux dérivés de la végétation et les données climatiques.

3.2.1 Données sur les indices de végétation (NDVI)

Les données environnementales de végétation dérivées de l'imagerie satellitaire basse résolution ont été utilisées dans le cadre de ce travail à savoir principalement *l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI)*. Elles proviennent des capteurs *SPOT*, *PROBA-V* du *Système pour l'Observation de la Terre (SPOT)* et extraites via la plateforme du *Service Copernicus Global Land (CGLS)* sur le site web suivant : <https://land.copernicus.eu/global/>. Il s'agit des données couvrant la période de notre étude de Vingt et un (21) ans (1999-2020) et disposant d'une résolution spatiale de 1km²; et une résolution radiométrique de 8bits avec un pas de temps décadaire (S10). Les données décadaires sont obtenues par l'approche de synthèse sur la décade au niveau de chaque pixel et l'extraction de la *valeur maximale observée dans la période (MVC pour Maximun Value Compositing)* au niveau du pixel. Au total 756 images portant sur le NDVI (3x12x21 - pour la période) ont été téléchargées. Elles ont permis de caractériser la dynamique environnementale à l'échelle locale (département) au Burkina Faso dans le contexte du changement climatique. Le choix de ces données se justifie par leur qualité, leur disponibilité sur l'horizon temporelle concernant l'étude, leur résolution spatiale (1km²) acceptable dans le cas de ce travail, et leur cohérence sur la période. Par ailleurs, le choix de l'indicateur NDVI se justifie principalement par sa pertinence et sa "capacité" à servir de base pour évaluer la dynamique végétale surtout dans les zones où les pluviométries sont en dessous de 1000 mm par an. Il a été déjà utilisé par plusieurs auteurs dans les conditions du Sahel pour analyser les dynamiques et les tendances de changement au niveau environnemental (Hountondji *et al.*, 2006 ; Mahe *et al.*, 2012 ; Diouf *et al.*, 2015 ; Gansaonre *et al.*, 2020 ; Solly *et al.*, 2021 etc.).

3.2.2 Données climatiques

Les données pluviométriques utilisées sont essentiellement des données des estimations utilisant les données réelles et les données satellitaires au regard des lacunes et des données manquantes au niveau des données d'observations et surtout à cause du niveau de l'échelle spatiale de notre étude. Il s'agit

des données *CHIRPS* (*Estimations des précipitations à partir des pluviomètres et des observations satellitaires*) accessible via ce site web : <https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>. Les données *CHIRPS* sont des données de **précipitations maillées à haute résolution spatiale (0,05° - soit 5.5 km)** obtenues par combinaison des données satellitaires et des données d'observation in situ. Elles couvrent la période allant de 1981 à nos jours et sont définies à l'échelle du globe avec un pas de temps variable (journalier, pentadaire, décadaire, mensuel et annuel). Ces données sont accessibles sous trois formats à savoir les formats .netcdf, .tif et .bil. Les données *CHIRPS* sont largement utilisées à des fins opérationnelles dans cadre de la surveillance environnementale et dans l'alerte précoce par plusieurs structures telles que le FESWNET mais aussi dans la recherche par des scientifiques. Dans le présent travail, la plage allant de 1991 à 2020 des données a été extraite au niveau des localités du Burkina Faso. Le choix de ces données se justifie par la qualité des données mais aussi par la résolution spatiale et temporelle acceptable, surtout que les analyses sont réalisées à l'échelle départementale, comparativement à d'autres données satellitaires ou de réanalyses qui ont des résolutions plus grossières.

3.3 Outils d'analyse

3.3.1 R et Rstudio

Le logiciel R est l'un des logiciels utilisés pour l'analyse et le traitement des données. Il s'agit à la fois d'un outil d'analyse statistique et d'un langage de programmation. Il fonctionne sur plusieurs environnements tels que Windows, Linux etc. Il a permis de faire le traitement et l'analyse des données climatiques, d'extraire la valeur des indices de végétation, de calculer les différents paramètres agro-climatiques et de produire les différents graphiques.

3.3.2 Outil SPIRITS

SPIRITS est un logiciel de traitement automatisé des séries d'images à différents pas de temps. Il a été développé par VITO pour le compte de de MARS/JRC. Il est largement utilisé de nos jours dans le cadre du suivi agro-environnemental. Il a été utilisé pour les pré-traitements et traitements des séries d'images satellitaires. Par ailleurs, il a servi à dériver les différents indicateurs agro-climatiques en lien avec les indicateurs environnementaux.

3.3.3 Logiciel SIG (QGIS)

QGIS est un Système d'Information Géographique (SIG) convivial distribué sous licence publique générale GNU. Il est dédié aux traitements des données sous la forme d'information géographique. Il fonctionne sous divers environnements. La version QGIS 3.18 a été utilisée pour le traitement cartographique et la mise en page des résultats.

3.4 Méthodologie et analyse

L'approche utilisée pour traiter et analyser les données suit l'algorithme développé au niveau de la figure ~4; page~11. Il comprend une phase de pré-traitement des données et une phase de traitement ou d'analyse des données.

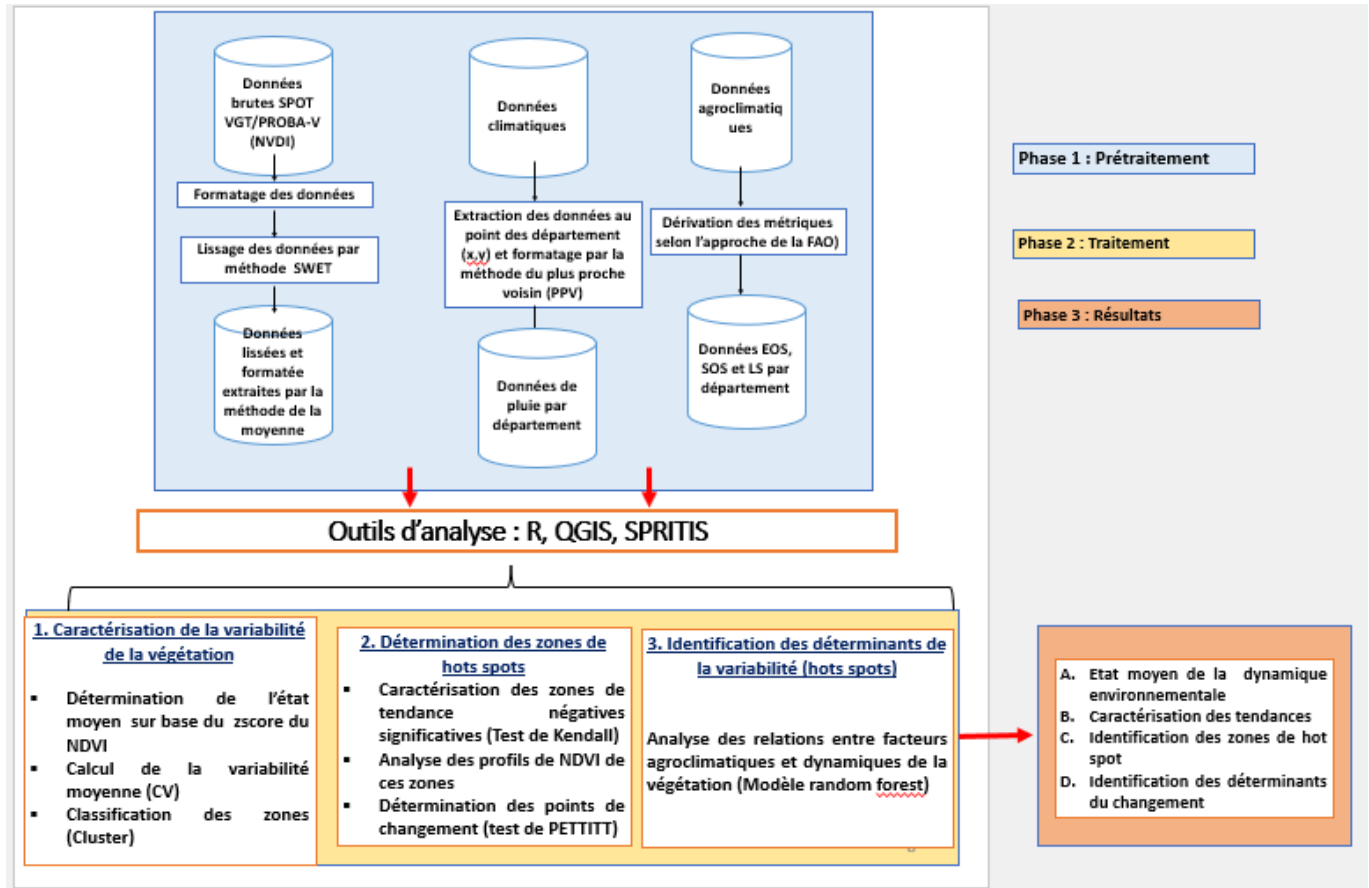


FIGURE 4 Algorithme des grandes opérations de la méthodologie

3.4.1 Pré-traitement des données

Deux opérations majeures ont caractérisé la phase de pré-traitement après acquisition : *le formatage et le lissage des données selon les types des données*.

◆ Formatage des données

Le formatage a consisté à organiser les fichiers (renommer et organiser les formats) afin qu'ils soient compatibles avec les outils de traitement des données. Ce fût le cas des données de végétation (NDVI) qui ont été utilisées sous le logiciel SPIRITS.

◆ Lissage des données

L'opération de lissage a concerné principalement les données des indices de végétation. En effet, les

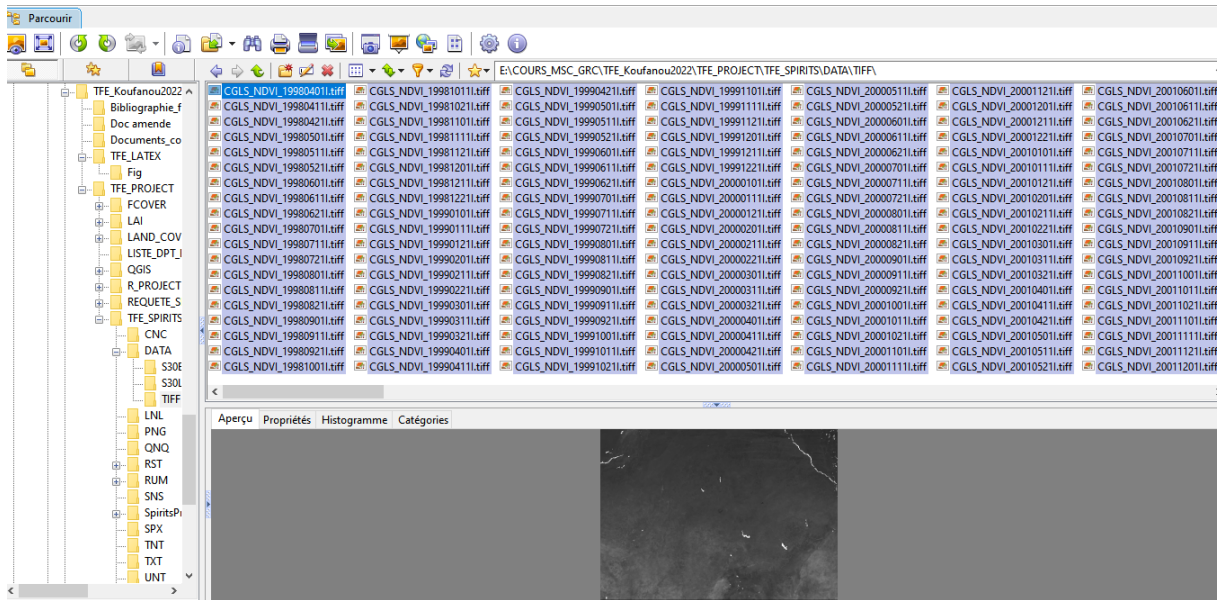


FIGURE 5 Exemple de formatage des données sous xview

données provenant des satellites sont généralement très bruyantes et affectées par un certain nombre de phénomènes, notamment la contamination par les nuages, les perturbations atmosphériques et l'éclairage variable etc. En somme, les conditions atmosphériques affectent la qualité visuelle des données. Ainsi, un travail de lissage est indispensable pour améliorer la qualité des dites données. Plusieurs méthodes de lissage existent dans la littérature et sont implémentées sous le logiciel SPIRITS. Cependant, celle utilisée dans le présent travail est *l'approche de régression linéaire pondérée des moindres carrés*. Il s'agit d'une méthode qui utilise *une fenêtre mobile fonctionnant sur le IV temporel pour calculer une droite de régression*. La fenêtre est déplacée d'une période à la fois, ce qui donne une famille de droites de régression associées à chaque point ; cette famille de lignes est ensuite moyennée en chaque point et interpolée entre les points pour fournir un signal NDVI temporel continu. Cette méthode sous SPIRITS est connue sous le nom SWETS. C'est l'une des méthodes largement utilisées pour le lissage des données au vu des résultats satisfaisants. Dans le cadre de ce travail, le lissage a permis de réduire les effets atmosphériques et partant d'améliorer la qualité des images donc des données.

3.4.2 Extraction des données (indices de végétation et données climatiques)

Après le formatage et le lissage des données des IV, une extraction des valeurs du NDVI a été faite à l'échelle départementale, soit 351 départements. La méthode d'extraction des valeurs de NDVI utilisée est celle dite *des moyennes ("Overall Mean")*. Cette méthode considère une absence d'unités d'occupations spécifiques du sol. De ce fait, *une moyenne de la végétation est faite pour chaque zone*. Après extraction, une série chronologique des données du NDVI a été constituée pour chaque localité.

En ce qui concerne les données climatiques, elles ont été extraites suivant *la méthode du plus proche voisin (PPV)*. C'est une méthode qui consiste à calculer la distance euclidienne entre les différents

centroïde des données maillées et la coordonnée centrale du point à savoir le département pour déterminer le point de le plus proche. Partant de cette approche, les données ont été extraites et des séries temporelles de pluie ont été constituées pour les différentes localités.

3.4.3 Variabilité climatique et environnementale

◆ Variabilité environnementale moyenne interannuelle et intra-annuelle

Dans le but de caractériser la variabilité moyenne de la végétation, une analyse moyenne interannuelle et mensuelle des données du NDVI a été réalisée au niveau de chaque département. L'approche a consisté synthétiser les valeurs moyennes mensuelles (12 valeurs moyennes : Janvier à Décembre) et annuelles (21 valeurs dérivées annuellement de la saison humide au Burkina Faso : Mai à Octobre) issues de la série des données. Par la suite, un calcul statistique basé sur le coefficient de variation (CV) a été réalisé via la formule au niveau de l'équation (3) à chaque échelle de temps définie. Cette approche a déjà été utilisée par certains auteurs dans la littérature (Chamaille, Fritz & Murindagomo, 2006; Mahe *et al.*, 2012) dans le cadre de l'analyse de la variabilité de la végétation.

$$CV_i = \frac{s_i}{\bar{x}_i} * 100 \quad (3)$$

où CV_i est la valeur moyenne du CV au niveau du département; \bar{x}_i et s_i sont respectivement la moyenne et l'écart-type au niveau de chaque localité. Le CV est un paramètre de variation relative. Plus la valeur est grande, plus la variation autour de la moyenne est importante et inversement.

En outre, pour chaque année, les valeurs de NDVI maximum (NDVI_x) ont été extraite sur la période 1999-2020 en vue de former une série temporelle. Par la suite, la dynamique de ces valeurs autour des valeurs moyennes a été présentée sous forme de graphique en vue d'apprécier les fluctuations suivant les zones agroclimatiques.

◆ Variabilité et tendances climatiques

L'analyse de la variabilité climatique a été faite par zone agroclimatique en calculant les indices standardisés de Précipitation (IPS).

$$SPI_i = \frac{x - \bar{x}}{s} \quad (4)$$

avec SPI_i est la valeur du score standard dans la zone agroclimatique; \bar{x} et s , respectivement la moyenne et l'écart-type dans la zone. Une valeur négative du SPI traduit un déficit pluviométrique (année sèche) et inversement pour les valeurs positives. En outre, une analyse des tendances a été faite afin d'apprécier les tendances évolutives de la pluviométrie dans les localités.

En sus, en vue de déterminer la présence ou non d'une rupture dans les séries temporelles de pluie, le test statistique de Pettitt au seuil de significativité de 5% a été utilisé et appliqué au niveau de chaque département.

3.4.4 Caractérisation des tendances et identification des zones de forte variabilité (zones de "hots spots")

La caractérisation zones a été faite sur la base de l'analyse des tendances dans les éries temporelles de NDVI.

♦ Analyse des tendances

L'analyse de tendance dans les séries chronologiques des données de végétation a été faite au niveau de chaque localité au moyen **du test statistique de Mann-Kendall**. En effet, il s'agit d'un *test statistique non paramétrique* largement utilisé pour la détection des tendances de données environnementales. Il permet d'évaluer si **la tendance est régressive ou progressive** dans le temps à travers une forme d'analyse des tendances de régression monotone. La détermination du coefficient de corrélation (S) de Mann-Kendall et du tau de tendance de Mann-Kendall (T) sur base de ces équations figure ~5; page~14

$$S = \sum_{i=1}^{x-n} \sum_{j=1+1}^x \text{sgn}[(y_j - y_i)(x_j - x_i)] \quad (5)$$

$$T = \frac{2S}{n - (n - 1)} \quad (6)$$

Où *sgn* est définie par : $\text{sgn}(X) = 1$ pour $X > 0$; $\text{sgn}(X) = 0$ pour $X = 0$ et $\text{sgn}(X) = -1$ pour $X < 0$; T est le tau; s est le coefficient de corrélation de Mann-Kendall et n la longueur de la série de données étudiées

Pour cette étude, le test a été appliqué à la série de données moyenne annuelle de NDVI relative à notre période d'étude (1999-2020). Pour cela, les valeurs de NDVI de la période humide, à savoir celle allant de Juin à Octobre, ont été extraites chaque année et moyennées. Le test a été réalisé sous l'hypothèse nulle H_0 selon laquelle : "il n'y a pas de tendance". Les trois hypothèses alternatives de tendance sont les suivantes : négative, non nulle ou positive.

La détermination de la significativité de la valeur du tau de Mann-Kendall a été faite au **seuil de 5%**. La statistique du test est considérée comme étant significative lorsqu'elle est inférieure ou égale au seuil de 5%. Le sens de la pente permet d'apprécier la hausse ou la baisse. Ainsi, les classes suivantes ont été définies sur la base de la tendance et du seuil de significativité pour apprécier la dynamique environnementale.

TABLEAU 1 Définition des classes selon les tendances

Classe de la tendance	Tendance)	pvalue (p)
Tendance négative significative	Négative (Tau<0)	P<=0.05
Tendance positive significative	Positive (Tau >= 0)	P<=0.05
Tendance non significative	Positive ou négative	p>0.05

◆ Identification des zones de forte dégradation

Sur la base des tendances et de la significativité du test de Mann-Kendall, les zones de forte variabilité ou hots spots ont été identifiées comme étant **toutes les zones qui ont connu à la fois une tendance négative et significative au cours de la période d’analyse (1999-2020)**

3.4.5 Lien entre climat et indices de végétation

Plusieurs méthodes existent pour évaluer les liens entre les facteurs climatiques (précipitation) et la dynamique du couvert végétal parmi lesquelles celle de *l’indice de l’utilisation efficiente de l’eau (RUE)*. Selon [Dardel et al. \(2014\)](#), le RUE est défini comme le rapport entre la production nette de biomasse et la pluviométrie tel que présenté à l’équation ~7 ; page~15. Il permet d’apprécier et de distinguer la part de la contribution du climat (la pluie) dans la dynamique végétale des autres facteurs potentiels. C’est un indice largement utilisé dans la littérature au cours de ces dernières années pour évaluer l’impact du climat sur le couvert végétal.

$$RUE_i = \frac{ndvi_x}{RR} \quad (7)$$

RUE_i exprime la valeur de l’efficience d’utilisation de l’eau ; $ndvi_x$ et RR représentent respectivement les valeurs mensuelles maximales de NDVI durant la phase de croissance (Juin à Octobre) et le cumul pluviométrique sur la saison (Mai à Octobre) de la même année. **Plus la valeur est faible, plus elle traduit une dégradation du couvert et inversement.** Dans notre cas d’étude, la période mensuelle considérée est celle allant de Juin à octobre en tenant compte du temps de réponse de la végétation à la pluviométrie. Cette approche a été appliquée principalement dans les zones identifiées comme “hots spots” à partir de l’analyse des tendances afin de : i) confirmer ou infirmer la tendance régressive du couvert végétal dans ces zones ; ii) en déduire si l’état du couvert végétal est influencée par la pluie. Pour cela, une régression linéaire simple entre les valeurs RUE et le temps (années) a été réalisée dans chaque zone ls tendances sont régressives (celles identifiées suivant l’approche de tendance). La tendance de cette régression est évaluée sur la base la valeur de la pente et de sa significativité au test t de Student au seuil de 1 et 5%.

Par ailleurs, l’approche basée sur la corrélation entre le NDVI_x et la pluviométrie cumulée sur les trois mois antérieurs à la date d’observation de la dite valeur (NDVI_x) a aussi été appliquée en vue

d'apprécier les liens entre les deux variables. Pour cela, le coefficient de corrélation de Pearson a été calculé suivant la formule suivante :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (8)$$

avec r , coefficient de corrélation ; X et Y , les différentes variables (pluviométrie et NDVI). La valeur de r varie entre -1 et 1. Plus la valeur de r s'éloigne de 0, plus la relation est forte et inversement. Le signe exprime le sens des relations. Ainsi, une corrélation positive forte traduit une influence positive de la pluviométrie sur la végétation (NDVI). [Rasmus & Rasmussen \(2011\)](#), dans son article nommé "*Analysis of trends in the Sahelian 'rain-use efficiency' using GIMMS NDVI, RFE and GPCP rainfall data*" ont utilisé la même approche pour apprécier les liens la pluviométrie sur la végétation au niveau de la zone du Sahel. En rappel, l'approche qui a consisté à recherché le lien entre état de la végétation et pluviométrie a été faite uniquement dans les zones présentant une tendance régressive.

4 Résultats

4.1 Caractéristiques environnementales et climatiques

4.1.1 Variabilité interannuelle des pluies

Dans le but de caractériser l'état de la dynamique pluviométrique au niveau national sur la période de notre étude, les données pluviométriques au niveau de l'ensemble des départements du pays soit trois cent cinquante et un (351) ont été analysées sur la période 1991-2020 (dernière normale OMM). Globalement, il a été observé une forte variabilité interannuelle au niveau des différentes localités comme en témoigne l'état des données de quelques localités suivant le gradient Nord-Sud et représentant les différentes zones agroclimatiques (Sahélienne, Soudano-sahélienne et Soudanienne) du pays (voir figure ~6; page~17). Cette forte variabilité se traduit par une alternance entre les années sèches et les années humides avec une tendance dominante des années sèches au cours la période 2000 et 2010 au niveau du Sahel et dans la zone soudano-sahélienne. Les hauteurs annuelles de pluie moyenne observées dans les zones agroclimatiques se situent autour de : i) 486.6 mm au Sahel : ii) 798.6 mm en zone sahélo-soudanienne et plus de 1000 mm en zone soudanienne.

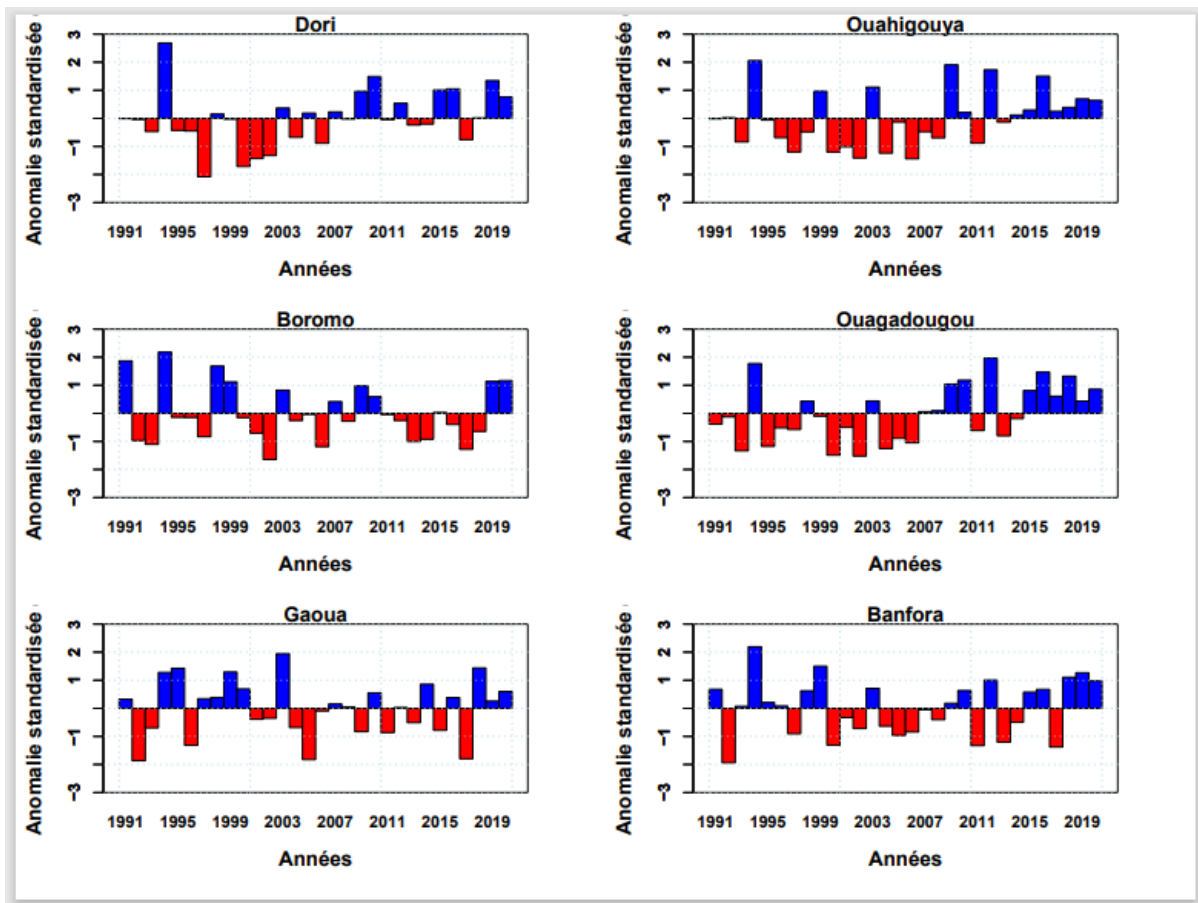


FIGURE 6 Variabilité pluviométrique interannuelle au niveau quelques stations suivant le gradient Nord-Sud (barre rouge : année sèche et barre bleue : année humide)

En outre, les pluviométries moyennes observées dans la plupart des localités présentent une tendance à la hausse. En effet, plus de 96% des départements, soit près de 337 départements sur 351 (voir figure ~15 en annexe). Le tableau 2 donne les tendances internes au niveau des caractéristiques observées dans le comportement de la pluviométrie. Il ressort de l'observation du tableau 2 qu'environ 37% présentent une tendance significative au seuil de 5% du test de tendance de Mann-Kendall sur l'ensemble des départements caractérisés par une tendance positive. A l'inverse, seules 3% des localités analysées ont présenté une tendance à la baisse des précipitations au cours de la période.

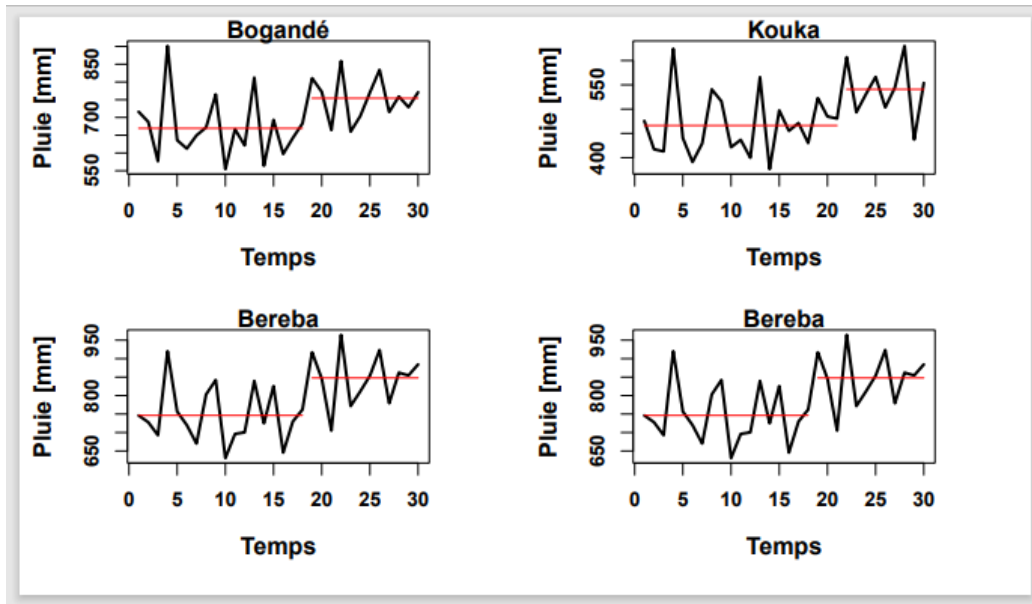


FIGURE 7 Rupture dans la dynamique pluviométrique au niveau de quelques localités sur la période 1990-2020)

Par ailleurs, les données étant non stationnaires, le test statistique de rupture de Pettitt a été appliqué à l'ensemble des départements en vue de déterminer les points de changement dans les séries des données. Les résultats indiquent que soixante-dix (70) départements, répartis dans sur l'ensemble du pays, au total ont observé au moins une rupture dans l'évolution de la pluviométrie. Cette rupture se situe pour la plupart entre 2007 et 2009. A titre illustratif, le département de Kouka dans les Banwa a connu un point de rupture en 2008 avec une moyenne pluviométrique avant rupture (1991-2007) et post-rupture (2009-2020) respectivement de 463.03 et 530.16 mm ; soit un écart de plus de 67 mm (voir figure ~12. Ces changements observés témoignent d'une modification dans la dynamique pluviométrique dans ces zones.

Enfin, l'analyse relative aux évènements pluvieux (nombre de jours de pluie par année) a montré que la plupart des départements, environ 90.02%, ont été caractérisés par une hausse des jours de pluie au cours de la période de l'étude même si c'est seulement au niveau de 5% des départements que cette tendance est significative. Cette forte variabilité pluviométrique observée au niveau du Burkina Faso avec une tendance globalement en hausse des précipitations est caractéristique de celle observée au

TABEAU 2 Répartition des tendances de la variabilité pluviométrique

Type de tendance	Nombre de localités	Taux [%]
Tendance positive	337	96.86
Tendance positive non significative	212	62.68
Tendance positive significative	125	37.32
Tendance négative	14	3.14
Tendance négative non significative	14	3.14
Tendance négative significative	0	0

Sahel depuis les années 1990s confirmant une certaine amélioration des conditions pluviométriques après la longue période de sécheresses entre 1970 et 1990. Cette variabilité climatique pourrait avoir un impact et un lien sur la variabilité de la végétation.

4.1.2 Variabilité de l'indice de végétation dans les différentes zones climatiques

La figure ~8 présente la variabilité interannuelle du NDVI maximum dans les différentes localités du Burkina Faso, caractérisant les différentes zones agroclimatiques. L'observation de cette figure montre que la dynamique de la végétation est caractérisée par une fluctuation interannuelle assez marquée des valeurs de NDVI maximum autour de la moyenne avec une tendance à la baisse dans les trois zones. La moyenne se situe autour de 0.4, 0.5 et 0.6 respectivement dans le Sahel, dans la zone sahélo-soudanienne et dans la zone soudanienne. Par ailleurs, d'un point de vue global, la dynamique interannuelle de la végétation suit celle climatique (pluviométrique principalement) observée dans les différentes zones agroclimatiques du pays. Toutefois, en termes de tendance, celles du climat et de la végétation évoluent en sens inverse. En effet, pendant qu'il est observé une tendance à la hausse des précipitations, celle de la végétation est en baisse. En outre, à l'échelle interannuelle, les différentes variations relatives autour des valeurs moyennes font ressortir une variation globalement modérée voire faible au niveau national. En effet, 97% des départements étudiés présentent un coefficient de variation (CV) se situant entre 4 et 10% à l'exception de quelques zones dans les provinces de l'Oudalan, au Sahel, dans la Comoe à l'Ouest et dans le Nounbiel au Sud-Ouest où les variations sont comprises entre 10% et 20% comme indiquées à la figure (~9; page~20).

Cette variation modérée voire faible observée dans les différentes localités traduit de façon pratique une faible dispersion des valeurs des indices de végétation autour de la moyenne dans chaque localité suivant l'évolution temporelle. Toutefois, si à l'échelle interannuelle, il est observé une forme de stabilité autour des valeurs moyennes, il n'en est pas le cas à l'échelle intra-annuelle. En effet, les données d'analyse indiquent que les variations intra-annuelles au niveau des départements oscillent entre 10 et 50% avec une forte concentration entre 30 et 40% (voir figure ~10; page~21). Du reste, de façon localisée dans la région de l'Est, précisément dans les provinces de la Tapoa et de la Kompienga, dans le Plateau- Central (Ganzourgou) et dans les provinces du Mouhoun et du Nahouri, les variations observées sont comprises

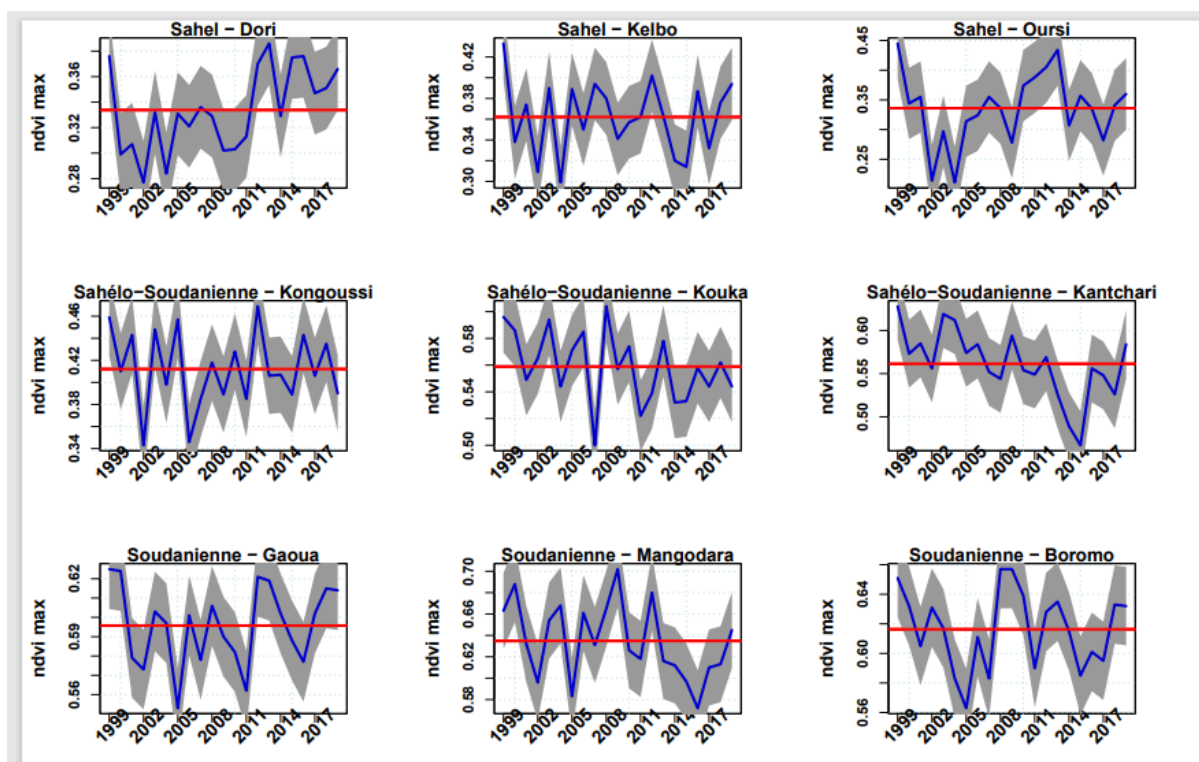


FIGURE 8 Variabilité du NDVI maximum suivant les zones agroclimatiques

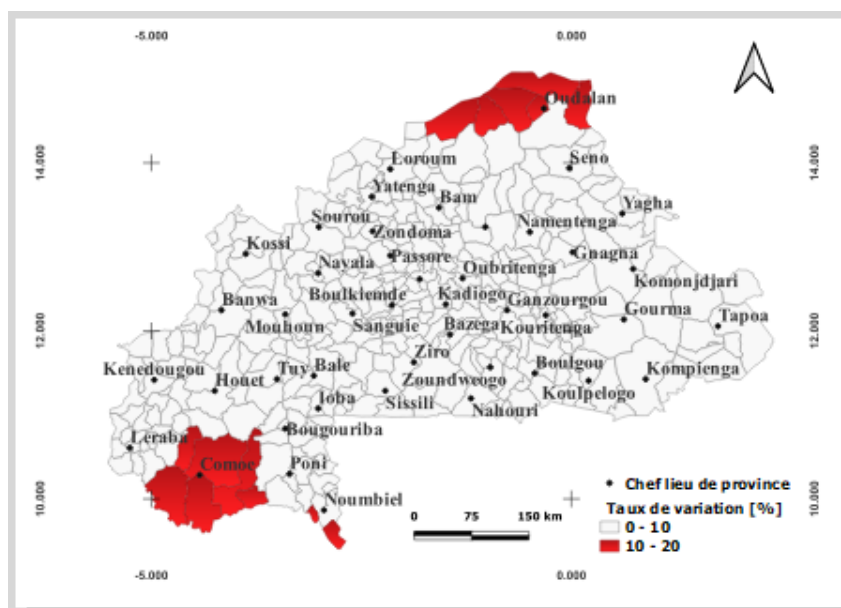


FIGURE 9 Variation moyenne annuelle du NDVI au Burkina Faso de 1999 à 2020

entre 40 et 50%.

4.2 Caractérisation des zones de changement ou de “hots spot”

La figure ~11 ;page~21 donne l'évolution des tendances du couvert végétal au cours de la période 1999-2020 au niveau des différents départements. L'analyse des données relative à la dynamique tendancielle

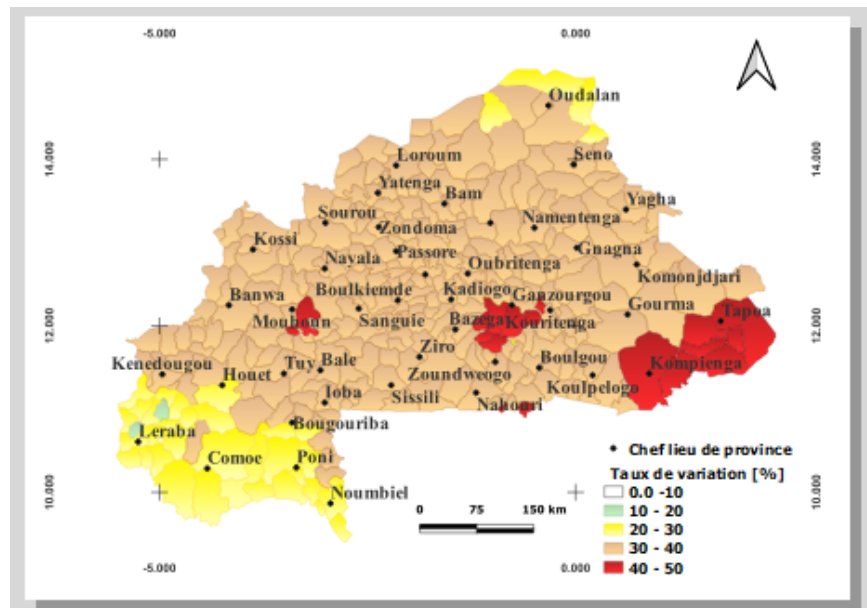


FIGURE 10 Variation moyenne intra-annuelle du NDVI au Burkina Faso de 1999 à 2020

du couvert végétal au Burkina Faso montre qu'il existe une forte variation spatiale mais globalement non significative.

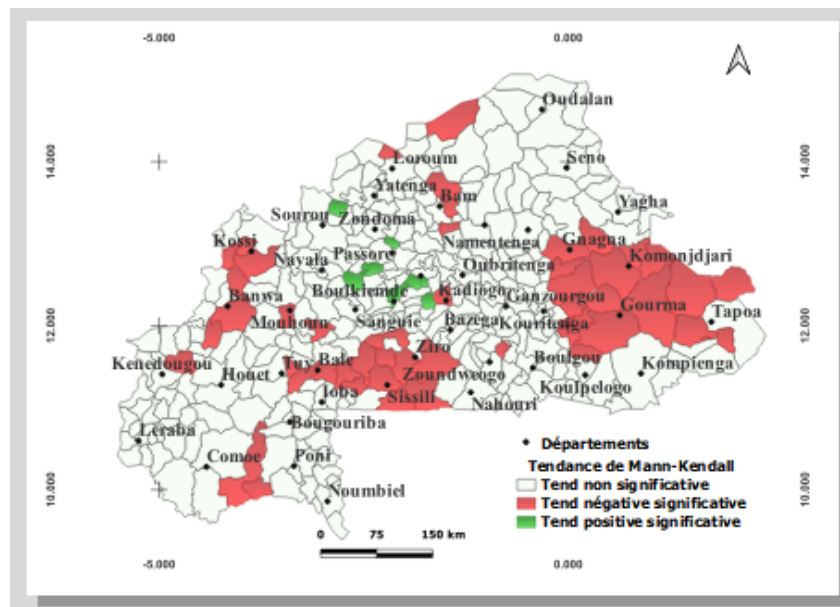


FIGURE 11 : Tendances du NDVI entre 1999 et 2020 au Burkina Faso [seuil de 5%]

En effet, la corrélation de Mann-Kendall sur la série des données NDVI de la période indique que les valeurs varient entre -0.7 et 0.6 avec des tendances à la fois négatives et positives suivant les zones telles que présentées sur la carte. De façon globale, il apparaît qu'environ 63.1% du territoire ont connu une dynamique régressive du couvert végétal au cours de ces deux dernières décennies ; contre 36.9% des départements où la dynamique est progressive.

Cependant, d'un point de vue spécifique, l'observation des résultats du tableau (1) permet de de définir

TABLEAU 3 Répartition des localités étudiées selon le test de tendances de Mann-Kendall

Type de tendance	Nombre de localités	Taux [%]
Tendance positive non significative	119	34.2
Tendance positive significative	9	2.7
Tendance négative non significative	169	48.4
Tendance négative significative	51	14.7

4 classes suivant les tendances et la valeur de signification au seuil de 5%. Il s'agit principalement : i) des zones où la tendance est positive mais non significative. Ces zones représentent environ 34% du territoire ; ii) des zones avec une tendance positive et significative dont la proportion vaut 2.7% : les zones où la tendance est négative mais non significative et celles négatives et significatives, qui occupent respectivement 48.4 et 14.7% du pays. En rappel, toutes les zones dont la pValue est inférieure ou égale à 5% sont considérées comme des zones significatives. Le signe de la pente détermine la hausse ou la baisse.

Si les zones à tendance positive et significative sont localisées autour des provinces du Boulkiemdé, du Zandoma, du Passoré etc. ; celles présentées comme négatives avec un caractère significatif se trouvent dans plusieurs provinces à travers le pays et dans différentes zones agroclimatiques. Il s'agit des **régions de l'Est (la Gnagna, la komandjari, le Gourma), du Centre-Ouest (du Ziro, de la sissili) de la Boucle du Mouhoun (Balé, Banwa, Kossi etc.), des Hauts-Bassins, le Centre-Nord, le Nord et des Cascades etc.** Ces zones pourraient être considérées comme étant **des zones de forte variabilité où le couvert végétal connaît un recul** pouvant entraîner des répercussions au niveau environnemental. Ces différentes localités sont réparties entre les trois zones agro-climatiques du pays mais avec une forte dominance des localités dans la zone soudano-sahélienne, où la pluviométrie moyenne annuelle varie entre 600 et 900mm/an ; et appartiennent au domaine phytogéographique soudanien suivant la classification du CILSS (2016). En outre, l'observation des données de l'occupation du sol issues de la carte des sols de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) indique globalement que ces zones sont caractérisées par une occupation du sol dominée par *les zones de de cultures, de pâturage, les arbustes et dans une moindre mesure par le bâti* comme le cas de la région du Centre. Dans le but d'apprécier le lien entre la pluviométrie interannuelle et l'état de la couverture végétale dans les zones détectées comme étant des zones potentielles de dégradation environnementale, une modélisation pluie-NDVI au moyen du RUE a été appliquée aux séries des données dans chaque département.

4.3 Relation NDVI - Pluie

◆ Corrélation entre la pluviométrie et le NDVI

Dans le but d'analyser l'impact de la pluviométrie sur l'état de la végétation dans les zones à tendance régressive, une corrélation a été faite entre les valeurs de NDVI_x et les pluviométries cumulées sur la

période de trois mois (le mois en cours + les deux mois précédents) en tenant compte du décalage dans le temps de réponse de la végétation à la pluie. La figure en annexe donne la tendance des corrélations entre les deux variables. L'analyse des résultats montre une liaison modérée dans l'ensemble. En effet, les différents coefficients de corrélation varient entre -0.4 et 0.5, avec 52% des départements qui ont présenté une corrélation négative contre 48% pour une corrélation positive.

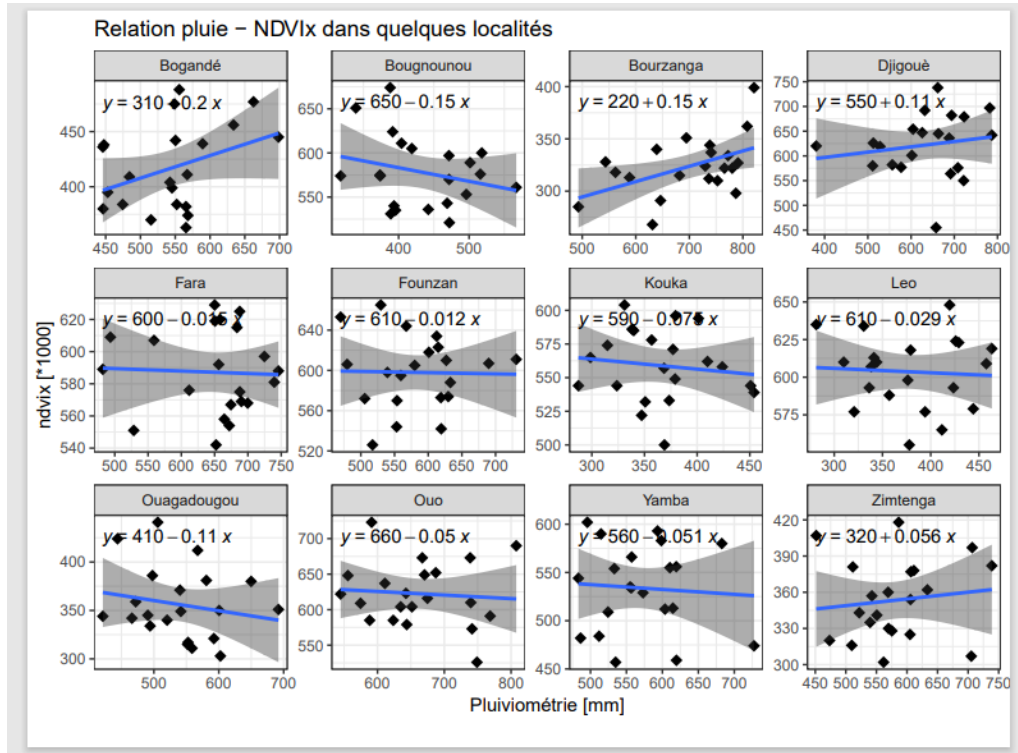


FIGURE 12 : Relation entre la pluie et le NDVIx dans quelques localités à tendance régressive du NDVI

Par ailleurs, aucune corrélation significative n'a été observée. Cette situation permet de constater que dans ces zones, la réponse de la végétation à la pluie semble plus faible. Autrement, la pluviométrie observée ne semble pas contribuer à une amélioration du couvert végétal telle qu'observée à la figure ~12;page~23. Du reste, afin de mieux comprendre les interactions entre pluie et NDVI, l'analyse de la RUE qui mesure le ratio de la biomasse produite par la quantité de pluie a été faite dans les mêmes zones.

◆ Tendance du RUE

La figure ~13;page~24 présente l'état (pente) de la relation de la RUE suivant le temps. Il ressort de l'observation de la carte que la tendance de la RUE est régressive dans presque toutes les localités.

En effet, 87% des départements ont été caractérisés par cette tendance régressive du ratio contre seulement 13% des départements où il est observé une amélioration du couvert végétal à la suite des conditions pluviométriques en hausse. Cette dynamique régressive du ratio NDVI/RR confirme la

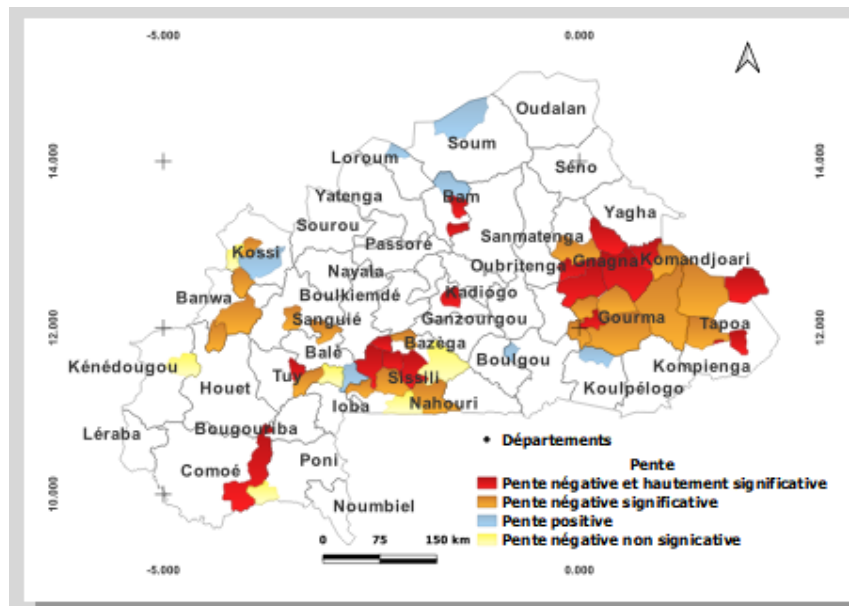


FIGURE 13 : Répartition spatiale des classes des pentes dans les zones à forte variabilité entre 1999 et 2020 au Burkina Faso

dégradation du couvert végétal mise en évidence dans les dites zones plus haut et le faible impact d la pluviométrie. Toutefois, d'un point de vue spécifique, la dynamique régressive observée présente des nuances dans les degrés suivant les départements à l'intérieur des régions en se basant sur la statistique t de Student appliquée aux pentes. En se basant sur les pentes issues de la relation linéaire entre les valeurs du ratio et le temps, quatre classes ont pu être identifiées et leurs distributions spatiales sont présentées à la figure ~13; page~24 à savoir : zone de changement hautement significatif($p < 0.01$ et pente négative); zone de changement significatif ($0.01 > p > 0.05$ - pente négative); zones de changement négatif stable ($p > 0.05$ - pente négative) et changement positif ($p > 0.05$ - pente positive). En rappel, dans l'ensemble des différents départements où les baisses du ratio sont observées, la tendance pluviométrique observée est en hausse. De ce fait, il apparait de ce qui précède la pluviométrie n'a contribué à améliorer la dynamique végétale positivement dans ces zones.

5 Discussions

L'analyse des données climatiques (pluviométrique principalement) des deux dernières décennies sur l'ensemble des départements du Burkina Faso a permis de constater d'une part, une forte variabilité interannuelle, alternant les années sèches et les années humides ; et d'autre part, de mettre en exergue une tendance en hausse des pluies dans la quasi-totalité des localités. En effet, 95% des départements ont enregistré une tendance positive au niveau des hauteurs de pluie annuelle durant la période 1999-2020, en sus d'une hausse des jours de pluie. Toutefois, près de 19% des départements ont connu des ruptures significatives ayant entraîné des modifications dans la dynamique pluviométrique. En tout état, cette situation pluviométrique observée au Burkina Faso laisse entrevoir une forme de reprise pluviométrique telle qu'observée dans bien de localités au Sahel depuis les années 1990s et mise en évidence dans la littérature par plusieurs auteurs ([Herrmann *et al.* \(2005\)](#); [Ali *et al.* \(2008\)](#); [Lebel & Ali \(2009\)](#); [Rasmus & Rasmussen \(2011\)](#)). La dynamique observée à travers ces résultats (variation pluviométrique et tendance à la hausse) au Burkina Faso est en concordance avec ceux obtenus par certains auteurs. En effet, [Hountondji *et al.* \(2006\)](#), dans le cadre d'une étude ayant porté sur cent vingt-huit (128) stations couvrant le pays, ont montré qu'environ 91% des localités ont observé une tendance pluviométrique en hausse. Cette tendance a été confirmée par les travaux de [DeLongueville *et al.* \(2016\)](#), qui ont constaté une amélioration de la pluviométrie au cours de ces dernières décennies, malgré une tendance globalement régressive à long terme (1950-2013) au niveau national. En sus, au niveau de la végétation, il a été observé une fluctuation interannuelle qui suit globalement la dynamique climatique dans les différentes localités. En somme, la forte variabilité environnementale et climatique mise en évidence à travers les résultats permet de confirmer notre hypothèse 1 de départ à savoir que la dynamique environnementale et climatique est caractérisée par une forte variabilité dans les différentes localités.

Par ailleurs, durant la même période (1999-2020), la tendance environnementale observée dans les différentes localités a connu des changements importants. En effet, les résultats des analyses des tendances sur les séries temporelles du NDVI ont montré que près de 37% du territoire ont connu une tendance positive pouvant être interprétée comme une stabilité et un reverdissement du couvert végétal. A l'opposé, 63% des départements ont enregistré une tendance régressive traduisant un processus de recul du couvert végétal. Parmi ces zones, 14%, soit 51 départements sur 351, ont présenté un caractère significatif dans la dynamique baissière du couvert végétal. Les localités affectées par la tendance significative régressive sont réparties dans les zones climatiques soudanienne et sahélo-soudanienne, précisément dans les régions de l'Est (quasi-totalité des provinces), du Centre-Ouest (Province du ziro), de la Boucle du Mouhoun (Balé, Banwa, Kossi), les Hauts-Bassins (Tuy, kénéDougou) et les Cascades etc. Il est aussi remarquable que, de l'ensemble des régions affectées par la tendance régressive du NDVI, celle de l'Est concentre le plus de département, soit environ 50% des zones. A l'analyse des données, la dynamique environnementale négative observée dans les différentes localités pourrait être expliquée principalement par la pression anthropique entraînant une modification de la dynamique de

l'occupation du sol en faveur des zones de culture et au détriment de la végétation boisée, à savoir entres autres la savane arbustive dense, la savane arborée, la forêt galerie etc, qui constitue la végétation dominante dans ces différentes zones. En effet, les données statistiques portant sur les superficies agricoles indiquent une tendance en hausse au cours de ces dix dernières années dans la quasi-totalité des dites zones affectées (voir figure ~15 en annexe). Dans la région de l'Est, les superficies agricoles cumulées sont passées entre autres dans la province de la Gnagna de 84144 ha en 2010 à 91604 ha en 2020; soit une hausse moyenne de 8%. Dans les provinces de la Tapoa et du Gourma, cette hausse est respectivement de 58% et 57% au cours de la même période. Cette dynamique a également été observée dans les Banwa, le Mouhoun au niveau de la Boucle du Mouhoun et pratiquement dans toutes les autres provinces sus évoquées. Les présents résultats obtenus au niveau du Burkina s'opposent à ceux obtenus par des auteurs comme [Herrmann *et al.* \(2005\)](#); [Rasmus & Rasmussen \(2011\)](#) et bien d'autres etc. [Herrmann *et al.* \(2005\)](#), à travers une étude de la tendance récente de la dynamique de la végétation au Sahel de 1982 - 2003, ont trouvé une tendance positive à l'amélioration du couvert végétal pouvant atteindre 50% dans certaines parties du Sahel dont le Burkina Faso (zones du sahel, sahélo-soudanienne précisément). Pour ces auteurs, l'on assiste à un retour positif de la situation après la longue période de sécheresse qui a affecté l'état de l'environnement au Sahel. Il apparaît que l'écart entre les résultats pourraient résulter de la période de référence considérée dans l'étude. Cependant, en se référant à des études couvrant presque la même période, nos résultats sont conformes à ceux obtenus par d'autres auteurs qui se sont intéressés à cette problématique suivant les différentes localités au Burkina Faso. A cet effet, [Gansaonre *et al.* \(2020\)](#), en étudiant la dynamique du couvert végétal dans la région de l'Est entre 1984 et 2015, notamment autour du Parc W dans la Tapoa, ont montré que la tendance du couvert végétal dans cette zone est en baisse. Ces auteurs citent précisément les communes de Botou, Diapaga et Tansarga etc où le recul végétal a affecté plus de 40 % des superficies de la zone avec pour cause l'extension des superficies agricoles qui a quasiment doublé entre 1999 et 2015. Ce même constat a été fait par [Tankoano *et al.* \(2016\)](#) qui ont montré une régression de la couverture ligneuse de l'ordre de 0,2% par an entre 1986 et 2015 dans la zone des Balé, région de la Boucle du Mouhoun, au profit des champs agricoles qui ont connu une hausse à l'inverse dans le même temps. [Zougrana \(2016\)](#), en s'intéressant à la question dans la région du Sud-ouest, a mis évidence la tendance régressive du couvert végétal au cours de ces dernières décennies 2000 et 2013 avec le facteur anthropique comme facteur principal. Au niveau national, même si ce n'est la même période, d'un point de vue global, les travaux de [Hountondji *et al.* \(2006\)](#) sur la dynamique de la végétation au Burkina Faso durant la période 1982-1999 ont permis de monter l'état régressif du couvert végétal dans 84% du territoire dont 39% présentaient un état très fort à modéré. Au déla du Burkina Faso, [Solly *et al.* \(2021\)](#), ont également montré une baisse de la végétation dans la zone sud du Sénégal liée principalement par les conversions d'usage des terres, et non par le climat. Ces résultats corroborent notre postulat de base à travers l'hypothèse 2 qui sous-tend que la tendance de la végétation observée au cours de ces dernières décennies au Burkina Faso est régressive dans la majeure partie du pays.

En ce qui concerne la relation entre le NDVI et la pluviométrie, les résultats obtenus montrent une faible corrélation entre les deux variables, témoignant d'un faible impact sur la végétation en termes de réponse. Cette tendance a été confirmée par le ratio RUE qui est caractérisée par une tendance négative alors que celle de la pluviométrie semble positive dans les différents départements. Cet état pourrait s'expliquer par le fait que l'efficacité d'utilisation de l'eau dépend d'autres facteurs comme l'intensité de la pluie, les caractéristiques édaphiques, l'écoulement etc. En tout état de cause, cette relation négative obtenue s'oppose aux résultats de [Rasmus & Rasmussen \(2011\)](#). En effet, ces derniers ont montré qu'au niveau du Sahel, il a été observé une corrélation positive et forte entre la pluviométrie et le NDVI. Au niveau du Burkina Faso, cette corrélation tend vers 0.7. Pour ces auteurs, cette forte corrélation traduit que les précipitations contrôlent le NDVI, au moins en partie l'état de la végétation dans ces zones. Toutefois, il est bien de rappeler que leur étude n'a couvert que la période 1996-20007, soit une dizaine d'années. La relative courte période pourrait conduire à des écarts dans les résultats portant sur une dynamique de changement qui se fait sur un temps relativement long. A l'opposé, [Hountondji et al. \(2006\)](#), a constaté une tendance négative dans les trois zones géographiques en ce qui concerne le ratio NDVI/RR au fil du temps confirmant nos résultats. [Rasmussen et al. \(2014\)](#), en étudiant la relation entre la végétation et la pluviométrie au nord du Burkina Faso ont montré qu'il y a avait une faible relation entre ces deux variables. En effet, ils expliquent que c'est uniquement à 30% que la pluviométrie influençait la végétation. Cela permet de confirmer l'hypothèse 3 selon laquelle la variabilité climatique observée au Burkina Faso ne contribue pas globalement à une amélioration positive de l'état de la végétation dans les différentes localités.

Conclusion

La caractérisation de la dynamique environnementale dans le contexte de la multiplicité des facteurs de pression (climatique, anthropique etc.) sur l'environnement à l'échelle locale au niveau du Burkina Faso est fondamentale en vue de mieux appréhender les changements et d'apporter une réponse à ces risques environnementaux. C'est pourquoi dans le cadre de ce travail, il a été question d'apprécier les changements observés au cours de ces dernières décennies et les implications avec les facteurs climatiques à partir d'une analyse d'une série temporelle des données de NDVI de SPOT végétation et climatiques (CHIRPS). Au terme des analyses, il ressort globalement que la dynamique environnementale et climatique actuelle au Burkina Faso est caractérisée par des fortes fluctuations et des tendances différentes suivant les zones. En effet, au niveau de la pluviométrie, les résultats ont montré une tendance en hausse de la pluviométrie dans 95% des départements avec près de 40% où ces tendances sont significatives. Du côté de la végétation, des changements négatifs dans près de 63% des départements ont été observés dont 14% sont dans un état significatif suivant les tests de tendance statistiques.

Ces zones sont concentrées principalement dans les régions de l'Est, dans l'ouest et le sud-ouest du Burkina Faso, qui se trouvent en zone soudano-sahélienne et soudanienne avec des conditions climatiques favorables pour les activités agropastorales. Ce sont aussi des zones qui sont caractérisées par une installation des migrants venus du Nord à la suite des conditions climatiques défavorables depuis les années 1980s. La tendance régressive observée au niveau environnemental dans les différentes zones s'expliquerait principalement par la pression anthropique et non climatique, qui se traduit par une extension des surfaces de cultures au détriment de la végétation naturelle pérenne.

En outre, il a été montré que malgré la tendance en hausse de la pluviométrie dans la plupart des localités sur la même période d'étude, n'influence pas positivement le changement de la végétation. En effet, les tendances indiquent une corrélation négative entre la pluie et la dynamique végétative dans bien de localités. Cela a été confirmé par la tendance de la capacité de l'efficience pluviométrique ou RUE. Les différents résultats obtenus pourraient servir de base pour le développement des actions en réponse à la situation de changement environnemental dans les différentes localités concernées.

Toutefois, à l'instar de toutes études, des limites existent dans la nôtre qui nécessitent de relativiser les résultats. il s'agit entre autres : i) de la période d'étude qui a concerné uniquement les deux dernières décennies ; ii) l'absence d'utilisation d'une carte d'occupation des sols pour mieux apprécier les changements au niveau des unités d'occupation du sol etc. C'est pourquoi, nous formulons des suggestions pour une amélioration des travaux futurs. Ces suggestions pourraient concerner principalement : i) l'intégration d'une carte d'occupation du sol comme celle mise au point par l'ESA en 2020 et ayant une résolution spatiale de 10m. L'utilisation de cette carte pourrait permettre d'extraire les valeurs des indices de végétation en tenant compte des différentes unités en vue d'éviter des biais

et mieux apprécier la dynamique au niveau des zones de végétation et agricole. ii) le développement d'une approche qui permettrait de combiner différentes sources de données sur les indicateurs environnementaux afin de disposer d'une série de données plus longue. En effet, les changements dans un système sont mieux appréciés à une échelle plus longue. iii) la possibilité d'utiliser des données de pluie d'observation au niveau des départements, même si des contraintes objectives existent, dans le but de limiter les biais qui se trouvent dans les données satellitaires au vu de la variabilité de la pluviométrie. iv) la possibilité de collecter des données terrain sur la végétation à travers un observatoire dans certains sites afin de confronter les résultats issus des analyses et les données d'observation terrain. La prise en compte de l'ensemble de ces suggestions dans une étude plus vaste pourrait faciliter la cartographie de la situation au niveau national.

En tout état de cause, les résultats acquis dans cette étude pourraient servir de base à toute initiative s'inscrivant dans le sens d'un plan de réponse au recul du couvert végétal et la gestion des risques environnementaux comme le font certaines organisations et collectivités à travers les activités de défense et de restauration environnementale.

Bibliographie

- Agali A., Ly M., Lona I., Traoré S., Sarr B., Seyni S., 2013. Evolution des risques agroclimatiques associés aux tendances récentes du régime pluviométrique en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne. *Revue sécheresse* 201213
- Agbanou T. B, Djafarou A., Bogo G, Paegelow M., Tente B., 2018. Variabilité pluviométrique et son impact sur le couvert végétal dans le secteur Natitingou-Boukombé au nord-ouest du Bénin. *Afrique SCIENCE* 14(3) (2018) 182 - 19110
- Ali A., Lebel T., Amani A, x., 2008. Signification et usage de l'indice pluviométrique au Sahel. *Sécheresse* 2008; 19 (4) : 227-3514
- Balme M., Galle S., Lebel T., 2005. Démarrage de la saison des pluies au Sahel : variabilité aux échelles hydrologique et agronomique, analysée à partir des données EPSAT-Nigera. *Sécheresse* 2005; 16 (1) : 15-22.8
- Botoni E., Reij C., 2009. *La transformation silencieuse de l'environnement et des systèmes de production au Sahel : Impacts des investissements publics et privés dans la gestion des ressources naturelles*. CILSS, Niamey
- Boubacar I., 2012. Caractérisation des saisons de pluies au Burkina Faso dans un contexte de changement climatique et évaluation des impacts hydrologiques sur le bassin du Nakanbé. Doctorat, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI
- Chamaille J. S, Fritz H., Murindagomo F., 2006. Schémas spatiaux de la relation NDVI-précipitations aux échelles de temps saisonnières et interannuelles dans une savane africaine. *Journal international de télédétection* Volume 27, 2006 - Numéro 23 : <https://doi.org/10.1080/0143116060070239214>
- CILSS, 1996. *Les systèmes de production du Burkina Faso : rapport provisoire*. CILSS, Burkina Faso
- CILSS, 2016. *Lutte contre le changement climatique : les réalisations du CILS*. CRA, Niamey
- Cocheme J., Franquin P., 1967. A study of the agroclimatology of the semi-arid areas south of the Sahara in West Africa. *FAO/UNESCO/WMO Interagency Project on Agroclimatology*. 10
- CRA/CILSS, 2015. *Atlas agroclimatique sur la variabilité et le changement climatique au Sahel*. CILSS, Niamey
- Dardel C., Kergoat L., Hiernaux P., Grippa M., Mougin E., 2015. Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest. *Marseille : IRD Éditions* 11
- Dardel C., Kergoat L., Hiernaux P., Grippa M., Mougin E., Ciais P, Nguyen C., 2014. Rain Use Efficiency : What it Tells us about the Conflicting Sahel Greening and Sahelian Paradox. *Remote Sens.* 2014, 6, 3446-3474; doi :10.3390/rs604344629
- DeLongueville F., Hountondji C. Y, Kindo I., Gemenne F, Ozer P., 2016. Analyse à long terme des données pluviométriques et thermiques au Burkina Faso (1950-2013). *SIInternational Journal of Climatology* Tome 36 , Numéro 13 -15 novembre 2016 Pages 4393-440514
- Didan K., Munoz A. B, R S., Huete A., 2019. *MODIS Vegetation Index User's Guide (MOD13 Series)*. University of Arizona , USA

- Diouf A. A, Faye G., Minet J., Djaby B., Ndione A. J, Tychon B., 2015. *Zonage phénologique et caractérisation des parcours naturels du Sénégal avec les données de télédétection*. Belgique
- Eklundh L., Jönsson P., 2017. *TIMESAT 3.3 avec décomposition des tendances saisonnières et traitement parallèle - Manuel du logiciel*. Université de Lund - http://web.nateko.lu.se/timesat/docs/TIMESAT33_SoftwareM
- France
- Eklundh L., Olsson L., 2003. Tendence de l'indice de végétation pour le Sahel Africain de 1982 - 1983. *Gephysical Research Letters*, Vol 30 N°8 doi :10.1029/2002GL016772, 200310
- FAO, 2015. *La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture, protection sociale et agriculture : briser le cercle vicieux da pauvreté rurale*. FAO, Rome
- Filipponi F., Valentini1 E., Xuan1 N. A, Guerra A. C, Florian L., Andrzejak M., Taramelli1 A. and, 2018. Fraction MODIS globale de la couverture végétale verte pour la surveillance des changements brusques et progressifs de la végétation. *Remote Sens. 2018* , 10 (4), 653; <https://doi.org/10.3390/rs1004065312>
- Gansaonre R.N., Benewindé J.B., Zoungrana, Yanogo P.I., 2020. Dynamique du couvert végétal à la périphérie du Parc W du Burkina Faso. *Belgeo [En ligne]* : URL : <http://journals.openedition.org/belgeo/4078611>
- Gornott C., Röhrig F., Lang S., Tomaka J., 2015. *Profil des risques climatiques au Burkina Faso*. GIZ, Burkina Faso
- Herrmann M. S, Anyamba A., Tucker J., Assaf, 2005. Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate. *Global Environmental Change 15* (2005) 394–40414
- Hountondji C. Y, Sokpon N., Ozer P, x., 2006. Analyse des tendances de la végétation à l'aide de données de télédétection à basse résolution au Burkina Faso (1982–1999) pour le suivi de la désertification. *Journal international de télédétection Volume 27, 2006 - Numéro 514*
- Hountoundji Y.-C.H., 2008. Dynamique environnementale en zones sahélienne et soudanienne de l'Afrique de l'Ouest : Analyse des modifications et évaluation de la dégradation du couvert végétal. Doctorat, Université de Liège
- Hu P., Sharifi A., Tahir A. and Z. M. N.and Tariq, Shah S.H.I.A., 2021. Evaluation of Vegetation Indices and Phenological Metrics Using Time-Series MODIS Data for Monitoring Vegetation Change in Punjab, Pakistan. *Water 2021*, 13, 2550. <https://doi.org/10.3390/w1318255015>
- INSD, 2020. *Cinquième Recensement Général de la Population et de l'Habitation du Burkina Faso : Résultats Préliminaires*. INDS, Burkina Faso
- INSD, 2021. *Enquête harmonisée sur les conditions de vie des ménages (EHCVM) au Burkina Faso :Rapport définitif*. INDS, Burkina Faso
- IPCC, 2022. *Climate change 2022- Impact, Adaptation, and vulnerability : summary for polycimakers Working group II-contribution to AR6* (Technical {{Report}} No. IPCC Technical Paper VI). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)
- Katie P., Emilly W., 2015. *Extrême climatique et réduction de la pauvreté par la résilience : le développement conçu dans l'incertitude*

- Lebel T., Ali A., 2009. Recent trends in the central and western Sahel rainfall regime. *J. Hydrol.* 375 (1–2), 52–64. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.11.030>52-64
- Mahe G., Emran A., Brou Y.T., Tra Bi A.Z., 2012. Analyse statistique de l'évolution de la couverture végétale à partir d'images MODIS et NOAA sur le bassin versant du Bouregreg (Maroc). *Géo Observateur*, 20, 33-4411
- MECV, 2004. *Programme cadre de gestion des ressources forestières – Volet transversal*. Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie, Burkina Faso
- MEF, 2021. *Plan national de développement économique et social [PNDES-II] 2021-2025* [. MEF, Burkina Faso
- MERH, 2015. *Plan National d'adaption aux changements climatiques au Burkina Faso (PNA : version finale)*. Ministère de l'Environnement, Burkina
- NDjafa H., 2010. *Perception paysanne de la variabilité et des changements climatiques. In le Sahel face au changement climatique : enjeux pour un développement durable*. CRA, Niamey
- OMM, 2021. *État du climat en Afrique : Rapport-N°1275*. OMM, Genève
- Rasmus F., Rasmussen k., 2011. Analyse des tendances de «l'efficacité de l'utilisation de la pluie» au Sahel à l'aide des données pluviométriques GIMMS NDVI, RFE et GPCP. *Téledétection de l'environnement Volume 115, Numéro 2 , 15 février 2011 , Pages 438-451*14
- Rasmussen k., Rasmus F., Bjarne F., Laura Vang Rasmussen V. L., 2014. Explaining NDVI trends in northern Burkina Faso. *Danish Journal of Geography*, 114 :1, 17-24, DOI : 10.1080/00167223.2014.8905229
- Sivakumar VK. M., 1988. Predicting rainy season potential from the onset of rains in southern sahelian and sudanian climatic zones of west africa. *Agricultural and Forest Meteorology* 42 (1988) 295-305 295. Elsevier Science Publishers B.V.11
- Solly B., El Hadji Balla D., Oumar S., Aruna M.J., Tidiane Sané., 2021. Détection des zones de dégradation et de régénération de la couverture végétale dans le sud du Sénégal à travers l'analyse des tendances des séries temporelles du NDVI et des occupations du sol à partir d'image Landsat. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection :pp.1-15. ffhal-03181120*f17
- Soulaman S., Kadeba A., Nacoulma M. B, Traoré S., Bachmann Y., Thiombiano A., 2015. Impact des activités anthropiques sur la dynamique de la végétation de la réserve partielle de faune de Pama et de ses périphéries (sud-est du Burkina Faso) dans un contexte de variabilité climatique. *Journal of Applied Biosciences* 87 :8047– 806418
- Stern R.D., Dennett M.D., Garbutt D.J., 1981. The start of the rains in West Africa. *J. Climatol.*, 1 : 59-68.10
- Sultan B., Agali A., Barbier B., Baron C., Tsogo B. M, 2013. La question de la vulnérabilité et de l'adaptation de l'agriculture sahélienne au climat au sein du programme AMMA. *La Météorologie*, 2012 - ffhal-02873303fpp.64-72

- Tankoano B., Hien M., Dibi H, Sanon Z, Akpa Y, Sokeng S. J, 2016. Cartographie de la dynamique du couvert végétal du Parc National des Deux Balé à l'ouest du Burkina Faso. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 16, 4, pp. 837-846.10
- USAID, 2017. *Profil du risque du changement climatique au Sahel occidental : fiche d'information régionale*
- Zamble T. A, Brou Y. and T, 2013. Télédétection et analyse statistique de la dynamique de la végétation dans un contexte de variabilité climatique sur le bassin versant du Bouregreg (Maroc). *Climate and Land Surface Changes in Hydrology Proceedings of H01, IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly, Gothenburg, Sweden, July 2013 (IAHS Publ. 359, 2013)*9
- Zhang H., Chen H., Yang F., Niu H., Yang Y., Zhang B., 2019. Fractional Vegetation Cover Estimation of Different Vegetation Types in the Qaidam Basin. *Review sustainability*.17
- Zougrana B. J, 2016. Vegetation dynamics in the southwest of Burkina Faso in response to rainfall variability and land use. Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur de Kwame Nkrumah University of Science and Technology, Nkrumah University of Science ; Technology - Ghana

Annexe

.1 Carte des bassins versants du Burkina Faso



FIGURE 14 Les différents bassins versants nationaux

.2 Carte des tendances de la pluie au niveau national

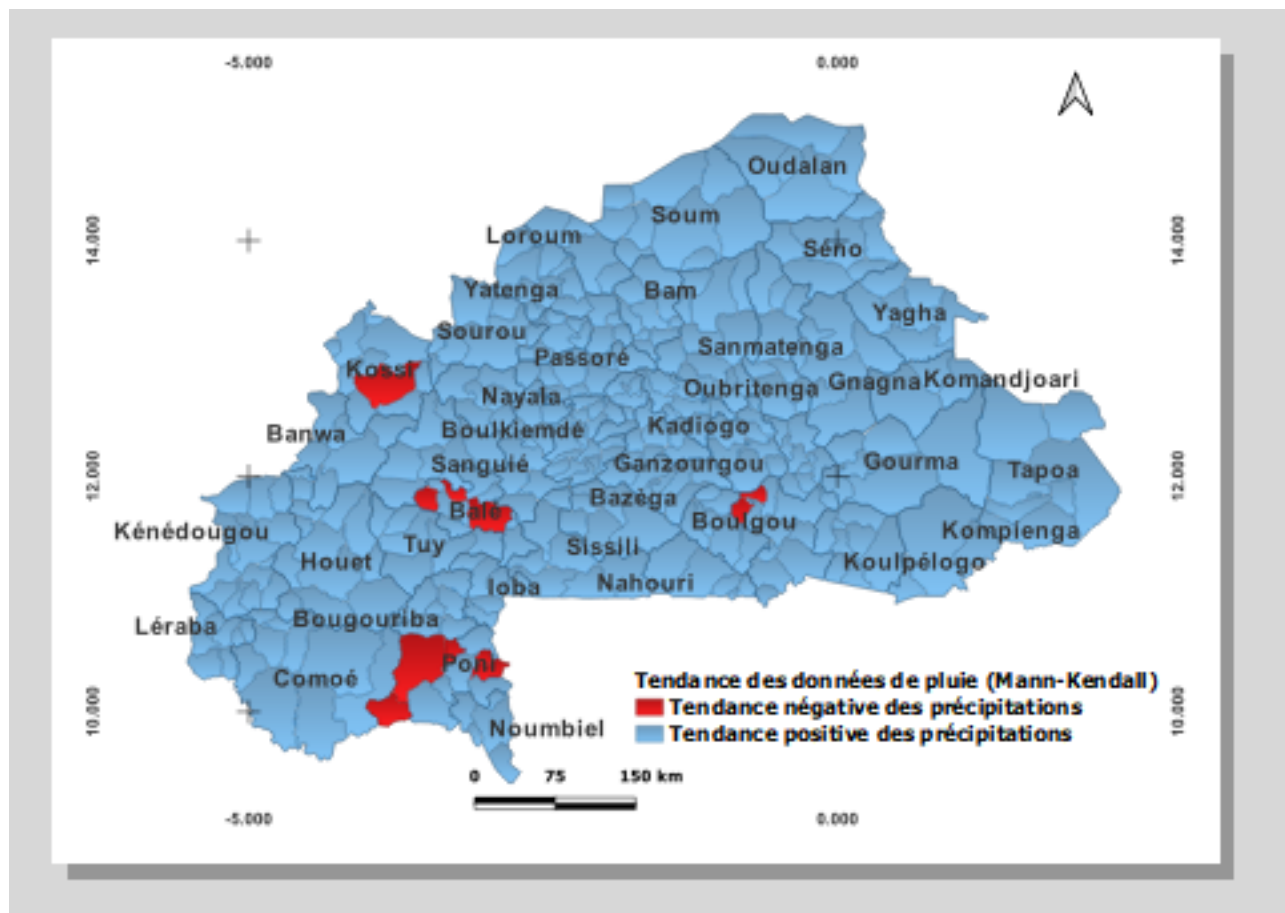


FIGURE 15 Tendance de la pluviométrie sur la période 1991-2020 dans les départements

.3 Situations des emblavures

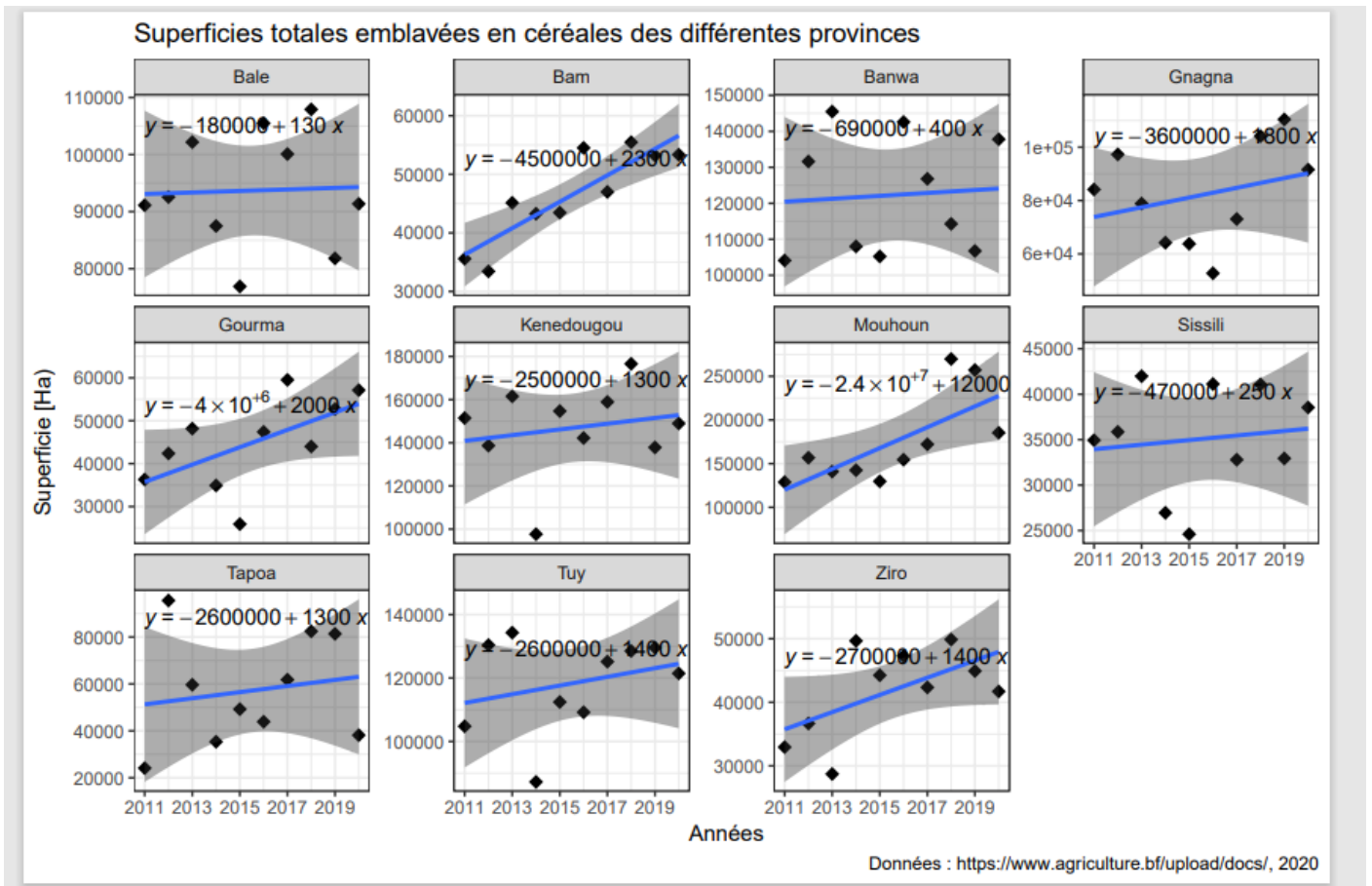


FIGURE 16 Evolution des superficies emblavées dans différentes localités de 2011 à 2020

.4 Corrélation entre NDVI - Pluie

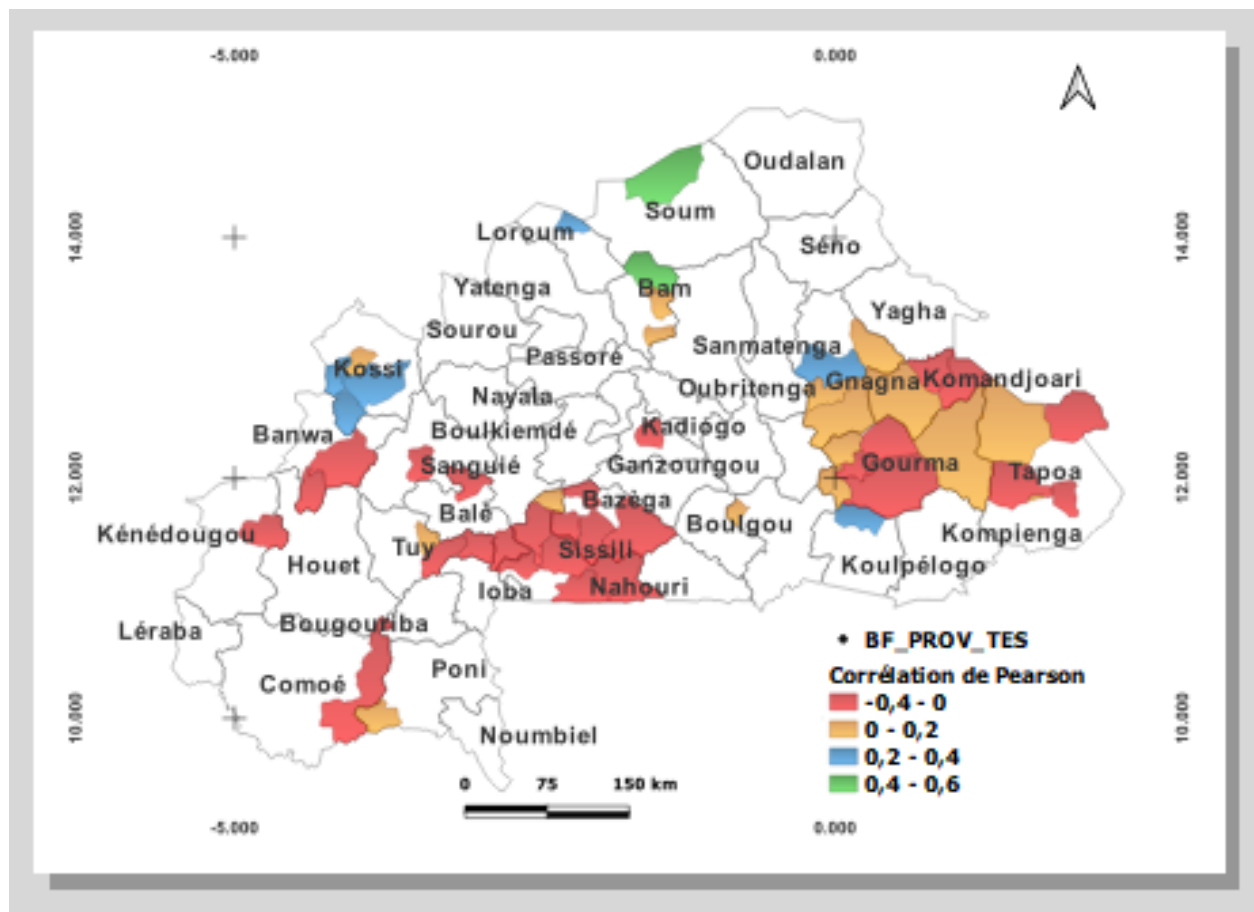


FIGURE 17 Corrélation entre pluie cumulée sur trois mois et NDVI max