



HAL
open science

Variabilité climatique, dynamique des feux de végétation et perceptions locales dans le bassin versant du N’Zi (Centre de la Côte d’Ivoire)

Jean-Luc Kouassi

► To cite this version:

Jean-Luc Kouassi. Variabilité climatique, dynamique des feux de végétation et perceptions locales dans le bassin versant du N’Zi (Centre de la Côte d’Ivoire). Sciences de l’environnement. Institut National Polytechnique Felix Houphoët Boigny - Yamoussoukro, 2019. Français. NNT : . tel-02183044

HAL Id: tel-02183044

<https://theses.hal.science/tel-02183044v1>

Submitted on 14 Jul 2019

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

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

REPUBLIQUE DE COTE D'IVOIRE

Union - Discipline - Travail

**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



**Institut National Polytechnique
Félix HOUPHOUËT-BOIGNY**



Ecole Doctorale Polytechnique

T H E S E

pour l'obtention du grade de
DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE FELIX HOUPHOUËT-BOIGNY

Mention : Sciences Agronomiques

Spécialité : Climatologie et Gestion environnementale des écosystèmes

**VARIABILITE CLIMATIQUE, DYNAMIQUE DES FEUX DE
VEGETATION ET PERCEPTIONS LOCALES DANS LE BASSIN
VERSANT DU N'ZI (CENTRE DE LA COTE D'IVOIRE)**

Présentée et soutenue publiquement le 21 juin 2019 par

KOUASSI Kouakou Jean-Luc

JURY

M. ASSIDJO Nogbou Emmanuel	Professeur Titulaire	INP-HB	Président
M. WANDAN Eboua Narcisse	Maître de Conférences	INP-HB	Directeur de thèse
M. KOUAME Koffi Fernand	Professeur Titulaire	UVCI	Rapporteur
M. DIBI N'Da Hyppolite	Maître de Conférences	UFHB	Rapporteur
M. KOUASSI Kouadio Ignace	Maître de Conférences	UNA	Examineur
M. MBOW Cheikh	Professeur Associé	MSU	Invité

A

mon adorable fille,

ma tendre épouse,

toute ma famille.

Si un homme ignore vers quel port il navigue, aucun vent ne peut lui être favorable.
Sénèque



REMERCIEMENTS

Ce manuscrit de thèse représente le fruit d'un travail de recherche mené dans le cadre de la lutte contre les feux de brousse et la gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de changement climatique, initiées par le Ministère des Eaux et Forêts (MINEF). Il a été réalisé grâce aux soutiens de diverses personnes à qui je dois exprimer mes sincères remerciements.

Je tiens avant tout à remercier chaleureusement le Docteur WANDAN Eboua Narcisse, Maître de Conférences, Enseignant-Chercheur et Directeur du Laboratoire Science, Société et Environnement de l'Unité Mixte de Recherche et d'Innovation Sciences Agronomiques et Génie Rural de l'INP-HB, d'avoir accepté de diriger cette thèse. Il m'a formé, a constamment suivi mes travaux et a amélioré la qualité de cette thèse par ses conseils et suggestions. Un grand merci pour m'avoir fait confiance sur le plan scientifique et m'avoir laissé libre quant à l'orientation et la conduite de ce travail.

J'exprime ma reconnaissance au Docteur MBOW Cheikh, Directeur Exécutif du Secrétariat START International à Washington et Professeur Associé à l'Université d'Etat du Michigan (MSU) aux USA pour avoir insisté sur l'utilité des études doctorales dans la vie socio-professionnelle. Sa gentillesse, ses conseils et son soutien moral et scientifique m'ont donné une autre vision et surtout une passion pour la recherche environnementale et m'ont permis de finaliser cette thèse.

Je tiens à remercier les membres du jury de thèse d'avoir accepté de prendre connaissance du manuscrit de thèse et contribué à son amélioration à travers leurs remarques et suggestions. Ce jury international est composé du Professeur ASSIDJO Nogbou Emmanuel de l'INP-HB (Président), du Professeur KOUAME Koffi Fernand de l'Université Virtuelle de Côte d'Ivoire (UVCi) (Rapporteur), du Docteur DIBI N'Da Hyppolite de l'Université Félix Houphouët-Boigny (UFHB) (Rapporteur), du Docteur KOUASSI Kouadio Ignace de l'Université Nangui Abrogoua (UNA) (Examineur) et du Docteur Cheikh MBOW du MSU (Invité).

Je remercie aussi les membres des comités de suivi de thèse, à savoir le Professeur ZIHIRI Guédé Noël de l'UFHB et les Docteurs ABO Kouabenan et YAO N'Guettia René de l'INP-HB pour leurs conseils avisés, leurs questions et leurs analyses pertinentes qui nous ont permis de recentrer cette recherche.

Je remercie également le Docteur KOFFI N'Guessan, Directeur Général de l'INP-HB, le Professeur YAO Kouassi Benjamin, Directeur de l'Ecole Doctorale Polytechnique et Docteur BROU Yao Casimir, Directeur de l'Unité Mixte de Recherche et d'Innovation Sciences

Agronomiques et Génie Rural pour leur contribution scientifique, matérielle et financière à la présente recherche.

Mes remerciements vont également à l'endroit de mon responsable administratif, le Colonel AKE Abroba Jérôme, Directeur Général Adjoint des Forêts et de la Faune (anciennement Directeur du Reboisement et du Cadastre Forestier) au MINEF pour ses constants encouragements et les facilités qu'il m'a accordées pour la réalisation de mes travaux en dépit de mes obligations professionnelles.

Je tiens également à remercier le Lieutenant-Colonel KASSAMBA Aboubacar, Secrétaire Exécutif du Comité National de Défense de la Forêt et de Lutte Contre les Feux de Brousse pour le temps qu'il m'a accordé lors des discussions fort enrichissantes et très sympathiques.

J'aimerais remercier le Docteur KOUAME Christophe, Directeur Régional de l'ICRAF, Région Afrique de l'Ouest et du Centre, les Docteurs BISSELEUA Hervé, DIBY Lucien et Jane KAHIA qui m'ont inculqué le goût de la recherche et qui ont suscité mon inscription en thèse.

J'exprime aussi, toute ma reconnaissance au Docteur N'DRI-KONE Brigitte, Enseignant-Chercheur à l'UNA qui n'a hésité à nous partager du matériel utile à la présente étude, et au Docteur ZO-BI Irié Casimir qui a toujours demeuré à l'écoute de mes préoccupations et soutenu mes activités académiques et professionnelles par des conseils avisés.

J'exprime ma gratitude à M. Dieudonné KONAN, Statisticien à l'Organisation Internationale du Cacao (ICCO) qui, malgré son calendrier chargé, a accepté de me guider dans mes travaux. Merci pour les conseils, les critiques, les suggestions et surtout les contributions qui ont permis d'orienter et d'améliorer cette présente thèse.

Je remercie tous mes collègues de la Direction du Reboisement et du Cadastre Forestier (DRCF) surtout le Lieutenant-Colonel SORO Mamadou et les Capitaines KOUMAN Etienne et DON Sun Sunda dont la convivialité et le soutien m'ont permis de surmonter beaucoup d'épreuves.

Je tiens à remercier tous les membres de ma famille, particulièrement, mon père, ma mère, mes frères (Félix, Jean Armel, Ezéchiél, Saint-Noé) et mes sœurs (Elodie et Marina) pour leurs encouragements et leur soutien permanent et inconditionnel.

Mes infinis remerciements à ma chère et tendre épouse Roseline et ma fille Marie-Prielle qui ont accepté tous les sacrifices et les désagréments que je leur ai imposés pendant toute la durée de cette thèse et par mes longs moments de négligence et mes absences répétées. Qu'elles reçoivent ici mes très profonds remerciements. J'espère simplement qu'un jour, l'utilité de ce travail compensera leurs sacrifices.

Je pense également à tous mes amis et condisciples des classes d'ingénieur (Franck-Boris, Guy-Michel, Edmond, Guy-Roger, Ferdinand et Therance) qui m'ont toujours fait confiance et n'ont cessé de m'encourager durant cette aventure.

Que toutes les personnes qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué au bon déroulement de cette thèse, et qui n'ont pu être citées nommément, trouvent ici, l'expression de ma profonde gratitude. Puisse Dieu répandre sa grâce, en abondance, sur elles.

TABLE DES MATIERES

DEDICACE.....	i
REMERCIEMENTS.....	ii
TABLE DES MATIERES	v
RESUME.....	xi
ABSTRACT	xii
LISTE DES FIGURES.....	xiii
LISTE DES TABLEAUX	xv
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS.....	xvii
LISTE DES ANNEXES	xx
INTRODUCTION.....	1
PREMIERE PARTIE : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	8
CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LE CHANGEMENT ET LA VARIABILITE CLIMATIQUES.....	9
1.1. DEFINITIONS DE QUELQUES TERMES ET CONCEPTS CLIMATIQUES	9
1.2. CHANGEMENT ET VARIABILITE CLIMATIQUES EN AFRIQUE DE L'OUEST	10
1.2.1. Situation climatique en Afrique de l'Ouest.....	10
1.2.2. Impacts du changement climatique	11
1.2.2.1. Changement climatique et agriculture.....	11
1.2.2.2. Changement climatique et environnement	11
1.2.2.3. Changement climatique et ressources en eau	12
1.2.2.4. Changement climatique et santé humaine	13
CHAPITRE 2 : GENERALITES SUR LES FEUX DE VEGETATION	14
2.1. FEUX DE VEGETATION : DEFINITIONS, REGIME ET TYPOLOGIE	14
2.1.1. Définitions	14
2.1.2. Régime et indice de risque	14
2.1.3. Typologie des feux	15
2.2. FACTEURS DE PROPAGATION DES FEUX DE VEGETATION	17
2.2.1. Formations végétales.....	17
2.2.2. Facteurs météorologiques.....	18
2.2.2.1. Température de l'air	18
2.2.2.2. Précipitations	18
2.2.2.3. Humidité relative.....	19

2.2.2.4. Vent	19
2.2.3. Facteurs topographiques.....	19
2.2.4. Facteurs édaphiques	20
2.2.5. Facteurs socio-économiques	20
2.3. CAUSES ET PRATIQUES DES FEUX DE VEGETATION	21
2.4. IMPACTS DES FEUX DE VEGETATION.....	22
2.4.1. Impacts des feux sur le climat	22
2.4.2. Impacts des feux sur le milieu naturel.....	23
2.4.2.1. Effets des feux sur les écosystèmes.....	23
2.4.2.2. Effets des feux sur la faune	25
2.4.2.3. Effets des feux sur les sols	26
2.4.3. Impacts des feux sur la société.....	26
2.5. SITUATION DES FEUX DE VEGETATION EN COTE D'IVOIRE	27
2.5.1. Statistique.....	27
2.5.2. Causes et Impacts	28
2.5.3. Stratégies de lutte contre les feux de végétation en Côte d'Ivoire.....	28
2.6. SUIVI ET MODELISATION DE LA DYNAMIQUE DES FEUX DE VEGETATION	30
2.6.1. Apport de la télédétection	30
2.6.2. Données MODIS et VIIRS.....	31
2.6.2.1. Présentation des capteurs satellitaires	31
2.6.2.2. Produits de feux actifs	32
2.6.2.3. Produits de surfaces brûlées	32
2.6.3. Travaux antérieurs.....	33
2.6.4. Modélisation des séries chronologiques.....	35
2.6.4.1. Introduction aux modèles ARIMA.....	35
2.6.4.2. Identification	38
2.6.4.3. Estimation des paramètres du modèle.....	39
2.6.4.4. Diagnostic du modèle.....	40
2.6.4.5. Prévision.....	42
DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES	43
CHAPITRE 3 : MATERIEL.....	44
3.1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	44
3.1.1. Situation géographique.....	44
3.1.2. Caractérisation biophysique	45
3.1.2.1. Relief et hydrographie	45
3.1.2.2. Climat.....	45

3.1.2.3. Sols	46
3.1.2.4. Végétation et dynamique forestière.....	47
3.1.3. Description du milieu humain	50
3.2. DONNEES SATELLITAIRES	51
3.2.1. Données de feux de végétation.....	51
3.2.2. Données de densité de canopée	52
3.2.3. Indice de végétation	52
3.2.4. Modèle numérique d'altitude	53
3.3. DONNEES CLIMATIQUES	53
3.4. DONNEES CARTOGRAPHIQUES	54
3.4.1. Données d'occupation du sol et de dynamique forestière.....	54
3.4.2. Données de population	54
3.4.3. Autres données cartographiques.....	55
3.5. MATERIEL DE TERRAIN	55
CHAPITRE 4 : METHODES	56
4.1. EVOLUTION DU CLIMAT.....	56
4.1.1. Calcul des paramètres et indices climatiques	56
4.1.1.1. Estimation de l'évapotranspiration de référence	56
4.1.1.2. Déficit de pression de vapeur	57
4.1.1.3. Anomalie standardisée des pluies et températures	57
4.1.1.4. Estimation des indices de risque de feu.....	58
4.1.2. Analyse des tendances.....	59
4.1.3. Détection de rupture	61
4.2. DYNAMIQUE RETROSPECTIVE ET PROSPECTIVE DES FEUX DE VEGETATION	61
4.2.1. Vérité terrain et prétraitement des produits de feux actifs	61
4.2.2. Traitement des produits de surfaces brûlées.....	62
4.2.3. Répartition spatiale des feux	63
4.2.4. Modélisation des séries temporelles pyrologiques.....	64
4.2.4.1. Analyse des tendances.....	64
4.2.4.2. Modélisation des séries pyrologiques	64
4.3. IMPACT DES FACTEURS CLIMATIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX SUR LA DYNAMIQUE DES FEUX	65
4.3.1. Extraction des données.....	65
4.3.2. Analyse multivariée.....	66
4.3.2.1. Corrélations de Spearman	66
4.3.2.2. Modèles additifs généralisés	67

4.3.2.3. Test de Kruskal-Wallis.....	68
4.3.2.4. Classification Hiérarchique	68
4.3.3. Corrélation croisée des variables environnementales et pyrologiques.....	68
4.4. PERCEPTIONS DES COMMUNAUTES LOCALES.....	69
4.4.1. Collecte et analyse de données quantitatives	69
4.4.1.1. Techniques d'échantillonnage et taille de l'échantillon	69
4.4.1.2. Procédure de sélection des ménages	70
4.4.1.3. Réalisation de la collecte de données	71
4.4.1.4. Analyse des données	71
4.4.2. Collecte et analyse de données qualitatives	71
4.4.2.1. Sélection des participants	71
4.4.2.2. Réalisation de focus group	72
4.4.2.3. Analyse des données	72
TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION.....	73
CHAPITRE 5 : RESULTATS.....	74
5.1. VARIABILITE ET TENDANCES CLIMATIQUES	74
5.1.1. Variabilité climatique	74
5.1.1.1. Variabilité thermométrique	74
5.1.1.2. Variabilité pluviométrique et l'évapotranspiration de référence.....	76
5.1.1.3. Variabilité hygrométrique	79
5.1.2. Tendances des séries climatiques	80
5.1.3. Ruptures des séries pluviométriques et hygrométriques	81
5.2. DYNAMIQUE RETROSPECTIVE DES FEUX DE VEGETATION.....	81
5.2.1. Dynamique spatio-temporelle des foyers de feux et des surfaces brûlées	81
5.2.1.1. Evolution mensuelle	81
5.2.1.3. Evolution annuelle.....	84
5.2.1.3. Evolution en fonction des écorégions	87
5.2.2. Répartition spatiale des feux de végétation.....	88
5.2.2.1. Fréquence des feux.....	88
5.2.2.2. Densité des feux	89
5.2.3. Analyse des tendances.....	90
5.2.3.1. Anomalies des foyers de feu détectés et surfaces brûlées	90
5.2.3.2. Tendances des foyers de feux et surfaces brûlées par écorégion	92
5.3. IMPACT DE LA VARIABILITE CLIMATIQUE SUR LA DYNAMIQUE DES FEUX	93
5.3.1. Corrélation entre les variables pyrologiques et les variables climatiques.....	94
5.3.1.1. Corrélation de Spearman entre les variables pyrologiques et climatiques.....	94

5.3.1.2. Corrélation croisée de l'impact du climat sur la dynamique des feux de végétation	96
5.3.2. Classification Hiérarchique	99
5.3.2.1. Evolution mensuelle	99
5.3.2.2. Evolution annuelle.....	100
5.3.3. Modèles GAM entre les variables pyrologiques et les variables climatiques.....	101
5.3.3.1. Occurrence des feux et variables climatiques	101
5.3.3.2. Surfaces brûlées et variables climatiques.....	106
5.4. IMPACT DES PARAMETRES ENVIRONNEMENTAUX SUR LA DYNAMIQUE DES FEUX.....	111
5.4.1. Evolution des feux en fonction de la végétation	111
5.4.1.1. Type d'occupation du sol	111
5.4.1.2. Densité de la canopée	113
5.4.1.3. Indice de végétation	114
5.4.2. Evolution des feux en fonction du terrain	114
5.4.2.1. Altitude.....	114
5.4.2.2. Pente	115
5.4.2.3. Orientation du terrain	116
5.4.2.4. Type de sols.....	116
5.4.3. Evolution des feux en fonction des facteurs anthropogéniques	118
5.4.3.1. Accessibilité aux villes.....	118
5.4.3.2. Distance des localités	118
5.4.3.3. Distance du réseau routier et ferroviaire	119
5.4.3.4. Densité de population.....	119
5.5. MODELISATION ET PREVISION DE LA DYNAMIQUE DES FEUX.....	120
5.5.1. Etude de la stationnarité	120
5.5.2. Analyse des dépendances	120
5.5.3. Modélisation de la dynamique des feux de végétation	123
5.5.4. Validation des modèles	124
5.5.5. Prévision de la dynamique des feux de végétation.....	127
5.6. PERCEPTIONS ET STRATEGIES D'ADAPTATION DES POPULATIONS LOCALES.....	129
5.6.1. Description de l'échantillon enquêté.....	129
5.6.2. Perceptions des agriculteurs	130
5.6.2.1. Variabilité climatique	130
5.6.2.2. Dynamique des feux de végétation	132
5.6.3. Impacts de la variabilité climatique et des feux de végétation.....	134
5.6.3.1. Impact du changement et de la variabilité climatiques	134

5.6.3.2. Impacts des feux de végétation	135
5.6.4. Stratégies d'adaptation des agriculteurs	136
5.6.4.1. Stratégies face aux impacts du changement climatique	136
5.6.4.2. Stratégies face aux impacts des feux de végétation	139
CHAPITRE 6 : DISCUSSION	140
6.1. VARIABILITE ET TENDANCES CLIMATIQUES DANS LE BASSIN VERSANT DU N'ZI	140
6.2. DYNAMIQUE RETROSPECTIVE DES FEUX DE VEGETATION.....	141
6.3. IMPACT DE LA VARIABILITE CLIMATIQUE SUR LA DYNAMIQUE DES FEUX	143
6.4. IMPACT DES PARAMETRES ENVIRONNEMENTAUX SUR LA DYNAMIQUE DES FEUX.....	145
6.5. MODELISATION ET PREVISION DE LA DYNAMIQUE DES FEUX.....	147
6.6. PERCEPTIONS ET STRATEGIES D'ADAPTATION.....	148
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	151
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	155
ANNEXES.....	184

RESUME

Le bassin versant du N’Zi est un milieu sensible aux risques d’incendie en raison de son climat, son relief, ses écosystèmes et ses enjeux socio-économiques. Malheureusement, les connaissances sur le régime des feux sont sous-documentées dans cette zone. Le présent travail vise à évaluer le régime pyroclimatique et ses déterminants dans la perspective d’une modélisation prédictive en relation avec les perceptions des communautés locales dans le centre de la Côte d’Ivoire. Pour atteindre cet objectif, cette étude a utilisé les données météorologiques, satellitaires (pyrologiques et biophysiques) et socio-économiques (enquête ménage) qui ont été analysées à l’aide d’approches de statistiques descriptives et prévisionnelles. Ces approches comprennent l’analyse multivariée, la corrélation de Spearman, les modèles additifs généralisés, le test de Kruskal-Wallis, la classification hiérarchique sur composantes principales, la corrélation croisée et la méthodologie de Box-Jenkins. Cette thèse s’est ordonnée autour de cinq grands axes. Le premier, consacré à l’étude de la variabilité climatique sur la période 1973-2016, montre que les anomalies thermométrique et hygrométrique ont augmenté respectivement de +0,36 °C et +1,24 % et les anomalies pluviométriques de la zone se sont légèrement amplifiés de -6,04 mm. Le deuxième, portant sur la caractérisation du régime des feux, a montré que le nombre de feux et les surfaces brûlées présentent une tendance baissière. Durant la période 2001-2016, 19 156 feux ont été enregistrés, dévastant 71 979,7 km² de végétation. Le troisième, traitant de l’impact des variables environnementales sur le régime des feux, a montré que les facteurs climatiques et environnementaux influencent significativement l’activité des feux. Les facteurs climatiques les plus déterminants de l’activité des feux demeurent la visibilité, l’humidité relative, la précipitation, l’indice d’Angström, le point de rosée, l’amplitude thermique, le déficit de saturation et l’indice de danger de feu de Lowveld. Aussi, les incendies ont une variabilité spatiale conditionnée par les facteurs environnementaux. Le quatrième axe, consacré à la modélisation prédictive du régime des feux à l’aide de la méthode Box-Jenkins, a montré l’efficacité des modèles SARIMA pour la simulation et la prévision du régime des feux. La phase de validation combinant la statistique de Ljung-Box, l’analyse des résidus et des autocorrélations, couplée à l’analyse comparative des données simulées et observées ont montré des résultats satisfaisants et ont permis leur utilisation pour la prévision sur une période de 48 mois. Enfin, le cinquième axe, présentant les perceptions locales du régime pyroclimatique, relève que les populations locales ont une bonne perception de l’évolution du climat et des feux de végétation dont la tendance générale est à la péjoration et ont développé des stratégies pour s’adapter. Ces constats sont en accord avec l’analyse de données météorologiques et satellitaires. Les résultats de cette thèse aideront les décideurs et les gestionnaires à la prise de décisions afin de réduire la vulnérabilité des populations locales face aux aléas pyroclimatiques actuels et futurs.

Mots-clés : Changement climatique, feux de végétation, surfaces brûlées, série chronologique, analyse de tendance, modèles de Box-Jenkins, prévisions, perceptions, stratégies d’adaptation, bassin versant du N’Zi

ABSTRACT

The N'Zi River Watershed is a sensitive environment to wildfire risks due to its climate, terrain, ecosystems and socio-economic issues. Unfortunately, knowledge about wildfire regime is under-documented in this area. The present work aimed to evaluate of the pyro-climatic regime and its determinants in the prospect of predictive modelling in relation to local perception in the centre of Côte d'Ivoire. In order to achieve this goal, this study used meteorological, satellite (pyrological and biophysical) and socio-economic (household survey) data that were analysed using descriptive and forecasting statistical approaches. These approaches include multivariate analysis, Spearman correlation, generalized additive models, Kruskal-Wallis test, hierarchical clustering on principal components, cross-correlation, and Box-Jenkins methodology. This thesis is organised into five major axes. The first one, devoted to the study of the climatic variability over the period 1973-2016, shows that the thermometric and hygrometric anomalies have increased respectively by +0.36 °C and +1.24 % and the rainfall anomalies of the watershed slightly decreased by -6.04 mm. The second, based on the characterization of the wildfire regime, revealed that the number of wildfires and burned areas show a downward trend. During the period 2001-2016, 19,156 wildfires were recorded, burning 71,979.7 km² of vegetation. The third part, dealing with the impact of environmental variables on the fire regime, showed that climatic and environmental factors significantly impact wildfire activity. The most important climatic factors of wildfire activity are visibility, relative humidity, precipitation, Angstrom index, dew point, thermal amplitude, vapour-pressure deficit and Lowveld fire danger index. Also, the spatial distribution of wildfires is conditioned by environmental factors. The fourth axis, devoted to predictive modelling of the wildfire regime using Box-Jenkins method, showed the effectiveness of the SARIMA models to simulate and forecast wildfire regime. The validation phase combining Ljung-Box statistics, residue and autocorrelation analysis coupled with comparative analysis of simulated and observed data showed satisfactory results and allowed their use for forecasting over a 48-month horizon. Finally, the fifth part, sharing the local perceptions of the pyro-climatic regime, notes that the local populations perceive climate change and the evolution of wildfires, which tend to be in a deterioration trend and have developed strategies to adapt. These findings are consistent with the analysis of meteorological and satellite data. The findings of this thesis will help decision-makers and managers to make decisions to reduce the vulnerability of local populations to current and future pyro-climatic hazards.

Keywords: Climate change, wildfires, burned areas, time series, trend analysis, Box-Jenkins models, forecasts, perceptions, adaptation strategies, N'Zi River Watershed

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1 : Facteurs de propagation des feux de végétation.....	17
Figure 2-2 : Exemples de combinaisons des forces d’alignement sur un même terrain	20
Figure 2-3 : Dégâts des feux sur la végétation et les cultures ; (a) feu actif dans la zone préforestière à Angbavia, (b) végétation savanicole consumée par le feu à Tafiré, (c) champ de manioc consumé par le feu à Aheremou 2 et (d) teckeraie consumée par le feu à Katiola	24
Figure 2-4 : 22 ^e édition de la Caravane Nationale de lutte contre les feux de brousse à Koubi : (a) Allumage symbolique de feu ; (b) Intervention du Ministre des Eaux et Forêts	30
Figure 3-1 : Localisation du bassin versant du N’Zi.....	44
Figure 3-2 : Carte climatique du BVN	46
Figure 3-3 : Carte des sols de la zone d’étude.....	47
Figure 3-4 : Carte d’occupation du sol en 2016 (a) et de la dynamique forestière de 2000 à 2015 (b) du BVN.....	49
Figure 3-5 : Répartition géographique des groupes ethno-linguistiques du BVN	51
Figure 5-1 : Evolution mensuelle des températures en fonction des écorégions	74
Figure 5-2 : Anomalie thermométrique journalière dans (a) la zone forestière, (b) la zone préforestière, (c) la zone soudanaise et (d) l’ensemble du BVN.....	75
Figure 5-3 : Evolution mensuelle des précipitations et de l’évapotranspiration de référence en fonction des écorégions	76
Figure 5-4 : Anomalie pluviométrique mensuelle dans (a) la zone forestière, (b) la zone préforestière, (c) la zone soudanaise et (d) l’ensemble du BVN.....	77
Figure 5-5 : Anomalie pluviométrique annuelle dans (a) la zone forestière, (b) la zone préforestière, (c) la zone soudanaise et (d) l’ensemble du BVN.....	78
Figure 5-6 : Anomalie hygrométrique journalière dans (a) la zone forestière, (b) la zone préforestière, (c) la zone soudanaise et (d) l’ensemble du BVN.....	79
Figure 5-7 : Evolution mensuelle du nombre de feux détectés et des surfaces brûlées dans (a) la zone forestière, (b) la zone préforestière, (c) la zone soudanaise et (d) l’ensemble du BVN	82
Figure 5-8 : Evolution annuelle du nombre de feux et des surfaces brûlées dans (a) la zone forestière, (b) la zone préforestière, (c) la zone soudanaise et (d) l’ensemble du BVN	85
Figure 5-9 : Distribution spatiale des feux actifs (a) et des surfaces brûlées (b) dans le BVN sur la période 2001-2016.....	86
Figure 5-10 : Fréquence des feux par sous-préfecture	89
Figure 5-11 : Carte de densité de feux de 2001 à 2016 du BVN	90
Figure 5-12 : Anomalie annuelle des foyers de feux dans (a) la zone forestière, (b) la zone préforestière, (c) la zone soudanaise et (d) l’ensemble du BVN.....	91
Figure 5-13 : Anomalie annuelle des surfaces brûlées dans (a) la zone forestière, (b) la zone préforestière, (c) la zone soudanaise et (d) l’ensemble du BVN.....	92
Figure 5-14 : Corrélogramme des variables pyrologiques et climatiques au niveau de la (a) zone forestière, (b) zone préforestière, (c) zone soudanaise et (d) l’ensemble du BVN	95

Figure 5-15 : Dendrogramme des données pyrologiques et climatiques mensuelles dans (a) la zone forestière, (b) la zone préforestière, (c) la zone soudanaise et (d) l'ensemble du BVN ..	99
Figure 5-16 : Dendrogramme des données pyrologiques et climatiques annuelles dans (a) la zone forestière, (b) la zone préforestière, (c) la zone soudanaise et (d) l'ensemble du BVN	100
Figure 5-17 : Courbes de lissage des covariables modélisant le nombre de feux dans (a) la zone forestière, (b) la zone préforestière, (c) la zone soudanaise et (d) l'ensemble du BVN.....	105
Figure 5-18 : Courbes de lissage des covariables modélisant les surfaces brûlées dans (a) la zone forestière, (b) la zone préforestière, (c) la zone soudanaise et (d) l'ensemble du BVN	110
Figure 5-19 : Fonctions d'autocorrélation et d'autocorrélation partielle du nombre de feu (A, B) et des surfaces brûlées (C, D) par écorégion	122
Figure 5-20 : Résidus des modélisations de l'occurrence des feux par SARIMA dans (a) la zone forestière, (b) la zone préforestière, (c) la zone soudanaise et (d) l'ensemble du BVN.....	125
Figure 5-21 : Résidus des modélisations des surfaces brûlées par SARIMA dans (a) la zone forestière, (b) la zone préforestière, (c) la zone soudanaise et (d) l'ensemble du BVN.....	126
Figure 5-22 : Prévision SARIMA de l'occurrence des feux dans (a) la zone forestière, (b) la zone préforestière, (c) la zone soudanaise et (d) l'ensemble du BVN	127
Figure 5-23 : Prévision SARIMA des surfaces brûlées dans (a) la zone forestière, (b) la zone préforestière, (c) la zone soudanaise et (d) l'ensemble du BVN.....	128

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Contribution du brûlage de la biomasse aux émissions globales du carbone	23
Tableau 2-2 : Dégâts occasionnés par les feux de brousse en Côte d’Ivoire de 1983 à 2004..	27
Tableau 3-1 : Catégorisation de la densité de la canopée	52
Tableau 3-2 : Catégorisation du NDVI	53
Tableau 3-3 : Stations météorologiques de l’étude	53
Tableau 4-1 : Catégorisation de l’Indice Standardisé des Précipitations	58
Tableau 4-2 : Variables météorologiques et climatiques utilisées	66
Tableau 4-3 : Récapitulatif des localités enquêtées	70
Tableau 5-1 : Tendances des séries climatiques en fonction des écorégions	80
Tableau 5-2 : Ruptures des séries pluviométriques et hygrométriques en fonction des écorégions.....	81
Tableau 5-3 : Variation du nombre de feux et des surfaces brûlées en fonction du mois.....	84
Tableau 5-4 : Evolution du nombre de feux et des surfaces brûlées en fonction des années...	87
Tableau 5-5 : Evolution des feux en fonction des écorégions.....	88
Tableau 5-6 : Tendances du nombre de feux et des surfaces brûlées selon les écorégions	93
Tableau 5-7 : Résumé des corrélations CCF significatives identifiées entre le nombre de feux et les variables pyrologiques en fonction des écorégions	96
Tableau 5-8 : Résumé des corrélations CCF significatives identifiées entre les surfaces brûlées et les variables pyrologiques en fonction des écorégions	98
Tableau 5-9 : Modèles GAM pour le nombre de feux détectés par écorégion	102
Tableau 5-10 : Modèles GAM pour les surfaces brûlées par écorégion	107
Tableau 5-11 : Evolution des feux en fonction du type d’occupation du sol.....	112
Tableau 5-12 : Evolution des feux en fonction des catégories des terres du GIEC	113
Tableau 5-13 : Evolution des feux en fonction de la densité de la canopée	113
Tableau 5-14 : Evolution des feux en fonction de l’indice de végétation.....	114
Tableau 5-15 : Evolution des feux en fonction de l’altitude	115
Tableau 5-16 : Evolution des feux en fonction de la pente	115
Tableau 5-17 : Evolution des feux en fonction de l’orientation du terrain	116
Tableau 5-18 : Evolution des feux en fonction des types de sols	117
Tableau 5-19 : Evolution des feux en fonction des groupes de sols	117
Tableau 5-20 : Evolution des feux en fonction de l’accessibilité aux villes	118
Tableau 5-21 : Evolution des feux en fonction de la proximité aux localités	118
Tableau 5-22 : Evolution des feux en fonction de la distance au réseau routier.....	119
Tableau 5-23 : Evolution des feux en fonction de la densité de population	119
Tableau 5-24 : Résumé des tests ADF et KPSS des séries pyrologiques	120
Tableau 5-25 : Résumé des modèles SARIMA des séries temporelles $\log(NF+1)$ et $\log(SB+1)$	123
Tableau 5-26 : Analyse des résidus des séries pyrologiques par écorégion.....	124
Tableau 5-27 : Caractéristiques sociales de la population enquêtée par localité	129
Tableau 5-28 : Perceptions de l’évolution des paramètres climatiques	131

Tableau 5-29 : Perceptions des causes de l'évolution du climat.....	132
Tableau 5-30 : Perceptions de l'évolution des feux de végétation.....	133
Tableau 5-31 : Perceptions des causes des feux de brousse.....	133
Tableau 5-32 : Impacts du changement climatique sur les cultures.....	134
Tableau 5-33 : Impacts du changement climatique sur les hommes et leurs aménagements	135
Tableau 5-34 : Impacts des feux de végétation sur les cultures	135
Tableau 5-35 : Stratégies d'adaptation développées face aux impacts climatiques sur les cultures	137
Tableau 5-36 : Stratégies d'adaptation développées face aux impacts du changement climatique sur les hommes et leur habitat	138
Tableau 5-37 : Stratégies de prévention développées face aux feux de brousse.....	139

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

°	: Degré
°C	: Degré Celsius
ACF	: Autocorrelation function (ou fonction d'autocorrélation)
ADF	: Dickey-Fuller Augmenté
AI	: Indice d'Angstrom
AIC	: Critère d'information d'Akaike
AICc	: Critère d'information d'Akaike corrigé
A _{NF}	: Anomalie de nombre de feux
AR	: Autorégressif non-saisonnier
ARIMA	: AutoRegressive Integrated Moving Average (ou autorégressif à moyenne mobile intégrée)
ARMA	: AutoRegressive Moving Average (ou autorégressif à moyenne mobile)
A _{SB}	: Anomalie de surfaces brûlées
AT	: Amplitude thermique
ATSR	: Along Track Scanning Radiometer
AVHRR	: Advanced Very High Resolution Radiometer
BNETD	: Bureau National d'Etudes Techniques et de Développement
BVN	: Bassin versant du N'Zi
CCF	: Cross-correlation function (ou fonction de corrélation croisée)
CCF _{max}	: Valeur maximale de la fonction de corrélation croisée
CCNUCC	: Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
CFA	: Communauté Financière Africaine
CH ₄	: Méthane
CO	: Monoxyde de carbone
CO ₂	: Dioxyde de carbone ou gaz carbonique
d	: ordre de différenciation non saisonnière
D	: ordre de différenciation saisonnière
DEWP	: Point de rosée ou température de rosée
edf	: Degré de liberté effectif
EDP	: Ecole Doctorale Polytechnique
ENSO	: El Niño Southern Oscillation (El Niño Oscillation australe)
EOS	: Earth Observing System
ERS	: European Remote-Sensing Satellite
ET ₀	: Evapotranspiration de référence
EVI	: Enhanced Vegetation Index (Indice de végétation amélioré)
FAO	: Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
FDI	: Indice de risque de feu de Lowveld
FIRMS	: Fire Information for Resource Management System
GAM	: Generalized Additive Models (modèles additifs généralisés)
GCV	: Generalized Cross Validation (validation croisée généralisée)
GES	: Gaz à effet de serre

GIEC	: Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GOES	: Geostationary Operational Environmental Satellite
GPS	: Global Positioning System (système de positionnement global)
hab.	: Habitant
HCPC	: Classification Hiérarchique sur Composantes Principales
IC	: Intersection de Conover
ICRAF	: World Agroforestry Centre
INP-HB	: Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny
JERS	: Japan Earth Resources Satellite
JPL	: Jet Propulsion Laboratory
K	: Kelvin
km	: Kilomètre
km ²	: Kilomètre carré
KPSS	: Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin
LANCE	: Land, Atmosphere Near Real-Time Capability for EOS
log	: logarithme
MA	: Moyenne mobile non-saisonnaire
MAE	: Mean Absolute Error (ou Erreur moyenne absolue)
MAX	: Température maximale
MCD14DL	: Produit MODIS de feux actifs et d'anomalie thermique
MCD64A1	: MODIS Burned Area Product collection 6 (Produit MODIS de surfaces brûlées Collection 6)
MCO	: Moindre carré ordinaire
MERIS	: Medium Resolution Imaging Spectrometer
MIN	: Température minimale
MINEF	: Ministère des Eaux et Forêts
MNA	: Modèle numérique d'Altitude
MOD13A3	: MODIS Vegetation Index Product (Produit MODIS d'indices de végétation)
MODIS	: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MSU	: Michigan State University (Université d'Etat du Michigan)
MXSPD	: Vitesse maximale du vent
N ₂ O	: Oxyde nitreux
NASA	: National Aeronautics and Space Administration (Administration Nationale de l'Aéronautique et de l'Espace)
NDVI	: Normalized Difference Vegetation Index (ou indice de végétation normalisé)
NF	: Nombre de feux
NOAA	: US National Oceanic and Atmospheric Administration
NRT	: Near Real Time
ODK	: Open Data Kit
OMM	: Organisation Météorologique Mondiale
ONPC	: Office Nationale de la Protection civile
p	: Ordre de la partie autorégressive non saisonnière
P	: Ordre de la partie autorégressive saisonnière

PACF	: Partial autocorrelation (ou fonction d'autocorrélation partielle)
PNUE	: Programme des Nations unies pour l'environnement
PRCP	: Précipitation totale
PROBA-V	: Project for On-Board Autonomy - Vegetation
q	: Ordre de la partie moyenne mobile non saisonnière
Q	: Ordre de la partie moyenne mobile saisonnière
Q*	: Statistique du test de Ljung-Box
REDD+	: Réduction des émissions de GES issues de la déforestation et de la dégradation forestière, associées à la gestion durable des forêts, la conservation et l'amélioration des stocks de carbone forestier
RGPH	: Recensement Général de la Population et de l'Habitat
RH	: Humidité relative moyenne
rho	: Coefficient de corrélation de rangs de Spearman
RMSE	: Erreur quadratique moyenne (ou root-mean-square error)
S	: Période
SAR	: Autorégressif saisonnier
SARIMA	: Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average (ou autorégressif à moyenne mobile intégrée saisonnière)
SARIMAX	: SARIMA with external variables (ou SARIMA avec covariables)
SB	: Surfaces brûlées
SE	: Standard error (Ecart type)
SEP-REDD+	: Secrétariat Exécutif Permanent de la Coordination Nationale REDD+
SLP	: Pression réduite au niveau de la mer
SMA	: Moyenne mobile saisonnière
SPI	: Anomalie pluviométrique
SPI1	: Anomalie pluviométrique à 1 mois
SPI3	: Anomalie pluviométrique à 3 mois
SPI6	: Anomalie pluviométrique à 6 mois
SPI9	: Anomalie pluviométrique à 9 mois
SPI12	: Anomalie pluviométrique à 12 mois
SPOT	: Satellite pour l'observation de la Terre
START	: Global Change SysTem for Analysis, Research and Training
Suomi-NPP	: NASA / NOAA Suomi-National Polar-Orbiting Partnership
TMOY	: Température moyenne
UFHB	: Université Félix Houphouët-Boigny
UNA	: Université Nangui Abrogoua
USA	: United State of America (Etats Unis d'Amérique)
VDP	: Déficit de saturation
VIIRS	: Visible Infrared Imager Radiometer Suite
VISIB	: Visibilité moyenne
VNP14IMGTDL	: Produit VIIRS de feux actifs et d'anomalie thermique
W	: Statistique du test de Wilcoxon
WDSP	: Vitesse moyenne du vent
χ^2	: khi-deux

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Cadre légal et réglementaire de la prévention et de la lutte contre les feux de brousse en Côte d'Ivoire.....	185
Annexe 2 : Fiche de vérité terrain pour le suivi des feux de végétation	186
Annexe 3 : Diagramme ombrothermique des stations au sein du bassin versant du N'Zi.....	187
Annexe 4 : Test de normalité de Shapiro-Wilk et Jarque-Bera des données pyrologiques ...	188
Annexe 5 : Distribution des surfaces brûlées mensuellement (a) et annuellement (b) en fonction des catégories de surfaces	189
Annexe 6 : Evolution des feux en fonction des heures et jours d'apparition.....	190
Annexe 7 : Distribution spatiale mensuelle des foyers des feux.....	191
Annexe 8 : Distribution spatiale mensuelle des surfaces brûlées.....	193
Annexe 9 : Distribution spatiale annuelle des foyers de feux de végétation.....	195
Annexe 10 : Distribution spatiale annuelle des surfaces brûlées	197
Annexe 11 : Distribution par sous-préfecture des (a) foyers de feux, (b) surfaces brûlées, (c) densités de feux et (d) proportions brûlées.....	199
Annexe 12 : Séries observées et simulées pour (a) les foyers de feux et (b) les surfaces brûlées en fonction des écorégions	200
Annexe 13 : Evaluation des erreurs de prévisions des (a) foyers de feux et (b) surfaces brûlées en fonction des écorégions	201
Annexe 14 : Prévisions du nombre de feux $[\log(NF+1)]$ et des surfaces brûlées $[\log(SB+1)]$ par ARIMA dans la zone forestière.....	202
Annexe 15 : Prévisions du nombre de feux $[\log(NF+1)]$ et des surfaces brûlées $[\log(SB+1)]$ par ARIMA dans la zone préforestière.....	203
Annexe 16 : Prévisions du nombre de feux $[\log(NF+1)]$ et des surfaces brûlées $[\log(SB+1)]$ par ARIMA dans la zone soudanaise	204
Annexe 17 : Prévision du nombre de feux $[\log(NF+1)]$ et des surfaces brûlées $[\log(SB+1)]$ par ARIMA dans l'ensemble du BVN	205
Annexe 18 : Perceptions des mois dans lesquels les risques de feu sont élevés	207
Annexe 19 : Perceptions des indicateurs de haut risque de feux de brousse.....	207
Annexe 20 : Article publié	208
Annexe 21 : Liste de publications et communications issues de la thèse	228

INTRODUCTION

Contexte général

Les feux de végétation sont reconnus comme l'une des perturbations écologiques les plus répandues dans le monde, à l'instar des catastrophes naturelles telles que les sécheresses, les inondations ou les ouragans [1,2]. Chaque année, 350 millions d'hectares de végétation brûlent à travers le monde, dont près de la moitié en Afrique subsaharienne [3–5]. Ces incendies contribuent au réchauffement climatique, à la désertisation, à la pollution de l'air et de l'eau, à la perte de biodiversité et causent d'importants dégâts matériels et des pertes en vies humaines [1,6–8].

Le climat influence fortement l'activité des incendies à l'échelle mondiale, et les récentes vagues d'incendies dans certaines régions du monde ont été attribuées au changement climatique [9,10].

Selon le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat (GIEC ou *Intergovernmental Panel on Climate Change* – IPCC en anglais), les changements climatiques sont le plus grand et peut-être le plus critique de tous les défis environnementaux auxquels font face les sociétés dans le siècle présent [11]. La température de surface moyenne globale au niveau des terres émergées a augmenté de 0,85 °C au cours de la période 1880-2012, avec les températures les plus chaudes jamais enregistrées au cours des trois dernières décennies [11]. Depuis 1980, les mois de mars 2016 (+1,30 °C) et mars 2017 (+1,12 °C) sont les mois les plus chauds et l'année 2016 (+0,99 °C), l'année la plus chaude jamais enregistrés au niveau terrestre [12,13]. De plus, le GIEC prévoit une augmentation alarmante de la température de +1 à +2 °C à l'horizon 2050 et une intensification des épisodes climatiques extrêmes lors des prochaines décennies [11]. Ces augmentations de la température liées au changement et à la variabilité climatiques présentent un défi croissant pour les pays en développement [14]. Ils amplifient les impacts négatifs sur l'environnement, l'économie et la société en particulier sur les paysages et les agriculteurs ruraux en Afrique [15–17]. En outre, ces changements contribuent à une augmentation de la survenance des phénomènes naturels à risques tels que les incendies de végétation [11].

Les feux représentent un facteur important dans l'évolution des écosystèmes forestiers [18,19]. En fonction des écorégions et des saisons, ils sont considérés comme un outil d'aménagement des paysages et de gestion durable des ressources naturelles du milieu [20]. En dépit de ces atouts, les feux de végétation engendrent d'importants dommages sur les ressources naturelles [20]. Ils détruisent la matière organique et entraînent l'érosion et le lessivage des sols provoquant la déplétion de la productivité des cultures et des zones de pâturage [19,20].

Aussi, les feux impactent significativement la diversité biologique en détruisant la faune et la flore et en occasionnant l'apparition de nouvelles espèces dites pyrophiles [20]. Ils participent considérablement à la pollution de l'atmosphère par l'émission de gaz à effet de serre (GES). Globalement, les feux brûlent 5 130 millions de tonnes de végétation, dont 42 % en Afrique [5]. Cette combustion libère environ 3 431 millions de gaz carbonique (CO₂) ainsi que d'importantes quantités d'autres GES [5]. Ainsi, 40 %, 32 % et 10 %, respectivement des émissions de gaz carbonique (CO₂), de monoxyde de carbone (CO) et de méthane (CH₄) à l'échelle mondiale sont imputées aux feux de végétation [20,21]. Ces gaz modifient les caractéristiques physico-chimiques de l'atmosphère terrestre affectant directement le bilan radiatif et le réchauffement climatique, et indirectement la dégradation des sols [20,22].

En Afrique subsaharienne, plus de 90 % des feux de brousse sont d'origine anthropique [23–26]. Leur dynamique dans le paysage est l'un des sujets les plus abordés par la communauté scientifique au regard de l'effet du phénomène sur toutes les composantes de l'environnement, notamment la végétation, la faune, le sol, l'eau et l'air. En effet, les impacts du changement climatique se font déjà sentir dans plusieurs régions au niveau continental par l'augmentation de la fréquence, de l'intensité ou de la taille des incendies et donc de l'ampleur des dégâts [11]. En Afrique de l'Ouest, ces changements se produisent rapidement au niveau local. Dans un scénario statu quo, les prévisions d'augmentation de la température s'évaluent à 2,1 °C à l'horizon 2070 au niveau régional et en Côte d'Ivoire [11,27,28]. Ces prévisions couplées à une variabilité accrue des précipitations occasionnent de façon récurrente des incendies difficilement contrôlables [11,28]. De plus, certains auteurs estiment que les surfaces susceptibles de brûler pourraient augmenter de 50 % à plus de 100 % au cours de ce siècle, selon l'intensité du réchauffement climatique [11,27]. Dans les zones déjà exposées aux feux de végétation, la durée de la saison des feux et le nombre de jours où le risque de feu est élevé sont susceptibles d'augmenter en raison de l'allongement des périodes sans pluie [27,29]. Face à ces changements et prévisions alarmantes, des politiques de prévention et de contrôle doivent se fonder sur une bonne compréhension des facteurs qui provoquent les départs de feu et leur propagation, ainsi que les impacts humains, environnementaux et socio-économiques causés par ces feux.

Au regard des projections climatiques montrant une perpétuelle péjoration et face aux exigences d'élaboration de stratégies de gestion des incendies et d'adaptation futures au climat, il est important de comprendre les perceptions des populations locales sur les mutations de leur environnement et les stratégies adoptées. Cette évaluation permettra d'élaborer des outils fiables de prévision au niveau local et régional dans un contexte du changement climatique,

d'où l'intérêt de cette thèse portant sur le thème : « *Variabilité climatique, dynamique des feux de végétation et perceptions locales dans le bassin versant du N'Zi (Centre de la Côte d'Ivoire)* ».

Cette thèse vise particulièrement à évaluer l'évolution du climat et des feux de végétation, en rapport avec la perception des agriculteurs locaux dans le bassin versant du N'Zi (BVN) au cours de ces quarante dernières années (1973-2016). Pour y parvenir, plusieurs méthodes et approches ont été utilisées. L'analyse est basée sur les tendances du climat, des feux de végétation, et enfin sur les perceptions des populations locales. La démarche utilisée est axée sur l'analyse statistique de données issues des images satellitaires, des stations météorologiques et des enquêtes et des observations sur le terrain.

En effet, le BVN a un poids important dans l'économie ivoirienne (forte activité agricole). Cependant, il subit les impacts du changement climatique et ses corollaires, dont les feux de brousse.

Justification de l'étude et du choix du site

Ces dernières décennies, la moitié nord de la Côte d'Ivoire est parcourue par des feux de brousse de plus en plus incontrôlables et dévastateurs [30]. Les récentes études sur les moteurs de la déforestation en Côte d'Ivoire ont montré que les feux de végétation représentent 3 % et 23 % des facteurs directs de déforestation et de dégradation forestière, respectivement [31]. Ces feux de végétation causent des dégâts sur les activités, les vies humaines et animales et ont un coût social et économique très élevé [5,32]. En effet, le pays connaît chaque année, autour des mois de janvier et février, un pic des feux de brousse qui ravagent des centaines de milliers d'hectares de terres propices à l'agriculture. Durant la saison sèche 1982/83, de violents feux de végétation ont éclaté en Côte d'Ivoire faisant plus de 100 morts et d'impressionnants dégâts agricoles et environnementaux [2,33]. Pour l'année 2016, les feux de végétation ont ravagé plus de 15 000 ha de cultures agricoles, 11 000 ha de forêts, 200 cases dans 10 villages et causé la mort de 17 personnes [34]. Les préjudices financiers liés à ces dégâts sont estimés à près de 204 milliards de francs CFA [34].

Malgré les campagnes de sensibilisation, la création et l'équipement des comités villageois de lutte, l'administration forestière reste toujours impuissante face à la gestion des feux [34,35].

Il convient toutefois de noter que la majorité des feux de végétation ont lieu dans les zones centre et nord, au-dessus du « V Baoulé » dont la végétation est dominée par les savanes (zones préforestière et soudanaise) ; d'où l'appellation par abus de « feux de brousse », même si ces

feux parcourent aussi les forêts denses sèches et semi-décidues à la lisière des savanes. Le régime de ces feux diffère selon le paysage et la saison [10,36].

Cependant, la dynamique des incendies dans ces régions est encore mal comprise malgré les travaux réalisés sur plus de 40 ans à Konkondékro [37–40] et dans la réserve scientifique de Lamto [41–44]. Très peu de choses sont connues sur le régime des feux de végétation, les facteurs influençant leur propagation, la prévision des impacts du fléau et les émissions associées dues à la combustion de la biomasse. Le manque de politiques nationales de surveillance des incendies rend peu fiables les quelques statistiques disponibles sur les incendies. Ces statistiques sont, par conséquent, difficilement exploitables, car elles manquent de précision au niveau local et régional.

Le BVN, par sa configuration, se situe à cheval sur plusieurs secteurs agroécologiques qui constituent de véritables bassins agricoles en mutation. Elle est considérée comme la Côte d'Ivoire en miniature au regard de sa flore. Aujourd'hui, en plus du café et du cacao, elle accueille d'autres cultures comme l'hévéa et l'anacardier. Cette région subit l'impact des variations climatiques au regard de l'existence de poches de sécheresse et de nombreux feux de brousse occurring chaque année en période sèche. Plusieurs études ont révélé une tendance baissière au sein des précipitations et une variabilité de la température à travers les différentes zones agroécologiques [45–49]. Bien que l'influence du changement climatique sur les incendies de forêt ait été étudiée à l'échelle mondiale, des incertitudes demeurent quant à cette influence au niveau régional et hyper-régional [50].

Ainsi, paraît-il opportun d'évaluer les relations complexes qui existent entre la variabilité climatique et les feux de végétation, de recueillir les perceptions des agriculteurs face à ces fléaux et de procéder à la simulation et à la prévision de l'activité pyrologique pour contribuer à la prise de décision optimale au niveau local.

Afin de caractériser davantage les feux de végétation et leurs effets, leur répartition spatio-temporelle et leur fréquence sur plusieurs périodes méritent d'être connues [20]. La télédétection, grâce à sa vue synoptique, présente une opportunité unique d'analyse et d'identification des impacts des feux de végétation [51]. Elle est actuellement la méthode la plus utilisée pour détecter les points de feux actifs et calculer les aires brûlées ainsi que le degré de perturbations du milieu [52–54]. Les méthodologies utilisées pour estimer les zones brûlées à l'aide de données satellitaires sont basées sur l'identification d'une signature spectrale post-feu par divers algorithmes de détection de changement et de classification d'images. Ces méthodes, en plus de la statistique prédictive, ont permis des avancées significatives pour

l'estimation et la prévision de l'occurrence des feux et des impacts liés à ces feux et les émissions associées de la combustion de la biomasse [52,53,55,56].

Objectifs de l'étude

La présente recherche vise à contribuer à la compréhension des mécanismes de prévention et de gestion des feux de végétation dans la perspective de la mise en place d'un système d'alerte précoce dans le centre de la Côte d'Ivoire dans le contexte du changement climatique.

Plus spécifiquement, il s'agit de :

1. caractériser le régime climatique au cours de ces quarante dernières années (1973-2016) ;
2. caractériser le régime rétrospectif des feux de végétation au cours des deux dernières décennies (2001-2016) en fonction des zones phytogéographiques ;
3. évaluer l'impact des facteurs climatiques et environnementaux sur la dynamique des feux de végétation ;
4. proposer des modèles statistiques efficaces pour simuler et prévoir l'activité des feux de végétation à court et moyen terme, en fonction des zones phytogéographiques ;
5. évaluer les perceptions des agriculteurs locaux sur le régime pyro-climatique et leur pertinence comparativement aux observations climatiques et pyrologiques.

Questions de recherche

La question principale qui se pose est : « La mesure scientifique des changements pyroclimatiques et des facteurs déterminants de l'activité des feux sont-elles conformes à la perception locale dans le bassin versant du N'Zi au cours des dernières décennies ? ». Les questions spécifiques identifiées sont :

1. Quelle est la variabilité climatique enregistrée dans le bassin versant du N'Zi au cours des 40 dernières années (1973-2016) ?
2. Quelle est la dynamique spatio-temporelle passée des feux de végétation dans la zone d'étude ?
3. Existe-t-il une relation entre les paramètres climatiques et environnementaux et le régime des feux de végétation ?
4. Comment se comportera le régime des feux de végétation dans le bassin versant étudié à des dates futures ?
5. Les communautés locales perçoivent-elles les changements pyroclimatiques intervenus dans leur milieu ?

Hypothèses de recherche

L'hypothèse principale de cette étude est : « les facteurs climatiques et environnementaux influencent l'activité des feux et les perceptions des populations locales du régime pyroclimatique correspondent aux mesures scientifiques ». Ainsi, les hypothèses secondaires identifiées sont :

1. les paramètres climatiques présentent une tendance générale à la péjoration dans la zone d'étude depuis la décennie 1970 ;
2. l'activité des feux de végétation a augmenté significativement au fil des années depuis le début du 21^e siècle ;
3. les paramètres climatiques et environnementaux influencent significativement l'activité des feux dans le bassin étudié ;
4. le régime futur des feux de végétation variera en fonction des variations climatiques ;
5. les populations locales présentent une bonne perception de l'évolution du régime pyroclimatique concordant à l'analyse des données scientifiques, et diverses stratégies d'adaptation sont développées par les populations pour faire face à ces changements.

Outre l'introduction, la conclusion, les références bibliographiques et les annexes, cette thèse est articulée en trois grandes parties composées chacune de deux chapitres :

- la première partie présente les généralités sur le changement et la variabilité climatiques (chapitre 1) et les feux de végétation (chapitre 2) ;
- la deuxième partie présente le matériel (chapitre 3) et les méthodes (chapitre 4) ;
- la troisième partie est consacrée à la présentation des principaux résultats (chapitre 5) qui ont fait l'objet de discussion (chapitre 6).

PREMIERE PARTIE : SYNTHESE
BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LE CHANGEMENT ET LA VARIABILITE CLIMATIQUES

1.1. DEFINITIONS DE QUELQUES TERMES ET CONCEPTS CLIMATIQUES

De nombreuses définitions relatives aux concepts du changement climatique et des stratégies d'adaptation sont proposées par la communauté scientifique. Ce travail retiendra les définitions proposées par la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) [57], et le GIEC [11,15]. Leur portée a été précisée afin de contextualiser la compréhension des idées développées.

Changement climatique : La CCNUCC [57], dans son article premier, définit les changements climatiques comme « des changements qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables ».

Variabilité climatique : Elle est un des éléments intégrateurs du changement global. Selon la CCNUCC [57], la variabilité climatique désigne les changements climatiques d'origine naturelle. Elle fait pressentir la mobilité ou la variation du schéma climatique moyenne et d'autres statistiques (écarts moyens, normales, phénomènes extrêmes, etc.) du climat à toutes les échelles temporelles et spatiales au-delà des phénomènes climatiques individuels. La variabilité peut être due à des processus internes naturels au sein du système climatique (variabilité interne), ou à des variations des forçages externes anthropiques [15]. La variabilité du climat est souvent perçue à travers l'irrégularité des paramètres climatiques dans leur évolution. Dans ce travail, il s'agit de caractériser les cycles interannuels et les tendances du climat.

Perception locale : La perception locale ou paysanne des phénomènes climatiques peut être définie comme la façon des agriculteurs et communautés locales de comprendre, de représenter ou d'interpréter les changements du climat qu'ils observent. La perception locale contrôlera en partie la sensibilisation, les objectifs et les méthodes à appliquer dans les actions pratiques [58].

Stratégies d'adaptation : L'adaptation est définie comme « l'ajustement dans les systèmes naturels ou humains en réponse au climat actuel ou futur, ou à leurs effets qui atténue les dommages ou en valorise les bénéfiques » [11,15].

Atténuation : L'atténuation désigne les politiques et les options visant à réduire les émissions de GES et à restaurer ou renforcer les capacités de puits de carbone des écosystèmes et agroécosystèmes qui absorbent le carbone ou le dioxyde de carbone atmosphérique [15].

Risque : Le risque est défini comme la probabilité d'occurrence d'événements dangereux ou de conséquences préjudiciables résultant d'interactions entre des aléas naturels ou causés par l'homme et des conditions de vulnérabilité [59]. Le risque lié au climat est une combinaison de trois facteurs à savoir l'aléa, l'exposition et la vulnérabilité [11]. L'**aléa** est un phénomène dangereux pouvant causer des impacts néfastes. Le terme «**exposition**» fait référence à la présence de personnes, de services, d'infrastructures et de biens sociaux, économiques ou culturels dans un lieu susceptible de subir des dommages [11]. La «**vulnérabilité**» fait référence aux caractéristiques et circonstances d'une communauté ou d'un système qui le rendent susceptible de subir les effets d'un danger [59].

Résilience : La résilience peut être définie comme l'habilité des personnes, des lieux et des écosystèmes exposés de sortir des stressés et de lutter seuls contre ces stressés et s'adapter aux stressés et perturbations futures. Elle présente deux aspects à savoir :

- identifier les risques des effets actuels, progressifs et à long terme du changement climatique ;
- concevoir des mesures pour réduire ces risques, les transférer et s'y préparer.

1.2. CHANGEMENT ET VARIABILITE CLIMATIQUES EN AFRIQUE DE L'OUEST

1.2.1. Situation climatique en Afrique de l'Ouest

L'Afrique est l'un des continents les plus vulnérables au changement du climat. Les études sur le changement climatique en Afrique de l'Ouest, en particulier la pluviométrie, sont en perpétuellement croissance [60–62]. Depuis plus de trois décennies, cette région fait face à une variabilité climatique sans précédent à l'échelle historique. Plusieurs études ont été menées au niveau régional sur l'analyse du changement climatique et de ses caractéristiques, en particulier la mousson ouest-africaine qui dépend de la configuration des précipitations dans la région [63,64]. La conséquence immédiate est la baisse des précipitations annuelles en cours depuis la fin des années 1960, avec une diminution de 20 à 40 % entre les périodes 1931-1960 et 1968-1990 [65,66]. Dans les régions semi-arides et subhumides d'Afrique de l'Ouest, les précipitations ont connu la même tendance, avec une période de fortes pluies dans les années 1950 et 1960, suivie d'une baisse significative dans les années 1970 et au début des années 1980 [63]. Dans cette région, une augmentation de la température de 0,2 à 0,8 °C a été notée depuis la fin des années 1970. Cette augmentation thermométrique est plus marquée au niveau des minimales que des maximales [67].

En Côte d'Ivoire, ces conséquences sont certes moins marquées qu'en zone sahélienne, mais elles induisent des évolutions socio-économiques non négligeables [32,45,49]. Goula *et al.* [46] et Assemian *et al.* [68] ont noté une diminution des précipitations de 10 à 30 % dans plusieurs régions du pays.

Selon le GIEC, la région devrait être confrontée à l'horizon 2050 à l'effet combiné de la hausse des températures (+2 °C), de la variation des précipitations (-9 % en mai et +9 % en octobre) et de la montée des eaux des océans (30 cm) [11].

1.2.2. Impacts du changement climatique

1.2.2.1. Changement climatique et agriculture

L'Afrique de l'Ouest est l'une des régions du monde les plus vulnérables à la variabilité climatique [11,28]. Cette vulnérabilité est aggravée par plusieurs facteurs de stress, dont la dépendance de l'agriculture vis-à-vis des précipitations, la sécheresse récurrente, la pauvreté, la démographie galopante et la faible capacité d'adaptation [69].

La situation climatique est beaucoup plus désastreuse au niveau du Sahel en raison de sa proximité au désert saharien et de la forte dépendance de sa population à l'agriculture pluviale et à l'élevage [16,61,70,71].

Dans ce contexte, Connolly-Boutin et Smit [72], Verhagen *et al.* [73] et Paeth *et al.* [74] ont mis en exergue l'impact du changement climatique sur la sécurité alimentaire à travers des indicateurs et des scénarii en Afrique de l'Ouest. Les sécheresses, les vagues de chaleur et les inondations ont réduit le rendement des cultures et la productivité du bétail.

La diminution des précipitations enregistrée en Afrique de l'Ouest depuis les années 1970 a entraîné une baisse de la production agricole qui en dépend [75–77]. De plus, la variabilité climatique a occasionné la migration de la boucle du cacao du Sud-Est au Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire [78].

1.2.2.2. Changement climatique et environnement

Les zones arides et semi-arides, en particulier la zone sahélienne, ont subi de profonds changements suite aux aléas climatiques en cours depuis les années 1970 [79]. En effet, les sécheresses majeures se sont accompagnées d'une dégradation des sols avec la disparition progressive de la végétation naturelle et l'extension des zones dénudées et des croûtes superficielles [79]. Ces changements environnementaux ont été accélérés par les activités anthropiques, telles que la mise en cultures, les défrichages incontrôlés, les mauvaises pratiques

agricoles, le surpâturage, etc. [71,80–82]. En plus des superficies, la composition floristique des écosystèmes forestiers a également changé [81].

Les zones plus humides et plus boisées ne sont pas laissées pour compte par ces changements environnementaux majeurs. Des études antérieures menées localement en Afrique de l'Ouest ont également fourni des taux de changement significatifs dans les unités de paysage forestier [79,83–85]. Selon la FAO [86], l'Afrique de l'Ouest a perdu 1,12 % de sa couverture forestière entre 2000 et 2010. Au niveau local, les pertes nettes de couverture forestière pour la période 2000-2010 sont alarmantes : Togo (-5,1 %), Nigéria (-3,7 %) et Ghana (-2,1 %). En Côte d'Ivoire, le taux annuel de déforestation est estimé à -4,32 % sur la période 1990-2000 et à -2,69 % sur la période 2000-2015 [31,84].

En asséchant la végétation, le changement climatique entraîne une augmentation du danger météorologique de feux de végétation. En effet, le changement climatique affecte la durée et l'intensité des saisons sèches, et a par conséquent un impact sur la fréquence et la gravité des incendies [9,10]. Des températures plus élevées favorisent la transpiration des plantes et la diminution de l'eau contenue dans les sols [1,2]. La végétation s'asséchant, le risque de départ de feu est plus fort [1,2]. Dans certaines régions, le changement climatique devrait également entraîner une baisse de la pluviométrie durant les saisons propices aux incendies, aggravant le phénomène [11].

Plusieurs indices dont l'indice forêt météo (IFM), développé au Canada, et l'indice de risque de feu Lowveld permettent d'estimer le danger météorologique de feux de végétation en tenant compte de la probabilité de son éclosion et de son potentiel de propagation. Ces indices montrent une corrélation claire avec le nombre de départs de feu [30].

1.2.2.3. Changement climatique et ressources en eau

Les incidences des changements climatiques sur les ressources en eau sont plus complexes. Les principaux effets du changement climatique sur les systèmes fluviaux africains se reflètent dans les changements du cycle hydrologique. L'Afrique de l'Ouest est traversée dans son ensemble par de nombreux fleuves et rivières [79]. Le ruissellement de surface de ces fleuves est conditionné par les précipitations. L'irrégularité de l'écoulement est souvent accentuée par le ruissellement local et les conditions d'infiltration en fonction de l'état de surface du sol [46,79]. Les changements dans les précipitations totales, combinés aux changements dans l'utilisation des terres en Afrique de l'Ouest depuis les années 1970, ont entraîné une forte baisse du débit annuel moyen des principaux fleuves [47,79]. En Côte d'Ivoire, un déficit moyen de 21 % est enregistré au niveau des débits des fleuves Comoé et Sassandra [87].

La variabilité climatique a augmenté la fréquence et l'intensité des pluies extrêmes. Ces pluies occasionnent des inondations qui contaminent les sources d'eau douce.

Outre les facteurs climatiques, l'augmentation des besoins en eau est un facteur majeur dans le prélèvement de cette ressource [79,88]. Les sécheresses, de plus en plus fréquentes, ont considérablement affecté les surfaces habituellement inondables au niveau des cours d'eau [79]. Les estimations montrent que le niveau de certains grands fleuves ouest-africains a chuté de près de 60 % entre les périodes 1970-1980 [89–91]. Ainsi, la variabilité climatique a entraîné la baisse de la disponibilité de l'eau et la dégradation de la qualité de l'eau [69].

En Côte d'Ivoire, des études ont révélé une évolution ascendante des coefficients de tarissement de certains cours d'eau depuis les années 1970 [46,68]. De plus, la dégradation du couvert végétal contribue à l'envasement des rivières et des lacs, limitant ainsi les possibilités de culture et d'approvisionnement en eau pour les populations et le bétail [92,93].

1.2.2.4. Changement climatique et santé humaine

Les facteurs climatiques ont un impact sur les agents pathogènes, les hôtes, les vecteurs et la dynamique épidémiologique. Depuis des décennies, de nombreux décès et maladies sont imputés au changement climatique au regard des catastrophes naturelles qu'elles entraînent (vagues de chaleur, inondations, sécheresses, etc.) [94,95]. En outre, plusieurs maladies sont hautement sensibles aux facteurs climatiques (température et précipitations) [96]. La plupart d'entre elles sont des maladies à transmission vectorielle telles que le paludisme et la dengue, ainsi que d'autres causes principales de mortalité, telles que la malnutrition, les maladies diarrhéiques et les pathologies respiratoires [97–101]. De plus, des auteurs ont montré une corrélation significative entre l'incidence de la méningite et les facteurs climatiques [102,103]. Les pluies extrêmes provoquent des inondations qui occasionnent également des noyades et des traumatismes physiques. Ces inondations endommagent les logements et perturbent la prestation des services de soins et de santé [96]. De plus, la sécheresse et les fortes pluies entraînant la contamination des eaux de surface constituent des facteurs importants d'infection liés à *Escherichia coli* [104,105] et à *Salmonella typhi* [106,107].

Par ailleurs, certains scientifiques pensent que le changement climatique impacte l'occurrence des maladies infectieuses transmises par l'eau ou les micromammifères. Omoleke *et al.* [108] ont observé que les facteurs climatiques ont impacté l'écllosion des épidémies d'Ebola en Afrique de l'Ouest [108]. La variabilité climatique à l'échelle locale ou régionale influence à la fois la dynamique temporelle et la synchronie spatiale des épidémies de choléra chez les populations humaines du golfe de Guinée [109].

CHAPITRE 2 : GENERALITES SUR LES FEUX DE VEGETATION

2.1. FEUX DE VEGETATION : DEFINITIONS, REGIME ET TYPOLOGIE

2.1.1. Définitions

Le feu résulte de la combustion de la végétation. Cette réaction chimique est provoquée par une source de chaleur d'origine naturelle ou humaine et nécessite un combustible et l'oxygène. Pour obtenir un feu, la présence de trois éléments est nécessaire : une source de chaleur, un combustible et l'oxygène [110].

Selon Otsuka *et al.* [111], les feux de végétation sont des sinistres qui se déclarent et se propagent dans des formations d'une surface d'au moins un hectare et pouvant être :

- des forêts : formations végétales dominées par les arbres et les arbustes, d'essences forestières, d'âges divers et de densités variables ;
- des formations subforestières : formations d'arbres feuillus ou de broussailles appelées maquis ou garrigue.

Par ailleurs, les feux de végétation peuvent être définis comme la propagation non contrôlée ou contrôlée d'un feu sur l'ensemble de la végétation (forêts, savanes, broussailles, prairies et terres cultivables). Selon le code de l'environnement ivoirien, les feux de brousse sont des feux allumés volontairement ou non, quelle qu'en soit l'ampleur, causant des dommages à l'homme et à ses biens, à la flore et à la faune. Dans le cadre de cette recherche, il sera couramment utilisé les termes « feux de brousse », « incendies de forêt » ou « incendies de végétation » pour désigner les « feux de végétation ».

2.1.2. Régime et indice de risque

L'étendue des effets du feu pour un endroit donné dépend du régime de feu présent. Le régime des feux décrit la nature des feux (structure, fréquence et intensité) qui prévalent dans une région pendant de longues périodes. Il est généralement décrit par les caractéristiques suivantes : fréquence, cycle, amplitude, type, étendue spatiale et saisonnalité. Ces termes sont définis comme suit [112–115] :

Fréquence : La fréquence décrit le nombre moyen de feux qui ont lieu sur une période de temps donnée et est souvent exprimée en termes d'intervalle de retour du feu. L'intervalle de retour du feu est le nombre moyen d'années entre deux apparitions successives de feu sur un point donné, ou sur une zone donnée, pour une période d'étude donnée.

Cycle : Le cycle du feu est le temps qu'il faut pour brûler une surface égale à celle de la zone considérée. C'est également ce que l'on appelle la rotation du feu. La taille de la zone doit être clairement spécifiée.

Amplitude: L'amplitude du feu est décrite en termes d'intensité et de sévérité. L'**intensité du feu** fait référence à la quantité d'énergie thermique dégagée par le feu par unité de temps. Elle peut souvent donner une bonne mesure des effets d'un feu. La **sévérité du feu** représente les effets du feu sur un site et peut être décrite par plusieurs paramètres (intensité du feu, hauteur des flammes, durée du feu, etc.). Elle peut également être mesurée après un feu par différents biais tel que le pourcentage de plantes brûlées, les effets sur les organismes dans le sol, la perte de nutriments dans le sol, la perte de qualité au niveau de l'eau, les émissions de fumée, etc.

Étendue spatiale : L'étendue spatiale fait référence à la taille et la zone couverte par un feu, ainsi que le motif spatial engendré.

Saisonnalité : La saisonnalité d'un feu est la période de l'année pendant laquelle les feux ont le plus de chance de partir et de se propager. La saisonnalité présente une grande importance au regard de sa relation avec l'humidité et la phénologie du combustible (végétation) et les dégâts induits par le feu.

Occurrence : L'occurrence des feux est le nombre de feux allumés dans un lieu donné pendant une période donnée.

Saison de feu : La saison de feu est définie comme la période de l'année au cours de laquelle les incendies de forêt sont les plus susceptibles de s'enflammer, de se propager et d'affecter les ressources du milieu. Le moment et la durée varient en fonction des régions phytogéographiques.

Indice de risque de feu : L'indice de risque d'incendie est un indice relatif indiquant les conditions influençant le déclenchement, le taux d'extension, la difficulté de contrôle et l'impact potentiel des feux de végétation.

2.1.3. Typologie des feux

Les feux peuvent être scindés en trois groupes selon la végétation incendiée, la période de mise à feu et la direction de la combustion [116–118].

Selon la composante de la végétation incendiée et les conditions climatiques, il existe trois principaux types de feu [119] à savoir :

- Les **feux de sol** brûlent sous la surface du sol dans un horizon épais de matière organique et de débris végétaux. Ils ont une faible vitesse de propagation puisqu'ils sont alimentés par incandescence avec combustion ;

- Les **feux de surface** brûlent les strates basses de la végétation comme la strate herbacée des formations de savanes et des forêts claires ;
- Les **feux de cime** qui se développent dans le houppier des arbres et arbustes et pourraient parfois être indépendants du feu de surface. Ils libèrent en général de grandes quantités d'énergie et leur vitesse de propagation est très élevée.

Selon la période de mise à feu, on distingue deux types de feux :

- Les **feux précoces** apparaissent en début de saison sèche. Leur progression est encore lente, à cause du taux élevé d'humidité de la végétation qui ne permet pas une combustion totale ;
- Les **feux tardifs** se propagent en pleine saison sèche (janvier à mars). Leur progression est plus rapide et plus violente par rapport aux feux précoces, étant donné que la végétation est totalement sèche, et que la teneur en eau est au plus bas.

En fonction de la direction et la pente de combustion, on distingue trois types de feux :

- les **feux ascendants** qui brûlent plus rapidement du fait que la pente est prononcée ;
- les **feux descendants** qui se propagent moins rapidement, bien qu'il existe un grand risque de sauts au versant suivant ;
- les **feux à plat** qui brûlent dans les zones dont la pente est très faible, voire nulle.

En fonction de l'origine, on distingue deux types de feux :

- les **feux naturels** occasionnés principalement par la foudre ;
- les **feux anthropiques** qui peuvent volontaires (criminels) ou accidentels.

En fonction du type de végétation atteinte, on distingue :

- les **feux de brousse** qui se propagent essentiellement dans les formations subforestières (broussailles, savanes, etc.) ;
- les **feux de forêt** qui se propagent essentiellement dans les formations forestières.

Selon la fonction attribuée au feu, on distingue :

- les **feux agricoles ou de débroussaillage** qui sont utilisés pour le brûlis des défrichements ou la préparation de terrains de cultures. ;
- les **feux coutumiers** qui sont allumés et contrôlés sur une superficie déterminée dans le but de respecter les besoins de tradition ;
- les **feux d'aménagement** qui sont allumés et contrôlés pour renouveler les pâturages, de conserver et de protéger les zones pastorales, les parcs nationaux, les réserves de faune, les forêts classées et les forêts protégées.

2.2. FACTEURS DE PROPAGATION DES FEUX DE VÉGÉTATION

La propagation du feu n'est pas le fruit du hasard, elle nécessite en effet qu'un certain nombre de conditions soient réunies. Une fois le feu allumé, sa propagation sera influencée par plusieurs facteurs, dont le type de combustible, la météorologie et la topographie [110,120,121]. L'Homme influence tous ces facteurs directement ou indirectement [10,122].

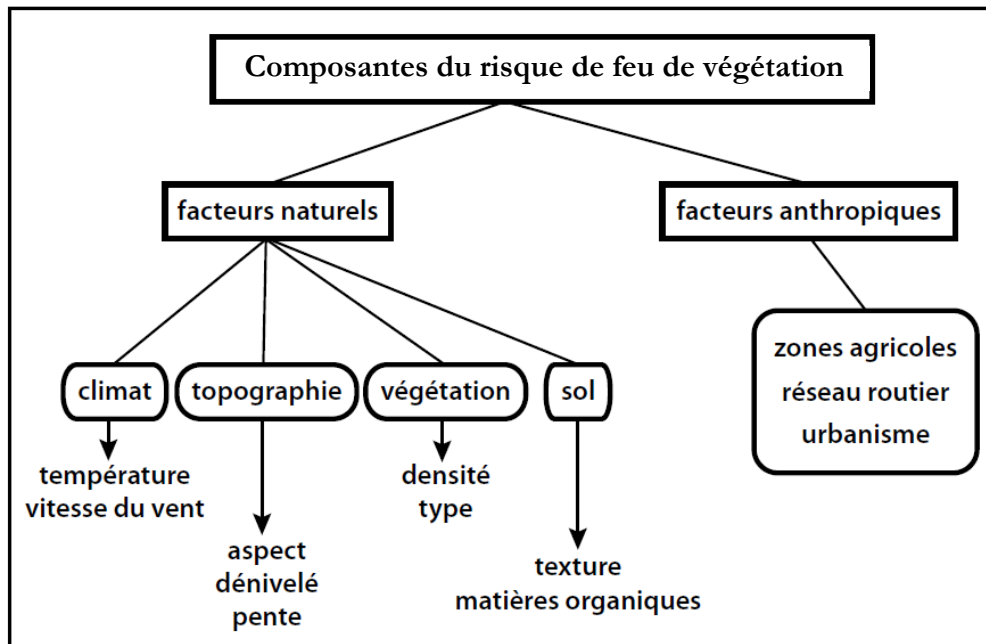


Figure 2-1 : Facteurs de propagation des feux de végétation, Darwich *et al.* [120]

2.2.1. Formations végétales

Le combustible et ses caractéristiques sont considérés comme l'un des facteurs importants qui influent sur le comportement du feu. En effet, chaque espèce végétale possède sa propre température d'inflammation à cause de sa constitution chimique. La quantité totale d'énergie libérée est en partie déterminée par la quantité du combustible [41,42]. En plus de la quantité, la compacité du combustible influence grandement la vitesse du feu. L'humidité du combustible affecte aussi énormément la facilité d'allumage, le taux de combustion et la vitesse de progression du feu [123]. Il a été observé qu'une teneur en eau supérieure à 30 % empêche toute propagation [124].

La structure des combustibles influence la combustion, on distingue la macrostructure et la microstructure. La macrostructure est la distribution spatiale horizontale et verticale des végétaux. On différencie quatre strates verticales [125] :

- la **litière**, généralement peu épaisse en zone forestière, très inflammable et est à l'origine d'un grand nombre de départs de feu difficiles à détecter du fait qu'ils propagent lentement ;

- la **strate herbacée**, la plus inflammable en saison sèche, le vent peut y propager le feu sur de grandes superficies ;
- les **ligneux bas**, d'une hauteur inférieure à deux mètres d'inflammabilité moyenne, elle transmet rapidement le feu aux strates supérieures ;
- les **ligneux hauts**, d'une hauteur supérieure à deux mètres. Rarement à l'origine d'un feu, elle permet cependant la propagation des flammes lorsqu'elle est atteinte.

La microstructure correspond, quant à elle, à l'arrangement spatial des organes végétaux plus fins (feuilles, aiguilles et rameaux). L'intensité du feu dépend également de la microstructure. Plus un combustible est finement divisé, plus la combustion est facilitée. A contrario, le tassement des feuilles au sol sous l'effet du vieillissement et des intempéries rend difficile la combustion.

Les facteurs anthropiques tels que la coupe du bois, le pâturage et la fauche peuvent également agir, soit individuellement soit collectivement, sur les caractéristiques du combustible et le comportement du feu.

2.2.2. Facteurs météorologiques

Les conditions climatiques de l'année et de celle qui précède jouent un rôle clé dans le niveau de risque d'incendie. La capacité de propagation du feu devient importante avec la baisse des précipitations, l'augmentation de la température et de la vitesse du vent et la diminution de l'hygrométrie [110].

2.2.2.1. Température de l'air

Le soleil est la principale source de chaleur. Les combustibles exposés au soleil chauffent plus rapidement que ceux sous couvert forestier. La température peut avoir une influence directe sur le réchauffement ou le refroidissement des combustibles ou indirecte sur la modification du taux d'humidité de l'atmosphère. De ce fait, les pics de température sont fortement redoutables, car la combustion de la végétation est facilitée [116,126].

2.2.2.2. Précipitations

La pluie est le facteur climatique le plus important qui influe sur le phénomène d'occurrence des feux. Ce ne sont pas les quantités d'eau tombées qui inhibent le phénomène d'occurrence des feux, mais plutôt leur rythme d'apparition (distribution saisonnière et régularité). L'effet des précipitations sur les feux de végétation dépend de la quantité de pluies tombées et leur distribution temporelle. En effet, une petite tranche de pluie bien répartie dans le temps a un meilleur effet inhibiteur de feu qu'une quantité importante de pluie précipitée sur une très courte

période de temps et de longues périodes sèches [116]. L'absence de précipitations pendant les périodes de sécheresse diminue non seulement l'humidité du combustible, mais provoque également une chute importante des feuilles due au stress hydrique [126].

2.2.2.3. Humidité relative

L'humidité relative peut être définie comme le rapport entre la quantité de vapeur d'eau qu'une unité d'air contient à une température donnée et la quantité de vapeur d'eau que l'unité d'air peut contenir à la même température et à la même pression. Une humidité relative élevée signifie qu'il y a un pourcentage élevé d'humidité dans l'air, et vice versa [126].

La quantité d'humidité dans l'air influe sur la quantité d'humidité dans les combustibles végétaux. L'humidité relative de l'air influe sur la teneur en humidité du combustible et la transpiration des végétaux. Elle est positivement corrélée avec l'humidité du combustible [126].

2.2.2.4. Vent

Le vent est la variable la plus dynamique influençant le comportement du feu. Il fournit plus d'oxygène au front du feu et affecte la vitesse à laquelle les combustibles sèchent devant le front du feu. Cela provoque un préchauffage à l'avant du feu au moyen du rayonnement des flammes, le préparant ainsi à l'allumage et favorisant la propagation du front du feu [126,127].

Une augmentation de la vitesse du vent augmentera la vitesse de séchage du combustible, tandis que la direction du vent déterminera la direction dans laquelle les arrières du front de feu et les têtes de feu se propageront. Plus le vent est fort, plus le taux de propagation d'un feu de tête qui brûle avec le vent sera rapide [126].

2.2.3. Facteurs topographiques

Les reliefs vallonnés créent des brise-vent, accélèrent le vent dans les zones de ravin et augmentent les vents thermiques topographiques (vent ascendant/ vallée pendant la journée, vent descendant/vallée pendant la nuit). Sur les versants ensoleillés, le combustible forestier sera plus sec que sur les versants ombragés. Une inclinaison de pente plus raide facilitera la transmission de chaleur vers le combustible le plus haut, accélérant la perte de teneur en eau du combustible, et par conséquent, le combustible sera plus propice à la combustion.

Deux principaux paramètres topographiques affectent les incendies, à savoir la **pente** en amplifiant l'effet de radiation et de convection, et l'**exposition** en jouant sur la quantité de chaleur reçue en fonction de l'insolation ainsi que la densité et la structure de la végétation [126]. La combinaison de ces facteurs topographiques, associés à la direction du vent, permet de définir les forces d'alignement du feu. En cas d'alignement total de ces forces (cas dans

lequel les trois conditions des facteurs sont favorables), la propagation des feux est favorisée. A contrario, en cas d'alignement partiel (cas dans lequel deux voire l'ensemble des facteurs ne sont favorables), les conditions ne sont pas propices à la propagation des feux (Figure 2-2). C'est pourquoi les feux, se propageant dans un alignement total, présenteront des niveaux d'intensité supérieurs à d'autres ayant des niveaux d'alignement inférieurs. Ces derniers sont moins dangereux, plus faciles à maîtriser et à éteindre [110].

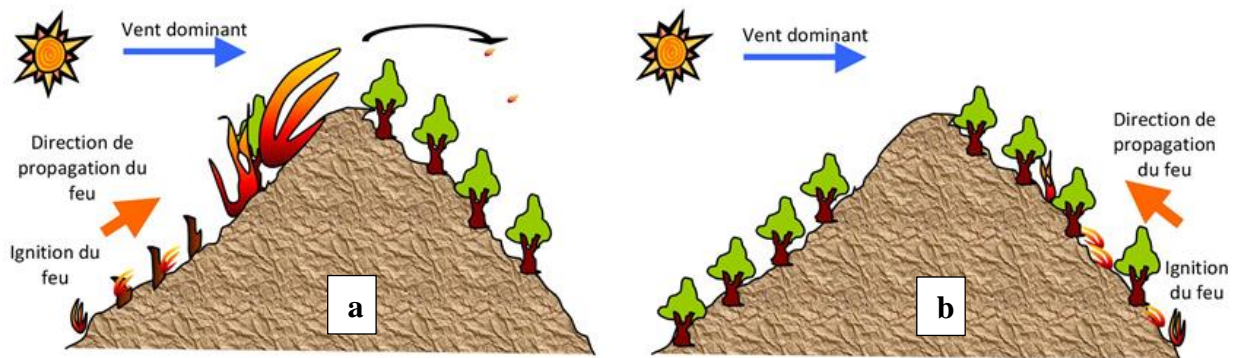


Figure 2-2 : Exemples de combinaisons des forces d'alignement sur un même terrain

a) Alignement total (3/3) : Le feu se propage sur le versant ensoleillé (1 force d'alignement), dans le sens de la direction du vent (1 force d'alignement) et en remontant la pente (1 force d'alignement). Émission possible de feux disséminés à l'arrivée au sommet

b) Alignement partiel (1/3) : Le feu se propage en remontant la pente (1 force d'alignement), mais sur le versant ombragé (-1 force d'alignement) et contre la direction du vent (-1 force d'alignement). Le feu a un niveau d'intensité moindre.

2.2.4. Facteurs édaphiques

Le type de sols, leur texture, leur structure, la qualité de leur complexe argilo-humique conditionnent les formations végétales et leur aptitude à conserver une réserve hydrique. Ainsi, ils peuvent rendre un peuplement moins inflammable malgré l'installation de la sécheresse climatique (par exemple, des peuplements végétaux dans les zones de bas-fonds) [128].

2.2.5. Facteurs socio-économiques

Les changements socio-économiques qui interviennent dans les centres urbains et les zones rurales au cours des dernières décennies influent sur le risque d'incendie et la propagation des feux. Il s'agit, entre autres, de :

- l'exode rural ;
- l'interface habitat-forêt, favorisé par une urbanisation anarchique, a provoqué une augmentation significative du risque de feu ;
- l'accessibilité aux centres urbains ou localités définit l'état socio-économique, éducatif et sanitaire des communautés ;

- la densité de population constitue l'un des facteurs d'accroissement du fait de la pression accrue sur les terres et les autres ressources naturelles [6,129] ;
- le comportement de la population et les pratiques cynégétiques et agropastorales traduisent, encore aujourd'hui, un manque de sensibilisation au risque d'incendie ;
- les différentes traditions culturelles et les influences politiques (locales et géopolitiques) dans la gestion du feu sont essentielles pour évaluer les coûts et les avantages des régimes de feux contrastés dans les paysages et les biomes [122].

La plupart des feux sont causés par l'homme, par négligence ou pour d'autres raisons : cupidité, emploi abusif des feux dans l'agriculture et les pâturages, défrichement illégal et incendies d'origine criminelle [6]. Le fait de construire dans des zones à haut risque d'incendie exacerbe les problèmes de lutte contre le feu et la gestion des incendies [6].

2.3. CAUSES ET PRATIQUES DES FEUX DE VEGETATION

Les feux de brousse peuvent être intentionnels et criminels ou involontaires et accidentels.

Selon Plana *et al.* [110], les origines des incendies sont diverses et peuvent être réparties en 5 catégories :

- les causes naturelles : foudre ou éruptions volcaniques ;
- les causes accidentelles : lignes électriques, chemin de fer, véhicules, dépôt d'ordures ;
- les causes involontaires liées aux travaux : travaux forestiers, travaux agricoles (brûlages dirigés y compris), travaux publics et industriels, réactivation de feux issus des travaux agricoles ou forestiers ;
- les causes involontaires liées à des personnes : travaux, loisirs, jets d'objets incandescents (mégots de cigarettes, etc.) ;
- les causes volontaires : incendie volontaire, intérêt politique ou foncier, conflit, sabotage.

En Afrique subsaharienne, les facteurs anthropiques jouent un rôle clé et sont à l'origine de plus de 90 % des départs d'incendies de forêt [26]. Ces incendies recouvrent en réalité plusieurs usages et plusieurs causes. En zone rurale, les feux sont pratiqués dans les activités agricoles (défriche-brûlis, écobuage et déchaumage), cynégétiques (débusquage des animaux), pastorales (brûlis pour le renouvellement de pâturage, réduction des nuisibles) et énergétiques (production de charbon de bois). Ces pratiques sont utilisées chaque année par les populations, mais ont tendance à être de moins en moins maîtrisées, causant des dégâts importants. En plus, il est couramment observé des feux à vocation coutumière (cérémonies de rituelles) et des incendies provoqués pour le simple « plaisir » ou attribués à des comportements pyromanes [111].

En général, les causes sous-jacentes des feux de brousse sont : (i) les changements dans l'utilisation des terres agricoles engendrés par une activité accrue, (ii) l'expansion de la surface des jachères et zones arbustives, (iii) les opérations forestières, les décharges, les accidents, (iv) les facteurs liés au comportement (vandalisme, tabagisme, etc.); et (v) des politiques forestières inefficaces [130].

Les principales causes directes des feux de brousse en Côte d'Ivoire sont multiples dont les plus récurrentes sont :

- les jets de mégots de cigarette incandescents ;
- l'utilisation du feu pour la chasse ;
- la préparation des terres pour les cultures ;
- la préparation des terres et des pâturages au centre et nord pour le bétail ;
- la cuisson pour les besoins alimentaires dans les champs ;
- les incendies volontaires ou criminels ;
- la foudre.

2.4. IMPACTS DES FEUX DE VEGETATION

Les feux de végétation ont des conséquences aussi bien sur les sociétés humaines, le milieu naturel et le climat.

2.4.1. Impacts des feux sur le climat

Les incendies de végétation sont également une préoccupation majeure à l'échelle mondiale. Ces feux provoquent des émissions de GES, d'aérosols et de particules radiatifs et photochimiquement actifs. Ces émissions ont des incidences sur la composition et le fonctionnement de l'atmosphère globale [21,22,33,131]. La nature et la quantité de carbone émis dépendent des caractéristiques du feu et de celles de la biomasse brûlée [21]. À l'heure actuelle, les incendies représentent des émissions de CO₂ équivalant à 50 % de toutes les émissions provenant de la combustion des combustibles fossiles [132]. La combustion de la biomasse libère une part considérable du carbone qui a été stocké dans la biomasse et les litières au-dessus du sol, en fonction de l'efficacité de combustion [133].

À l'échelle mondiale, le feu est un agent majeur pour la conversion de la matière organique de la végétation et des sols en carbone [134] (Tableau 2-1).

Tableau 2-1 : Contribution du brûlage de la biomasse aux émissions globales du carbone

Forme de carbone	Combustion de la biomasse (Tg an ⁻¹)	Toutes les sources (Tg an ⁻¹)	Combustion de la biomasse (%)
CO ₂	3500	8700	40
CO	350	1100	32
CH ₄	38	380	10
Hydrocarbures non-méthane (NMHC)	24	100	24
Particules	69	180	39
Carbone élémentaire	19	22	86
Matières particulaires	140	1530	7

1 Tg = 10⁶ tonnes = 10¹² grammes

Source : Levine [21]

Les émissions de GES tels que le CH₄ et N₂O, contribuent à un potentiel de réchauffement d'environ 10 % dans les équivalents de CO₂ [135]. En outre, le feu entraîne l'émission de particules de suie qui contiennent du carbone noir (carbone élémentaire contenu dans la fumée) et d'autres matières particulaires.

La principale période de combustion de la biomasse, en particulier vers la fin de la saison sèche, s'accompagne d'évènements massifs d'incendies anthropiques ayant des effets néfastes sur les paramètres climatiques mondiaux et la santé humaine [2,136].

2.4.2. Impacts des feux sur le milieu naturel

2.4.2.1. Effets des feux sur les écosystèmes

Plusieurs travaux ont été réalisés sur l'impact des feux sur la végétation des écosystèmes savanicoles et forestiers. Ces travaux démontrent que les effets induits dépendent du type de feu, du régime (fréquence, saison et intensité du feu), du type de végétation, du stade phénologique, mais aussi des températures engendrées lors des feux [41,42,44,118,137]. Lors de leur passage, les feux impactent la végétation, les cultures, la régénération, etc. (Figure 2-3). L'impact de ces feux sur les ligneux adultes semble négligeable [138]. Toutefois, certains ligneux peuvent succomber au contact direct avec le feu en fonction de l'intensité de celui-ci [43]. Les feux précoces, allumés au moment où le combustible contient toujours une humidité non négligeable, sont de faible intensité et moins néfastes que les feux tardifs [41,139]. Les feux tardifs sont plus dommageables à la végétation, notamment à la strate arbustive et herbacée, que les feux précoces. Ces feux à forte intensité affectent tous les organes des ligneux et peuvent ralentir leur croissance en les maintenant à l'état buissonnant et en contribuant à la déformation de leurs fûts [42,43,140]. Les dégâts de ces feux sur les organes sont divers [90]. Premièrement, les dégâts sur les bourgeons vont inhiber la croissance du plant et entraîner la

perte des feuilles. Deuxièmement, les dégâts sur les fleurs vont affecter la fructification. Troisièmement, les dégâts sur les fruits vont nuire à l'installation des semis. Quatrièmement, les dégâts sur les troncs vont favoriser l'attaque de maladies ou insectes au niveau du cambium [90].



Figure 2-3 : Dégâts des feux sur la végétation et les cultures ; **(a)** feu actif dans la zone préforestière à Angbavia, **(b)** végétation savanicole consumée par le feu à Tafiré, **(c)** champ de manioc consumé par le feu à Aheremou 2 et **(d)** teckeraie consumée par le feu à Katiola. Ces dommages causés au niveau de ces ligneux les rendent vulnérables aux attaques des termites qui creusent des tunnels dans le cambium et sur tronc entraînant sa rupture [42]. Ces feux affectent les semis naturels et la dynamique de la régénération naturelle.

Des études récentes ont conclu que les feux à forte intensité peuvent détruire les graines et affecter négativement la quantité et la qualité de la banque de semences [141], tandis que ceux ayant une faible intensité permettent de lever la dormance des semences [142]. Outre les effets négatifs évoqués, les feux ont des effets positifs notamment la stimulation de la poussée foliaire de certaines espèces, l'augmentation de la floraison et de la germination des semences par la chaleur ou la fumée, la production importante de biomasse surtout pour les graminées pérennes [33].

Généralement, les feux modifient la structure floristique de la végétation (forêt, savane arborée, etc.) au profit d'espèces pyrorésistantes et héliophiles [26].

2.4.2.2. Effets des feux sur la faune

Les feux de végétation affectent directement ou indirectement la faune associée à la végétation impactée [137]. Les réactions de la faune au feu peuvent être divisées en trois catégories temporelles. D'abord, les certains animaux meurent directement au contact des flammes. Ensuite, les feux entraînent une mortalité indirecte de certains animaux quelques moments après le feu. Enfin, les feux impactent indirectement la faune, à long terme, au regard des changements dans la structure de la végétation et la disponibilité des ressources [143]. La destruction du complexe biologique par les feux entraîne une perturbation de la faune sauvage voire la disparition totale de certaines espèces par la rupture de la chaîne alimentaire [26]. Les incendies tuent probablement presque tous les arthropodes associés à la litière, y compris leurs œufs et leurs larves, les prédateurs et parasites des végétaux [137,143]. Les populations d'oiseaux sont aussi victimes des feux. Ils impactent les frugivores par la destruction des fleurs et des fruits, les insectivores par la disparition des insectes, les carnivores par la raréfaction des petits mammifères [137].

Au niveau des mammifères, les herbivores voient leurs ressources brûlées. De nombreux vertébrés arboricoles succombent à l'asphyxie par la fumée, notamment plusieurs primates, des paresseux, des espèces d'oiseaux, etc. [143].

Les feux entraînent la mortalité des animaux quelques moments après les incendies. Cette mortalité est due à une grave pénurie de nourriture. En effet, les herbivores ne trouvent plus d'herbacées fourragères et les frugivores de fruits, situation d'autant plus grave qu'elle se situe en période de soudure (période sèche) [143]. Face au départ du reste de la faune des zones brûlées, les carnivores sont obligés de migrer pour trouver de la nourriture. Cette migration entraîne une raréfaction de cette catégorie de mammifères (lion, panthère, hyène, etc.) dans le

milieu. Les reptiles, tels que les crocodiles et certains serpents comme les boas, ne pouvant trouver d'issue au feu se font piéger par les flammes et y succombent.

Malgré ces conséquences désastreuses, les feux présentent aussi des effets bénéfiques pour les oiseaux. Ils fournissent de la nourriture pendant l'incendie ou immédiatement après sous forme d'insectes morts. Il a souvent été signalé que les oiseaux se rassemblaient fréquemment dans les zones en feu pour pouvoir se nourrir d'insectes se déplaçant devant le front du feu [137].

Les rongeurs, ne trouvant plus de couvert végétal protecteur et de nourriture, quittent les zones parcourues par le feu pour aller s'installer dans les parties non brûlées, notamment les galeries forestières.

2.4.2.3. Effets des feux sur les sols

Les feux entraînent une perte de la matière organique des sols qui peut subir une légère distillation (volatilisation de composants mineurs), une carbonisation ou une oxydation complète [38,144]. Après le passage du feu dans une zone donnée, le sol va être exposé à nu et soumis à l'action de différents facteurs. La litière protégeant le sol est détruite et contribue à l'augmentation de l'exposition solaire du sol qui va modifier ses caractéristiques [145]. Deux types d'érosion peuvent alors se manifester : l'érosion hydrique qui va décaper le sol et l'érosion éolienne qui va emporter les particules les plus fines [26]. Aussi, le passage du feu va influencer l'activité biologique du sol par la destruction de la microflore et de la microfaune jouant un rôle important dans la formation de la matière organique et de la fixation de l'azote. De manière générale, la perte du couvert végétal, suite aux feux, occasionne l'encroustement et le colmatage des sols, une augmentation de l'érosion du sol, mais aussi une altération des caractéristiques physiques et une perte des nutriments par lessivage ou par drainage [25,144].

2.4.3. Impacts des feux sur la société

Les feux sont utilisés par les sociétés depuis le paléolithique, mais leurs impacts sur les sociétés se sont accentués ces dernières décennies. Ces impacts sont d'ordre humain et économique.

Les feux de végétation portent atteinte aux personnes (pertes en vie humaine, personnes blessées, brûlées, asphyxiées, sans-abri, déplacées, etc.) et aux biens (destruction, détérioration et dommages sur les plantations, le bétail, les habitations et les ouvrages, paralysie des services publics avec la destruction des réseaux électriques et téléphoniques) [1,8,111]. Outre ces effets directs, les incendies ont également des effets indirects environnementaux (érosion des sols, exode et pollution des plans d'eau, etc.), sanitaires (impacts sur la santé à long terme) et sociaux (perturbations du trafic routier et aérien, fermeture des entreprises pendant ou immédiatement après l'incendie, réduction à long terme du tourisme, de la valeur esthétique du paysage, etc.)

[1]. Malgré ces désastres, les agriculteurs s'en servent du feu comme outil de défrichage ou de destruction des résidus de récolte [26,146].

2.5. SITUATION DES FEUX DE VEGETATION EN COTE D'IVOIRE

2.5.1. Statistique

Les feux sont couramment pratiqués en Côte d'Ivoire à des fins diverses depuis des décennies, et ce dans toutes les régions du pays. Toutefois, leur ampleur et leur étendue étaient assez limitées jusqu'aux années 1970. A partir de cette période, les feux de brousse ont occasionné régulièrement de nombreux dégâts avec des conséquences parfois dramatiques et inestimables sur l'environnement. Avec les saisons sèches prolongées des années 1973 et 1983, le nombre de foyers de feux, les zones parcourues et les dégâts causés ont pris des proportions alarmantes allant des pertes économiques aux pertes en vies humaines [30]. Les statistiques de la période 1983-2004, malgré leur incomplétude à cause de l'indisponibilité de données sur les zones centre et nord lors de la crise militaro-politique débutée en 2002, sont évocatrices (Tableau 2-2).

Tableau 2-2 : Dégâts occasionnés par les feux de brousse en Côte d'Ivoire de 1983 à 2004

Nature des dégâts	Unité	Quantité
Vies humaines	nombre	122
Villages	nombre	356
Plantations de caféiers et cacaoyers	hectare	130 280
Plantations d'hévéa	hectare	7 700
Plantations d'anacardiens	hectare	5 705
Plantations de roucouyers	hectare	3 535
Plantations de palmier à huile	hectare	728
Plantations forestières	hectare	8 087
Forêts classées	hectare	70 530
Domaine rural	hectare	311 665

Source : SODEFOR [30]

De plus, en février 2010, les feux de brousse dans la région de Zanzan, près de Nassian, ont détruit 5 villages et fait 20 000 sinistrés. De 2013 à 2014, 19 495,8 ha de forêts et de cultures ont été détruits [147]. Pour la saison agricole 2016-2017, près de 15 000 ha de cultures agricoles ravagées, 11 000 ha de forêts détruits, 10 villages atteints par les flammes avec 200 cases rasées et 17 morts. Les préjudices financiers liés aux dégâts causés sont estimés à près de 204 milliards de francs CFA [34].

En janvier 2018, des feux mal maîtrisés ont dévasté une trentaine d'hectares de champs d'anacardiens en pleine production à Bohizra dans la commune de Zuénoula, et une dizaine d'hectares de plantations d'anacardiens dans les localités de N'Gala, de Tagbonon, et de Lahoré

dans le département de Dabakala. Le préjudice se chiffre à des dizaines de millions de francs CFA [35].

2.5.2. Causes et Impacts

De 1960 à 2015, la couverture forestière ivoirienne est passée d'environ 16 millions d'hectares de forêt à moins de 3,4 millions [84]. Cette déforestation est due principalement à l'agriculture extensive basée sur la technique des cultures itinérantes sur brûlis, l'exploitation forestière (bois d'œuvre et bois énergie) et les feux de brousse incontrôlés. Les feux de brousse représentant la troisième cause de la déforestation et de la dégradation des forêts en Côte d'Ivoire [31,84].

En Côte d'Ivoire, les causes directes des incendies sont liées aux activités pastorales (régénération du pâturage), culturelles (défrichage, brûlage dirigé, etc.), cynégétiques (chasse de type « battue » ou débusquage des rongeurs de leur terrier avec le feu), à l'extraction du miel et du vin de palme ou de rônier et aux actes involontaires (jets de mégots par les fumeurs) ou volontaires (conflits fonciers, etc.) [30].

Traditionnellement, les populations mettent volontairement le feu à la brousse pour la préparation des terres agricoles et des pâturages, la chasse et puis elles n'arrivent pas à en contrôler les limites. D'autres incendies sont liés aux pratiques agricoles post-récoltes dont le brûlage de résidus de cultures (pailles de riz, maïs, mil, etc.). Avec l'assèchement du climat, ces feux causent des dommages impressionnants à l'homme et à ses biens, à la flore et à la faune. Les feux de végétation peuvent également être d'origine accidentelle. En effet, les paysans utilisent les feux pour la préparation des terres de culture. Ces feux peuvent échapper au contrôle des agriculteurs et réussir à atteindre la savane ou la forêt adjacente à la parcelle de culture.

La pratique de feu fait partie des mœurs fortement ancrées de certaines populations et présente un intérêt économique pour d'autres groupes, d'où la difficulté de mettre en œuvre des mesures contraignantes acceptées par tous les acteurs intervenant dans le domaine rural.

2.5.3. Stratégies de lutte contre les feux de végétation en Côte d'Ivoire

Le phénomène des feux de brousse préoccupe particulièrement l'Etat de Côte d'Ivoire, au regard des nombreux dégâts qu'ils causent sur l'environnement et la société.

Des textes législatifs (lois) et réglementaires (décrets, arrêtés, etc.) sont promulgués pour réguler, prévenir, lutter contre les feux de brousse et administrer les pratiques de feux (Annexe 1). Les actions de l'administration forestière se résument à la lutte préventive, la lutte active, l'évaluation des dégâts et la répression [148].

Depuis 1986, l'Etat a adopté par décret une approche participative. Dans la stratégie globale de lutte contre les feux de brousse, le pays a instauré une journée nationale de lutte contre les feux de brousse en début de saison sèche en vue de sensibiliser la population sur les dangers que constitue ce fléau et les bonnes pratiques en matière d'utilisation de feux en période sèche. Vingt-deux campagnes de sensibilisation ont été organisées au niveau régional et national dont quelques images de la 22^e édition à Koubi sont présentées par la Figure 2-4 [35]. Ces sensibilisations ont pour but de contribuer à la préservation et partant, à la restauration de 20 % de la couverture nationale en zone forestière [34].

En outre, il a été institué au niveau de chaque unité déconcentrée (région, département, sous-préfecture, commune et village) de Côte d'Ivoire, des Comités locaux de défense de la forêt et de lutte contre les feux de brousse. En effet, de 1994 à ce jour, 1 243 comités ont été créés [35]. Ces structures locales, présidées par le corps préfectoral, par les Maires ou par les chefs traditionnels, bénéficient de l'encadrement des services techniques du MINEF, pour les actions de formation, de sensibilisation, de communication et de lutte contre les feux de brousse par la prévention des départs d'incendies, de limiter leur extension et de rendre plus efficace la lutte. Toutefois, l'insuffisance de moyens (financiers et matériels) ne permet pas une meilleure expression de ces comités.

Un prix d'excellence du meilleur comité de lutte contre les feux de brousse est institué par le gouvernement en vue de féliciter les comités pour les actions de sensibilisation menées auprès des populations. Ce prix est remis de main propre par le Président de la République.

Malgré tous les efforts déployés, les feux de brousse subsistent encore, et constituent une des principales causes de la dégradation des forêts.

Au niveau de la lutte contre les incendies, les acteurs institutionnels et opérationnels sont le MINEF et l'Office Nationale de la Protection civile (ONPC). La situation est marquée par un manque sévère de moyens humains et matériels. En 2017, le MINEF comptait près de 3 500 agents techniques répartis en administration centrale et dans les services déconcentrés. Quant à l'ONPC, il comptait seulement 1 496 pompiers civils repartis en 30 centres de secours d'urgence (CSU) installés dans les chefs-lieux de régions et disposant seulement d'une ambulance et d'un camion-citerne. Au-delà du manque criant de ressources matérielles et humaines, il faut noter leur inégale répartition sur l'ensemble du pays.



Figure 2-4 : 22^e édition de la Caravane Nationale de lutte contre les feux de brousse à Koubi :
 (a) Allumage symbolique de feu ; (b) Intervention du Ministre des Eaux et Forêts [35]

2.6. SUIVI ET MODELISATION DE LA DYNAMIQUE DES FEUX DE VEGETATION

2.6.1. Apport de la télédétection

L'avènement des satellites a fortement contribué au suivi des feux dans les pays tropicaux et tempérés. En effet, plusieurs études ont montré l'importance des outils spatiaux pour mesurer les impacts des feux et leurs dynamiques. Les capteurs embarqués sur les satellites, dotés d'un ou plusieurs canaux dans le visible et l'infrarouge, permettent de suivre l'état de la biomasse et les conditions météorologiques avant les incendies, de détecter les sources de chaleur en temps quasi réel des feux actifs¹ et des dégâts post-feu [149,150].

Différents capteurs sont disponibles pour le suivi des feux actifs ou de surfaces brûlées et le niveau de résolution varie selon le capteur. Plusieurs capteurs proposent des images satellitaires en fonction de leur résolution spatiale. Les capteurs NOAA AVHRR, SPOT VEGETATION et GOES proposent des images de faible résolution (taille du pixel $\geq 1\ 000$ m). Les capteurs MODIS, VIIRS et MERIS proposent des images de moyenne résolution (taille du pixel ~ 250 - 500 m). Les capteurs des satellites Landsat, ERS-ATSR, SPOT HRV / HRVIR, IKONOS, etc. proposent des images de fine résolution (taille du pixel ≤ 30 m).

Les données satellitaires concernant les années antérieures à 2000 sont disponibles seulement avec certains capteurs (exemple : NOAA AVHRR, SPOT VEGETATION ou Landsat), ce qui rend difficile le suivi des feux pendant une période prolongée et supérieure aux vingt dernières années.

¹ Feux en activité au moment du passage du satellite.

Dans le cadre de cette étude, les données issues du capteur MODIS et VIIRS sont utilisées pour le suivi des feux de végétation. En effet, ces données présentent un double avantage : la grande fréquence de passage et la couverture de superficies importantes [151]. La grande fréquence de passage (deux fois par jour) permet de capter un grand nombre de feux actifs et de détecter les surfaces brûlées. En plus, ces données peuvent atteindre la résolution spatiale de 250 m.

Toutefois, il faut noter que ces données présentent des limites à savoir l'omission des feux ou des surfaces brûlées due à la faible température ou à la faible extension spatiale, et l'échec des algorithmes de détections des points chauds permettant d'éliminer les « faux positifs² ». La validation de ces données nécessite des mesures au sol ou l'exploitation de l'imagerie haute résolution spatiale (Sentinel, Landsat, etc.) ou de très haute résolution spatiale (Ikonos, SPOT, etc.) dont les coûts sont élevés [150].

2.6.2. Données MODIS et VIIRS

2.6.2.1. Présentation des capteurs satellitaires

Le spectromètre imageur MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* en anglais) est un capteur embarqué à bord des satellites Terra et Aqua du programme *Earth Observing System* (EOS) de la *National Aeronautical and Space Administration* (NASA), lancés respectivement en 1999 et 2002. Avec un balayage de 2 330 km de largeur, il recueille des données de chaque point de la surface de la Terre, avec un cycle de revisite d'un à deux jours, dans 36 bandes spectrales discrètes. Les résolutions spatiales des bandes MODIS sont 250 m (bandes 1-2), 500 m (bandes 3 à 7) et 1 000 m (bandes 8 à 36). La détection des feux est principalement réalisée par les canaux d'une résolution de 1 km aux longueurs d'onde de 4 μm et de 11 μm , lesquelles sont associées à des températures de saturation élevées respectivement d'environ 450 K (177 °C) et 400 K (127 °C). Ces canaux détectent régulièrement à la fois des flammes et des feux de 1 000 m² ayant une température minimale de 500 K (227 °C). Dans de très bonnes conditions d'observation, des petits incendies de 50 m² peuvent être détectés.

Le capteur MODIS est conçu pour fournir des mesures dans une dynamique globale à grande échelle, y compris des changements dans la couverture nuageuse, l'état du couvert végétal et les processus survenant dans les océans, sur terre et dans la basse atmosphère [152].

L'instrument VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) est un radiomètre à 22 canaux à bord du satellite de la NASA / NOAA Suomi-National Polar-Orbiting Partnership (Suomi-NPP) acquiert également des données en continu. Le satellite a été lancé en 2011 pour garantir

² Fausses alertes provenant de données parasites détectées par les satellites comme étant des points chauds

la continuité de la collecte des données réalisées par les satellites vieillissants de l'EOS (Terra et Aqua) en complétant les détections de feu MODIS. Le rayon de VIIRS de 3 040 km permet un chevauchement d'image d'environ 15 % entre les orbites consécutives à l'équateur, fournissant ainsi une couverture mondiale complète toutes les 12 heures. Suomi-NPP a un passage nominal (passage par équateur) à 13h30 et 1h30. Les données de 375 m montrent un bon accord dans la détection des points chauds, mais la résolution spatiale améliorée de ces données fournit une plus grande réponse sur les feux de brousse relativement petits et fournit une meilleure cartographie des grands périmètres d'incendies. Les données VIIRS 375 m ont également subi une amélioration de la performance de détection nocturne de feux. Par conséquent, ces données sont bien adaptées à une utilisation pour la gestion des incendies (par exemple, systèmes d'alerte en temps quasi réel), ainsi que d'autres applications scientifiques nécessitant une meilleure fidélité de la cartographie des incendies [153].

2.6.2.2. Produits de feux actifs

Les produits de feux actifs MODIS MCD14DL [154] de résolution 1 km et VIIRS VNP14IMGTDL [153] de résolution 375 m sont issus des capteurs MODIS et VIIRS respectivement et détectent les incendies actifs. Lors d'un feu, les températures détectées peuvent aller de 500 K à 1 800 K, selon la fraction du pixel couverte par le feu. Les satellites utilisent un algorithme contextuel basé sur la forte émission de rayonnement infrarouge moyen provenant des feux, capturés entre 4 μm et 11 μm de rayonnements. Par conséquent, un pixel sans nuages où des feux actifs se produisent pendant le passage supérieur du satellite peut être marqué en tant que pixel de feu. Les produits MODIS MCD14DL collection 6 et VIIRS VNP14IMGTDL contiennent les coordonnées géographiques, le jour de détection, la température de luminosité, la puissance de rayonnement du feu et le niveau de confiance de détection pour tous les pixels de feu MODIS/VIIRS.

2.6.2.3. Produits de surfaces brûlées

Les zones brûlées sont caractérisées par des dépôts de charbon et de cendres, l'enlèvement de la végétation et l'altération de la structure de la végétation [56]. L'algorithme MODIS Collection 6 utilisé pour cartographier les zones brûlées tire parti de ces changements spectraux, temporels et structurels [55]. Cet algorithme utilise les fonctions de distribution de réflectance bidirectionnelle (BRDF) qui se basent sur la méthode de détection de changement [112]. Il détecte plus de 26 % des surfaces brûlées comparativement à la collection 5 MODIS MCD45A1. Il détecte la date approximative de la combustion à 500 m en localisant l'apparition de changements rapides dans les données de séries temporelles de réflectance de surface

quotidienne. Cet algorithme offre une détection nettement meilleure des petites zones brûlées, une réduction de l'incertitude temporelle de la date de brûlure et de l'étendue des zones non cartographiées [155].

Le produit MCD64A1 des surfaces brûlées est un produit MODIS mensuel de niveau 3 de 500 m de résolution contenant par pixel des informations sur la présence ou non de surfaces brûlées et des métadonnées [156].

Les utilisateurs du produit reçoivent une variété d'informations d'évaluation de la qualité et un seul score d'évaluation de la qualité pour chaque pixel. Le produit contient cinq couches de données (date de brûlure, incertitude de date de brûlure, évaluation de la qualité, premier jour et dernier jour) et est livré dans le format standard tuilé de MODIS Land dans une projection sinusoidale. La date de brûlure est encodée dans une seule couche de données avec des valeurs variant 1 à 366 correspondants aux jours juliens de l'année. La valeur 0 correspond aux pixels non brûlés et des valeurs spéciales supplémentaires réservées aux données manquantes et à l'eau [157,158].

2.6.3. Travaux antérieurs

Depuis l'avènement des satellites d'observation de la terre, plusieurs auteurs ont utilisé la télédétection pour la détection et la répartition des feux de végétation et des dégâts post-feu.

L'imagerie satellitaire permet d'observer les espaces où le feu se produit, et où il n'est pas présent. Elle montre aussi les périodes de passage des feux, ainsi que leur récurrence et les zones brûlées [159].

Les données issues des capteurs des satellites Landsat sont traitées à l'aide de la classification automatique du canal infrarouge thermique [160,161], de classifications supervisées à partir des compositions colorées combinant divers canaux [162–164], ou par seuillage dans un ou plusieurs canaux [165,166] pour l'étude des feux de végétation. Cependant, les données du capteur MODIS sont les plus utilisées pour l'évaluation de l'occurrence des feux. Elles ont été utilisées pour étudier les incendies dans les zones de savanes tropicales du Brésil [167–170], en Afrique [171–174], dans l'ensemble de la zone tropicale [175] ou à l'échelle globale [3].

L'analyse de ces données fait appel à plusieurs méthodes permettant d'évaluer et modéliser l'activité des feux (nombre de feux et surfaces brûlées). Les premiers modèles utilisés pour modéliser l'occurrence des incendies concernent les régressions linéaires [176,177].

L'informatique et les statistiques ont amélioré les approches de modélisation pour la découverte des tendances trouvées dans les données de série temporelle de feux.

Les modèles de régression linéaire généralisés (GLM) ont été utilisés par Viedma *et al.* [178] pour analyser les départs de feux et par Ordonez *et al.* [179] pour identifier les variables qui ont une influence significative sur la fréquence des feux de végétation. Parmi les GLM les plus utilisés, les modèles de régression logistique ont été appliqués aux variables socio-économiques au niveau municipal ou provincial [180–187]. Mandallaz et Ye [188], Liu et Zhang [189], Marchal *et al.* [190] et Papakosta et Straub [191] ont utilisé les régressions de Poisson pour prédire les incendies de végétation et leur fréquence quotidienne en Europe et au Canada.

Boubeta *et al.* [192] ont utilisé une extension des modèles classiques de régression de Poisson incluant la superficie forestière comme des effets aléatoires pour la prédiction des feux de végétation à Galicia (Nord-Est de l'Espagne).

Serra *et al.* [193] ont utilisé des modèles de régression linéaire multiple pour expliquer les principaux facteurs de changements de l'occupation et de l'utilisation des terres, ainsi que la relation avec la fréquence des incendies de végétation dans une zone côtière de la Catalogne (Espagne). D'autres méthodes plus complexes ont été introduites comme solutions de remplacement des méthodes statistiques traditionnelles, en particulier lorsqu'il s'agit de bases de données volumineuses, de modèles non linéaires et de variables hautement corrélées ou non distribuées normalement. Il s'agit des méthodes des arbres de classification et de régression [194–196], des modèles additifs généralisés [197,198], les réseaux de neurones artificiels [180,199], les machines à vecteurs de support [200], les modèles spatiaux linéaires généralisés [179] et le poids des preuves utilisant l'inférence bayésienne pour mesurer l'association spatiale entre les cartes de variables d'évidence et les cartes d'ignition des feux [201–204].

Dans un contexte non-paramétrique, Schoenberg *et al.* [205] ont exploré le lissage par noyau et l'estimation paramétrique de la relation entre l'incidence et les variables météorologiques. Schroeder [206] a introduit pour la première fois des modèles de séries chronologiques pour l'analyse des antécédents climatiques et la variabilité des feux de végétation. Podur *et al.* [207] ont utilisé des méthodes chronologiques pour rechercher des cycles ou des tendances dans les séries annuelles d'incendies et de zones brûlées en Ontario (Canada) entre 1918 et 2000. Crimmin et Comrie [208] ont mis en évidence l'importance des conditions climatiques antécédentes sur la variabilité des feux de végétation (superficie totale brûlée et nombre total d'incendies) en Arizona.

L'un des modèles de séries chronologiques les plus importants et les plus largement utilisés est le modèle autorégressif à moyenne mobile intégrée (ARIMA) [209]. Cette approche de modélisation est particulièrement utile lorsque peu de connaissances sont disponibles sur le processus de génération de données ou en l'absence de modèle explicatif satisfaisant liant la

variable de prédiction à d'autres variables explicatives [210,211]. La popularité du modèle ARIMA est due à ses propriétés statistiques ainsi qu'à la méthodologie bien connue de Box-Jenkins [212] dans le processus de modélisation. En outre, divers modèles de lissage exponentiel peuvent être mis en œuvre par les modèles ARIMA [213]. Les modèles ARIMA ont été largement utilisés pour la modélisation des feux de végétation et des surfaces brûlées. Miller *et al.* [214] ont étudié la gravité des incendies à l'aide des processus ARIMA dans la Sierra Nevada (Californie). Ils ont calculé les tendances du pourcentage de zones brûlées à haute gravité par an. Également pour la Sierra Nevada, Taylor et Scholl [215] ont identifié l'influence des variations climatiques interannuelles et interdécadales et des modifications de l'utilisation des sols sur les régimes de feux en utilisant des fonctions d'autocorrélation (ACF) et des moyennes mobiles autorégressives (ARMA).

Boubeta *et al.* [130] a utilisé deux modèles semi-paramétriques de séries chronologiques pour décrire et prédire la surface brûlée chaque semaine au cours d'une année à l'aide de la modélisation ARIMA combinée au lissage. Quant à Viganó *et al.* [216], ils ont utilisé les modèles ARIMA pour la prévision l'occurrence des feux de forêt dans le Pantanal au Brésil.

Dans la présente étude, les méthodes de Box et Jenkins [212] seront utilisées pour l'analyse de séries chronologiques, en particulier les processus ARIMA [217] pour évaluer le comportement des feux de végétation.

2.6.4. Modélisation des séries chronologiques

2.6.4.1. Introduction aux modèles ARIMA

La modélisation des séries chronologiques soumises à des perturbations aléatoires peut être réalisée à l'aide des modèles autorégressifs à moyenne mobile intégrée (ARIMA ou *Autoregressive Integrated Moving Average*). Ces modèles permettent de combiner trois types de processus temporels : les processus autorégressifs (AR), les processus moyenne mobile (MA) et les processus intégrés (I). Dans le cas général, un modèle ARIMA(p,d,q) est une combinaison de ces trois types de processus, p , d et q désignant respectivement l'ordre du processus autorégressif, l'ordre d'intégration et l'ordre de la moyenne mobile [218]. Il s'agit, par la méthode de Box et Jenkins, de construire un modèle restituant le mieux possible le comportement d'une série temporelle suivant trois étapes : identification, estimation et diagnostic [130,212,218–220]. La description présentée dans le cadre de cette étude provient des travaux de Desbois [221], Mbaye et Sene [222] et Hyndman et Athanasopoulos [218].

2.6.4.1.1. Processus autorégressifs, AR(Autoregressive)

Un processus (X_t) est dit autorégressif d'ordre p , noté AR(p), si l'observation présente X_t est générée par une moyenne pondérée des observations passées jusqu'à la p -ième période. Le modèle autorégressif s'écrit sous la forme suivante (équation 1) :

$$X_t = \sum_{i=1}^p \varphi_i X_{t-i} + \varepsilon_t \quad (\text{Equation 1})$$

$\varphi_i, i = 0, \dots, p$ sont des paramètres non saisonniers positifs ou négatifs à estimer et (ε_t) est un bruit blanc c'est-à-dire les ε_t sont indépendantes et identiquement distribuées suivant une loi $N(0, \sigma^2)$. Les processus autorégressifs supposent donc que chaque point peut être prédit par la somme pondérée d'un ensemble de points précédents, plus un terme aléatoire d'erreur.

2.6.4.1.2. Processus moyennes mobiles, MA (Moving Average)

Le modèle de moyenne mobile d'ordre q , noté MA(q) est une fonction linéaire où les valeurs de la série (X_t) s'expriment par la combinaison linéaire de l'erreur aléatoire qui a entaché les q essais précédents Le modèle moyenne mobile MA(q) répond à l'équation 2 :

$$X_t = \sum_{i=0}^q \theta_i \varepsilon_{t-i} + \varepsilon_t \quad (\text{Equation 2})$$

où θ_i est un paramètre non saisonnier du modèle MA(q). Les moyennes mobiles suggèrent que la série présente des fluctuations autour d'une valeur moyenne. On considère que la meilleure estimation est représentée par la moyenne pondérée d'un certain nombre de valeurs antérieures (principe des procédures de moyennes mobiles utilisées pour le lissage de données). Il est considéré que l'estimation est égale à la moyenne vraie, à laquelle on ajoute une somme pondérée des erreurs ayant entaché les valeurs précédentes.

2.6.4.1.3. Processus ARMA(p,q) (Autoregressive Moving Average)

Les modèles mixtes ou ARMA(p,q) définissent des processus sous la forme d'une récurrence autorégressive avec un second membre de type moyenne mobile. Ils sont présentés par les équations 3 et 4 :

$$X_t = \sum_{i=1}^p \varphi_i X_{t-i} + \sum_{i=0}^q \theta_i \varepsilon_{t-i} \quad (\text{Equation 3})$$

où les φ_i et θ_i sont des paramètres réels non saisonniers et (ε_t) est un bruit blanc.

La notation des polynômes de retard (L) ramène l'équation 3 à la forme de l'équation 4 :

$$\varphi(L)X_t = \theta(L)\varepsilon_t \quad (\text{Equation 4})$$

où :

- $\varphi(L)$ est l'opérateur autorégressif non saisonnier ;
- $\theta(L)$ est l'opérateur de moyenne mobile non saisonnière ;
- L est l'opérateur de retard ;
- (ε_t) est le processus de bruit blanc.

Un processus ARMA(p,q) est stationnaire si $\varphi(L) = 0$ a toutes ses racines de module strictement supérieur à 1, tandis qu'un processus ARMA(p,q) est inversible si $\theta(L) = 0$ a toutes ses racines de module strictement supérieur à 1.

En cas de présence d'une saisonnalité S , le modèle autorégressif moyenne mobile saisonnier résultant, ARMA(P,Q) S , prend alors la forme de l'équation 5 :

$$\varphi(L^S)X_t = \theta(L^S)\varepsilon_t \quad (\text{Equation 5})$$

où :

- $\varphi(L^S)$ est l'opérateur autorégressif saisonnier ;
- $\theta(L^S)$ est l'opérateur de moyenne mobile saisonnière.

2.6.4.1.4. Processus ARIMA(p,d,q)

Un processus (X_t) est dit ARIMA(p,d,q), p,d,q positifs ou nuls si le processus $X_t = (1 - L)^d Y_t$ est un processus ARMA(p,q) stationnaire et vérifie la relation de récurrence de l'équation 3. La notation des polynômes de retard ramène l'équation 4 à la forme de l'équation 6 :

$$\varphi(L)(1 - L)^d Y_t = \theta(L)\varepsilon_t \quad (\text{Equation 6})$$

où :

- $\varphi(L)$ est l'opérateur autorégressif non saisonnier ;
- $\theta(L)$ est l'opérateur de moyenne mobile non saisonnier.

Les processus ARIMA sont utiles pour des processus qui ont des corrélations positives et lentement décroissantes pouvant être le signe d'une tendance dans la série. Le processus ARIMA(0,1,0) porte le nom de marche aléatoire (Random Walk Model). Il est souvent utilisé pour analyser les données non-stationnaires particulièrement des données financières [218]. Il a généralement de longues périodes de tendances apparentes à la hausse ou à la baisse et des changements de direction imprévisibles [218].

2.6.4.1.5. Processus SARIMA(p,d,q)(P,D,Q) S

Lorsque les données présentent des saisonnalités de période S , les processus ARIMA sont dits saisonniers (SARIMA). Cette saisonnalité ne suppose pas une répétition exacte et déterministe des données.

(X_t) est appelé processus SARIMA(p,d,q)(P,D,Q) S avec période S , si l'équation 7

$$X_t = (1 - L)^d(1 - L^S)^D Y_t \quad (\text{Equation 7})$$

est un processus ARMA(p,q) stationnaire.

La multiplication des polynômes non saisonniers et saisonniers des modèles autorégressifs et moyenne mobile ramène l'équation 4 à la forme de l'équation 8 :

$$\varphi_{AR}(L)\varphi_{SAR}(L^S)(1 - L)^d(1 - L^S)^D Y_t = \theta_{MA}(L)\theta_{SMA}(L^S) \varepsilon_t \quad (\text{Equation 8})$$

où

- φ_{AR} : polynôme autorégressif non saisonnier ;
- φ_{SAR} : polynôme autorégressif saisonnier ;
- θ_{MA} : polynôme de la moyenne mobile non saisonnière ;
- θ_{SMA} : polynôme de la moyenne mobile saisonnière ;
- L : opérateur de retard ;
- $(1 - L)^d$: différence non saisonnière ;
- $1 - L^S$: différence saisonnière ;
- Y_t : valeur de données au temps t ;
- ε_t : un bruit blanc de variance σ^2 .

2.6.4.2. Identification

L'identification consiste à spécifier les trois paramètres p , d , q du modèle ARIMA(p,d,q) au sein des données dont la composante saisonnière est éliminée. La stationnarité du modèle est d'abord testée. Etude graphique de corrélogrammes et test de Dickey–Fuller augmenté (ADF) sont tour à tour effectués. Si la série n'est pas stationnaire, il convient de la transformer (en général par différenciation ou transformation de type Box-Cox) pour obtenir une série stationnaire. Les deux transformations les plus importantes de type Box-Cox sont $\log(X_t)$ et $\sqrt{X_t}$. En cas de différenciation, l'ordre d'intégration d est obtenu par le nombre de fois que la série initiale a été différenciée pour obtenir la stationnarité. Le test ADF et l'analyse de corrélogrammes sont utilisés pour déterminer la stationnarité. Ayant une série stationnaire, on analyse la fonction d'autocorrélation (ACF) et la fonction d'autocorrélation partielle (PACF) pour déterminer les paramètres p , q du modèle. La fonction d'autocorrélation est constituée par l'ensemble des autocorrélations ρ_k (équation 9) :

$$\rho_k = \text{corr}(Y_t; Y_{t-k}) \quad k \in \{1, \dots, K\} \quad (\text{Equation 9})$$

K étant le décalage maximum admissible pour que le coefficient d'autocorrélation ait un sens. En général, $\frac{n}{6} \leq K \leq \frac{n}{3}$ où n est le nombre d'observations temporelles. Si n très grand ($n \geq 150$), on peut prendre $K = \frac{n}{5}$.

La fonction d'autocorrélation partielle désigne l'ensemble des autocorrélations entre les variables entre Y_t et Y_{t-k} , l'influence de la variable Y_{t-k-i} étant contrôlée pour $i < k$.

Plusieurs logiciels de traitement des séries temporelles construisent des corrélogrammes qui affichent des intervalles de confiance à 95 % permettant de déterminer les coefficients statistiquement significatifs à prendre en compte.

Certaines règles sont, en général, retenues pour interpréter les corrélogrammes :

- Les valeurs d'une fonction d'autocorrélation d'un processus autorégressif $AR(p)$, décroissent exponentiellement avec des alternances possibles de valeurs positives et négatives. La fonction d'autocorrélation partielle, quant à elle, présente p pics aux p premières valeurs du corrélogramme d'autocorrélation partielle ;
- Le corrélogramme d'une fonction d'autocorrélation d'une moyenne mobile, $MA(q)$, présente q pics aux q premières valeurs. La fonction d'autocorrélation partielle d'une $MA(q)$ présente des valeurs exponentiellement décroissantes ;
- Si la fonction d'autocorrélation décroît lentement, il faut différencier la série avant l'identification du modèle ;
- les processus mixtes de type ARMA peuvent présenter des graphes d'autocorrélation et d'autocorrélation partielle plus complexes à interpréter et nécessiter plusieurs itérations de type identification – estimation – diagnostic.

D'un autre côté, Johnson et Dinardo [223] suggèrent, pour la détermination des ordres p et q d'un processus ARMA(p, q), une procédure en trois étapes. D'abord, on estime par les moindres carrés ordinaires (MCO) quelques processus autorégressifs d'ordre assez important. Ensuite, on sélectionne la régression ayant la plus petite valeur du critère d'information d'Akaike (AIC), les résidus (ϵ_t) de cette estimation sont pris comme estimateurs des (ϵ_t) qui sont inconnus dans le modèle ARMA. Enfin, un nombre de modèles ARMA sont estimés en utilisant ces résidus estimés. Les équations sont estimées par les MCO pour diverses valeurs de p et de q . On choisit la spécification ayant la plus petite valeur des critères d'Akaike ou de Schwarz (BIC).

2.6.4.3. Estimation des paramètres du modèle

En théorie, l'estimation des paramètres d'un modèle ARIMA(p, d, q) lorsque p, d, q sont supposés connus peut se réaliser par différentes méthodes dans le domaine temporel. Ces méthodes sont :

- les moindres carrés ordinaires (cas où $q=0$). Dans ce cas, on utilise les équations dites de Yule-Walker. En remplaçant les autocorrélations théoriques par leurs estimateurs, on peut retrouver les estimateurs des MCO des paramètres du modèle par la résolution des équations de Yule-Walker ;
- le Maximum de Vraisemblance approché [212] ;
- le Maximum de Vraisemblance exacte.

Plusieurs logiciels statistiques implémentent ces méthodes d'estimation d'un modèle ARIMA notamment les méthodes du maximum de Vraisemblance approchée et du maximum de vraisemblance exacte.

La maximisation est réalisée à l'aide d'algorithmes d'optimisation non linéaire (Newton–Raphson, méthode du simplexe). Les résidus étant supposés comme un bruit blanc gaussien (N, σ^2).

2.6.4.4. Diagnostic du modèle

Les critères de contrôle et de diagnostic permettent de valider le modèle choisi. Le modèle choisi sera considéré comme le meilleur basé sur un ensemble de critères comprenant :

- les t-tests de significativité des paramètres estimés ;
- l'analyse des résidus (normalité, absence d'auto-corrélation, homoscédasticité) ;
- les critères d'informations.

Les t-tests de significativité permettent de tester la significativité des coefficients estimés.

Au niveau de l'analyse des résidus, les valeurs des fonctions d'autocorrélation et d'autocorrélation partielle de la série des résidus doivent être toutes nulles. Si les autocorrélations d'ordre 1 et 2 diffèrent significativement de zéro, alors la spécification du modèle n'est sûrement pas adaptée. Il peut arriver, cependant, qu'une ou deux autocorrélations d'ordre supérieur dépassent, par aléas, les limites de l'intervalle de confiance à 95 %. De plus, les caractéristiques des résidus doivent correspondre à celles d'un bruit blanc. La statistique Q de Ljung-Box, connu encore sous le nom de statistique de Box et Pierce modifiée est couramment utilisée pour tester le bruit blanc [218]. La statistique Q doit être vérifiée sur une base comprise entre un quart et la moitié des observations. Elle ne doit pas être significative pour que l'hypothèse du bruit blanc puisse être conservée pour la série des résidus. La normalité peut être testée graphiquement, soit en représentant l'histogramme des résidus, soit par le graphe quantile-quantile (qq-plot).

Les critères d'informations sont importants pour la validation du modèle ARIMA. Les modèles ayant la plus petite valeur de ces critères devront être choisis. Parmi ces critères, il faut distinguer :

- le critère d'information d'Akaike (AIC), présenté par l'équation 10 :

$$AIC = 2 \log(L) + 2k \quad (\text{Equation 10})$$

où L est la vraisemblance des données et k est le nombre de paramètres à estimer du modèle.

- le critère d'information d'Akaike corrigé (AICc), défini par l'équation 11 :

$$AIC_c = AIC + \frac{2k(k+1)}{(n-k-1)} \quad (\text{Equation 11})$$

où k est le nombre de paramètres à estimer du modèle et n désigne la taille de l'échantillon.

- le critère d'information bayésien (BIC), estimé par l'équation 12 :

$$BIC = 2 \log(L) + k \log(n) \quad (\text{Equation 12})$$

où L est la vraisemblance des données, n le nombre d'observations dans l'échantillon étudié et k le nombre de paramètres.

Les bons modèles sont obtenus en minimisant l'AIC, l'AICc ou le BIC. Ces critères conduisent donc à sélectionner des modèles dont la vraisemblance est grande, en la pénalisant par la complexité du modèle.

En plus des critères d'information, les critères d'erreurs peuvent être utilisés pour évaluer le modèle. Parmi ces erreurs, on peut citer :

- l'erreur racine quadratique moyenne (RMSE), estimée par l'équation 13 :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \hat{X}_i)^2} \quad (\text{Equation 13})$$

- l'erreur quadratique moyenne (MSE), définie par l'équation 14 :

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \hat{X}_i)^2 \quad (\text{Equation 14})$$

- l'erreur absolue (MAE), présentée par l'équation 15 :

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_i - \hat{X}_i| \quad (\text{Equation 15})$$

Dans ces équations, \hat{X}_i représente les valeurs prédites de X au temps i et n est le nombre d'observations.

2.6.4.5. Prévision

L'un des principaux objectifs de la construction d'un modèle pour une série chronologique est de pouvoir prévoir les valeurs de cette série à des périodes ultérieures. Les modèles standards ARIMA permettent de faire des prévisions basées uniquement sur les valeurs passées de la variable prévisionnelle. Le modèle suppose que les valeurs futures d'une variable dépendent linéairement de ses valeurs passées, ainsi que des valeurs des chocs passés (stochastiques).

L'évaluation de la précision de ces prévisions revêt une importance égale. Cette étape intervient lorsque le modèle passe le triptyque identification – estimation – diagnostic.

Considérons un processus ARMA(p, q) et on note \hat{X}_{t+k} la prévision de X faite au temps t à l'horizon k (équation 16) :

$$\hat{X}_{t+k} = E[X_{t+k}|I_t] \quad (\text{Equation 16})$$

I_t est l'information disponible à l'instant t .

La formule déduite du processus ARIMA est définie par l'équation 17 :

$$\hat{X}_{t+k} = \sum_{j=1}^{p+q} \hat{\varphi}_j \hat{X}_{t+k-j} + \sum_{i=1}^q \theta_i \hat{\varepsilon}_{t+k-i} \quad \text{où} \quad \begin{cases} \hat{X}_{t+k} = X_{t+k-j} \text{ pour } j \geq k \\ \hat{\varepsilon}_{t+k-i} = \begin{cases} 0 \text{ pour } i < k \\ \varepsilon_{t+k-i} \text{ pour } i \geq k \end{cases} \end{cases} \quad (\text{Equation 17})$$

où :

- \hat{X}_{t+k} la prévision de X faite au temps t à l'horizon k ;
- $\hat{\varphi}_i$ les prévisions des polynômes autorégressifs ;
- $\hat{\theta}_i$ les prévisions des polynômes mobiles.

DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES

CHAPITRE 3 : MATERIEL

3.1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

3.1.1. Situation géographique

Le secteur d'étude est le bassin versant du N'Zi (BVN), sous bassin du bassin versant du fleuve Bandama. Il est situé au cœur de la Côte d'Ivoire et a pour chef-lieu de bassin versant la ville de Dimbokro. Il est compris entre les longitudes 3°46' et 5°24' Ouest et les latitudes 5°58' et 9°26' Nord. Il couvre une superficie d'environ 35 309 km² et occupe près de 11 % du territoire national. Il est situé à cheval sur le District autonome de Yamoussoukro et huit régions administratives (Agneby-Tiassa, Bélier, Gbeke, Hambol, Iffou, Moronou, N'Zi et Tchologo) comportant 80 sous-préfectures (Figure 3-1). Le BVN a une configuration géographique allongée. De ce fait, il comporte tous les grands ensembles climatiques de la Côte d'Ivoire. Il s'étend des écosystèmes forestiers au sud aux écosystèmes savanicoles au nord du bassin.

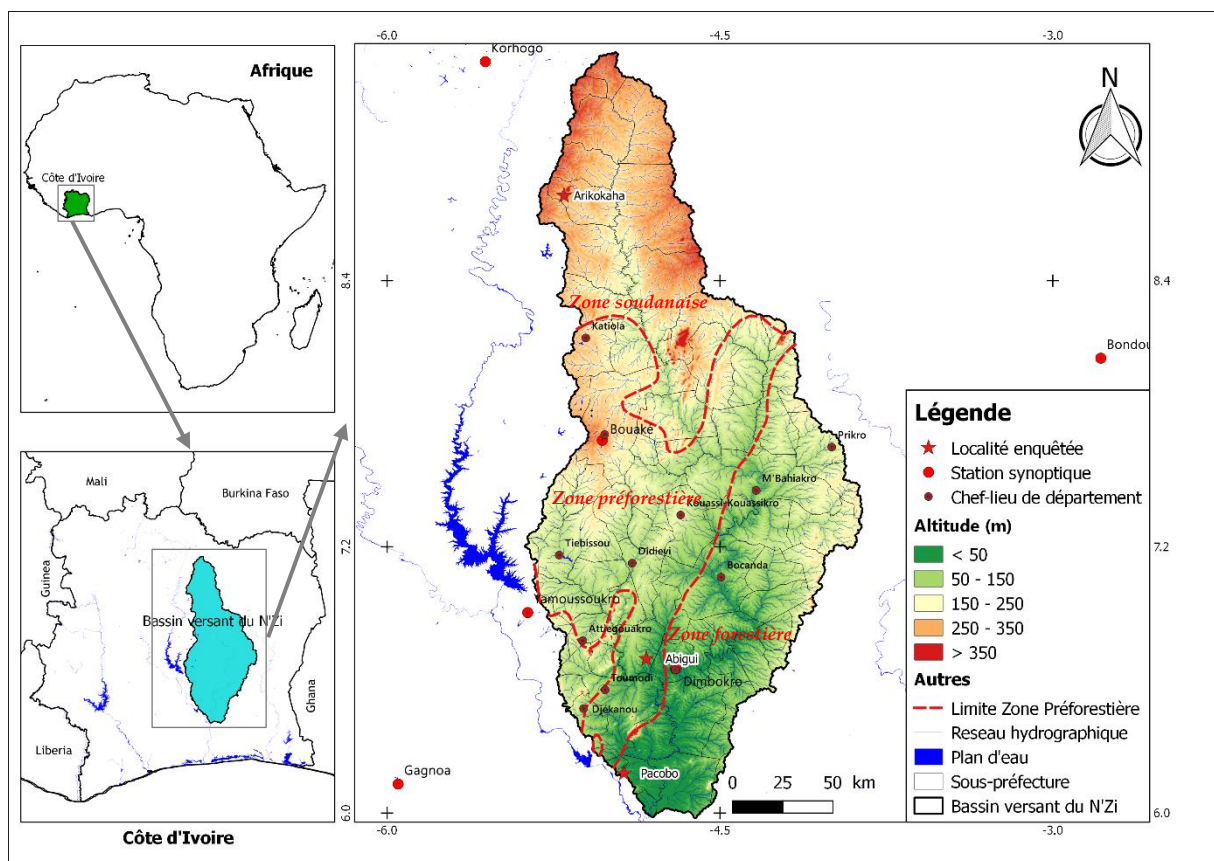


Figure 3-1 : Localisation du bassin versant du N'Zi

3.1.2. Caractérisation biophysique

3.1.2.1. Relief et hydrographie

Le BVN est dominé dans l'ensemble par un relief très peu accidenté [224] dont l'altitude varie à plus de 600 m au nord et à moins de 100 m au sud. L'altitude moyenne est de 215 mètres (Figure 3-1). Plusieurs collines parsèment le paysage dont les plus importantes sont : Mont Niangbo (Niakaramandougou), Mont Kokumbo (Toumodi), Orumbo-Bocca (Bouaké), Blafo-Guéo (Toumodi) et Mont Diedka (Toumodi) [225].

Sur le plan hydrographique, le BVN est limité par celui de la Comoé au Nord et à l'Est et celui du Bandama au Sud et à l'Ouest (Haut-Bandama à l'Ouest et Bas Bandama au Sud). Son cours d'eau principal, le N'Zi, représente le premier affluent important de la rive gauche avec une longueur de 725 km. Il prend sa source au nord de la Côte d'Ivoire, à 400 m d'altitude, à l'Est de la ville de Ferkessédougou dans le District des Savanes et conflue avec le Bandama au Sud à N'Zianoua dans le District des Lagunes [46]. Le N'Zi enregistre une pente moyenne de 0,053 %. Il possède plusieurs affluents tributaires dont les plus importants sont le Kan, le Taré, le Koubéké, l'Ourougou, l'Atofo. Ces affluents sont fortement affectés par l'érosion régressive du N'Zi [225]. La densité du réseau hydrographique diminue du Sud au Nord.

3.1.2.2. Climat

La zone d'étude est soumise à un climat de type *Aw* dans la classification de Köppen-Geiger [226]. Il s'agit d'un climat tropical à hiver sec et à quatre saisons, dont deux pluvieuses et deux sèches.

Selon Eldin [227] et Goula *et al.* [46], la zone d'étude présente trois types climats (Figure 3-2). Au nord, il règne le régime tropical de transition (climat soudano-guinéen). Sa limite méridionale se situe approximativement au niveau du 8^e parallèle Nord. Il présente deux saisons : une saison des pluies d'avril à septembre et une saison sèche de novembre à avril. De novembre à mars-avril, la sécheresse est absolue (période sans précipitations) indiquant la période d'harmattan.

Le régime équatorial de transition atténué (climat baouléen) est caractéristique de la partie centrale du bassin. Il est caractérisé par deux saisons pluvieuses et une saison sèche. La période d'harmattan dure entre 1 et 3 mois.

Dans la partie méridionale, de faible superficie, il règne le climat équatorial de transition (climat attiéen) caractérisé par quatre saisons (deux saisons sèches et deux saisons pluvieuses) et l'harmattan dure entre 15 jours et 2 mois.

La température moyenne annuelle de la zone d'étude est de 28,1 °C. La moyenne des précipitations annuelles atteint 1 094 mm.

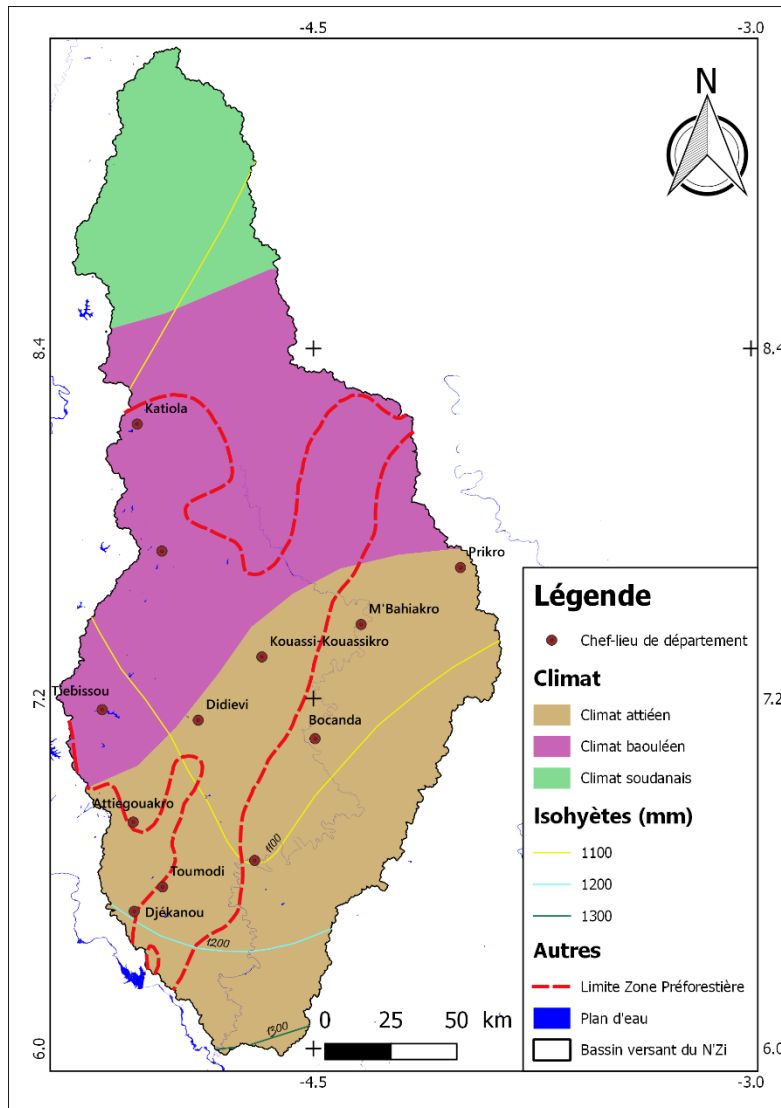


Figure 3-2 : Carte climatique du BVN [227]

3.1.2.3. Sols

Les sols du BVN appartiennent à la catégorie des sols ferrallitiques moyennement désaturés au Nord et à celle des sols ferrallitiques fortement désaturés au Centre et au Sud [228]. Toutefois, on rencontre des sols hydromorphes et peu évolués au bas des pentes et dans les bas-fonds et des sols de type ferrugineux tropical.

Depuis 2013, un atlas des sols d'Afrique a été réalisé par Jones *et al.* [227] et est basé sur le système de classification de la base de référence mondiale pour les ressources en sols [229]. Dans cet atlas, on distingue majoritairement dans le bassin versant des plinthosols pisoplinthiques (45 %), des plinthosols pétriques (26 %), des acrisols plinthiques (11 %), des cambisols ferralliques (6 %), etc. (Figure 3-3).

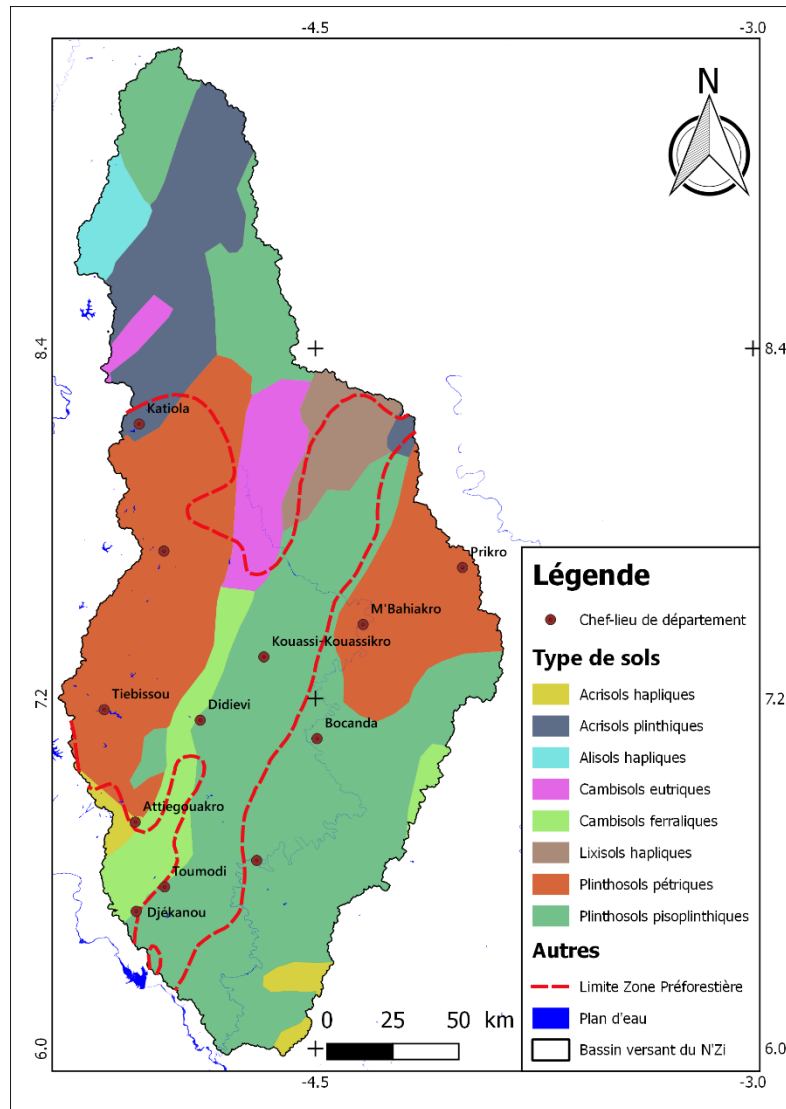


Figure 3-3 : Carte des sols de la zone d'étude

3.1.2.4. Végétation et dynamique forestière

La zone d'étude, englobant la moitié Est du V baoulé, possède différents types d'écosystèmes dont les savanes, la forêt et les plantations agricoles. La végétation savanicole constitue plus de 30 % de l'occupation du sol [230]. Les savanes s'étendent de Kong à Pacobo. On les retrouve dans l'ensemble du BVN. Cependant, elles sont moins répandues dans le sud-est du bassin, surtout dans les localités de Bongouanou, M'Batto, Tiassalé.

La végétation du BVN est très diversifiée. Dans le nord du bassin, le paysage végétal est constitué de savanes herbeuses et arbustives. La végétation herbacée est composée d'espèces du genre *Panicum* et de *Pennisetum* qui sont régulièrement affectées par les feux de brousse. À côté de ces savanes, d'autres formations végétales telles que les savanes arbustives, les savanes boisées, les forêts claires, les forêts-galeries, les terres cultivées et les jachères peuvent être localisées dans le BVN [231].

Au niveau de la zone soudano-guinéenne (zone préforestière), la flore est constituée d'une mosaïque de savanes guinéennes et de forêts denses humides semi-décidues ainsi que des bosquets ou îlots forestiers. Les savanes boisées sont formées d'arbres ou d'arbustes clairsemés de groupements graminéens (spécialement *Panicum* spp., *Loudetia arundinacea*, *L. simplex*, etc.) et de peuplements de rôniers (*Borassus aethiopum*) [231]. Cette végétation est régulièrement affectée par les feux de brousse. Les forêts-galeries, quant à elles, sont situées le long des rivières pérennes et dans les vallées ou ravins humides en permanence [231].

La partie méridionale du bassin appartient à la zone de forêt dense semi-décidue où quelques îlots forestiers denses subsistent encore au sommet des collines. Les forêts, généralement dégradées, couvrent environ 14 % de la superficie du BVN [230]. Elles se présentent sous forme résiduelle au milieu de la savane. Elles se concentrent autour du cours d'eau N'Zi et à l'est de la ligne de partage des eaux.

En général, à côté de ces végétations naturelles, il existe des végétations liées à l'action anthropique, dont les mosaïques forêt-cultures, les mosaïques savanes-cultures et les cultures [232]. En 2016, ces végétations représentaient 51 % de la superficie du BVN [230].

La déforestation reste une menace importante au sein de ce bassin. En effet, les pertes forestières sur la période 1990-2000 sont évaluées à 502 305 ha et à 155 896 ha sur la période 2000-2015 [84]. Les raisons principales de la déforestation sont les feux de brousse, le défrichage pour culture sur brûlis et l'exploitation illicite de la forêt [30]. Malgré ces pressions, le BVN ne bénéficie pas de projets de reboisement conséquent de la part de l'administration forestière et des particuliers. En effet, les espaces reforestés couvrent environ 31 161 ha [230].

La dynamique forestière sur la période 1990-2015 et l'occupation du sol en 2016 sont présentées par la Figure 3-4.

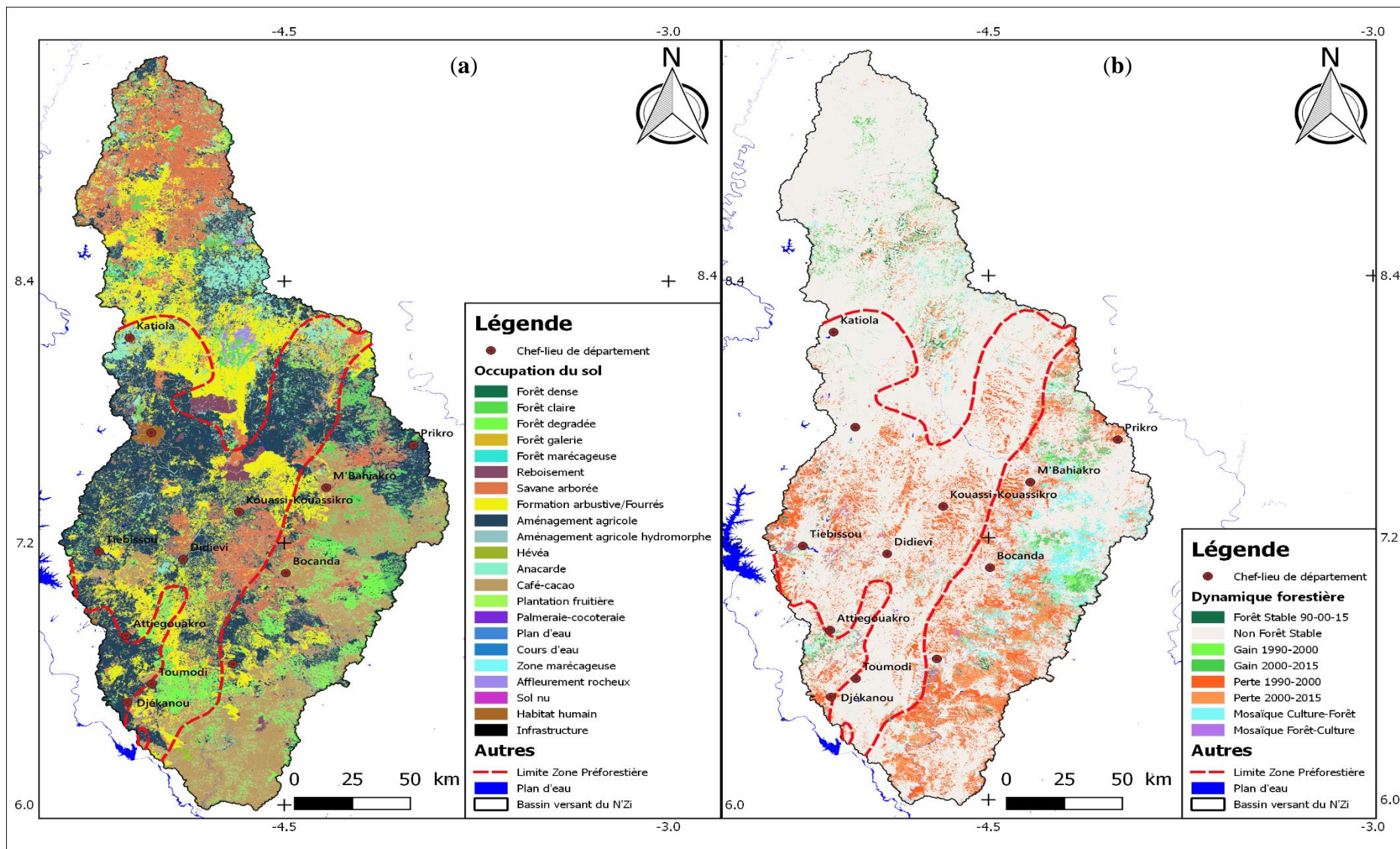


Figure 3-4 : Carte d'occupation du sol en 2016 (a) et de la dynamique forestière de 2000 à 2015 (b) du BVN [84,230]

3.1.3. Description du milieu humain

Le bassin versant a connu une croissance démographique importante. En effet, sa population qui était de 1 834 623 habitants en 1998 est passée à 2 866 836 habitants en 2014 répartis entre 492 987 ménages selon le recensement général de la population et de l'habitat [233]. La population actuelle vivant dans le bassin versant représente 12,65 % de la population nationale dont 11,34 % sont des non-nationaux [233]. Cette population est essentiellement rurale. En effet, 70,64 % des individus vivent en milieu rural contre 29,36 % en milieu urbain [233].

La densité de population est estimée à 81,2 habitants/km² en 2014. La croissance moyenne annuelle sur la période 1998 – 2014 est évaluée à 2,87 %, supérieure à la moyenne nationale de 2,55 % [233].

Le BVN est occupé par plusieurs groupes ethniques dont les Baoulé, les Sénoufo, les Agni, les Abbey, les Ngen, les Kroubou et les Dioula. Spatialement, le bassin versant est occupé majoritairement par les Baoulé (57,3 %) localisés au centre et au sud-ouest, les Sénoufo (31,1 %) au nord, les Agni (8,9 %) au sud-est, les Abbey (0,6 %) au sud, et les Ngen (1,9 %) au centre-est (Figure 3-5). Ces populations sont majoritairement des agriculteurs, des éleveurs (principalement les Sénoufo et les Dioula) et des chasseurs (principalement les Baoulé, les Sénoufo et les Dioula). Les chasseurs pratiquent deux sortes de chasse dans le BVN composées de la chasse collective au filet au moment des feux de brousse et la chasse individuelle [234].

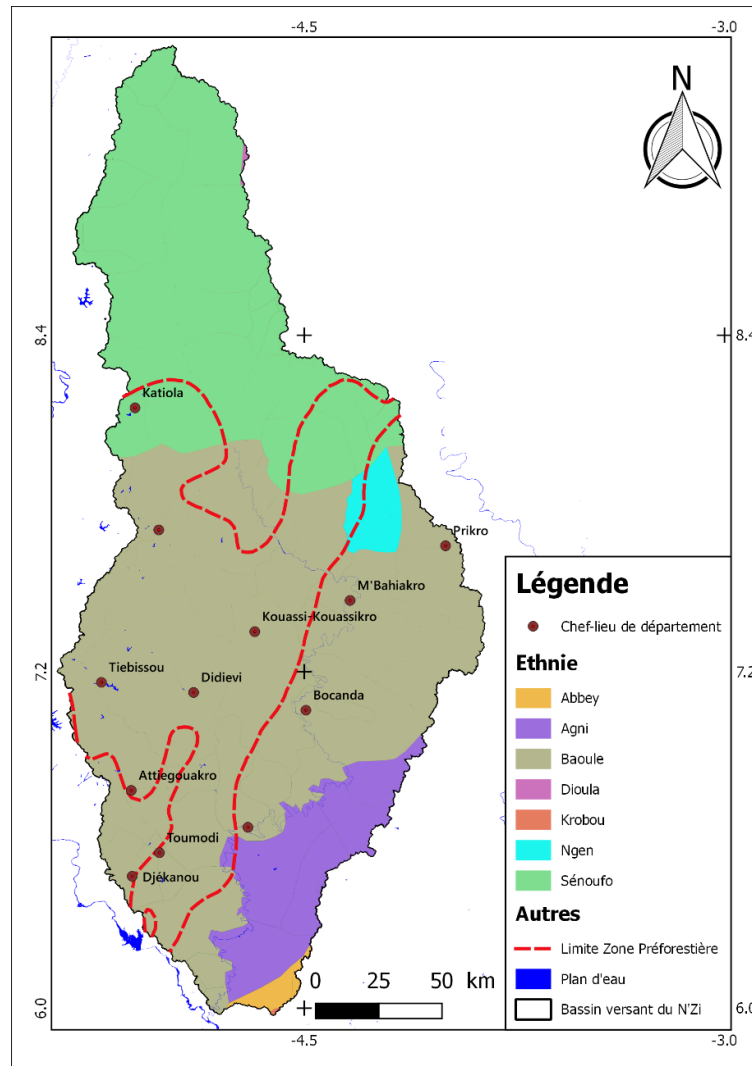


Figure 3-5 : Répartition géographique des groupes ethno-linguistiques du BVN [235]

3.2. DONNEES SATELLITAIRES

3.2.1. Données de feux de végétation

Dans le cadre de cette étude, deux types de données de feux de végétation ont été utilisées. Les départs de feux ont été évalués à l'aide d'une combinaison des produits de feux actifs MODIS MCD14DL [154] de résolution 1 km et VIIRS VNP14IMGTDL [153] de résolution 375 m. Ces produits, issus de la collection 6 des données MODIS/VIIRS, contiennent les coordonnées géographiques, le jour de détection, la température de luminosité, la puissance de rayonnement du feu et le niveau de confiance de détection pour tous les pixels de feu MODIS/VIIRS. Ces données ont été produites par l'Université du Maryland et téléchargeables sur le site web de la NASA LANCE FIRMS [236,237].

En plus des données de feux actifs, les surfaces brûlées ont été évaluées à l'aide de produits de surfaces brûlées MODIS MCD64A1 de résolution de 500 m [156]. Il s'agit d'un produit

MODIS mensuel de niveau 3 de 500 m de résolution contenant par pixel des informations sur le jour de brûlis, la superficie brûlée et d'autres métadonnées [155,156]. Les pixels détectés en tant que pixels brûlés sont directement convertis en zones brûlées. La zone d'étude se trouve dans la fenêtre 9 qui couvre la majeure partie des pays de l'Afrique de l'Ouest et quelques pays de l'Afrique du Nord. Ce produit est disponible sur la période d'avril 2000 à maintenant sur le serveur de l'Université du Maryland <ftp://ba1.geog.umd.edu>.

3.2.2. Données de densité de canopée

En plus des données d'occupation du sol, des données de couverture végétale (canopée de la végétation) ont été utilisées [238]. Il s'agit de données sur le pourcentage de densité de la canopée issues de la base de données Global Forest Change 2000-2016, provenant du satellite Landsat de résolution 30 m. La couverture de la canopée est définie comme la fermeture de la canopée pour toute végétation de plus de 5 m de hauteur et est exprimée en pourcentage (variant de 0 à 100) par pixel de résolution 30 m [239].

En fonction de la densité de la canopée, une typologie de la végétation a été faite en utilisant la catégorisation proposée par la FAO [240] et adoptée par plusieurs études [152,241] (Tableau 3-1).

Tableau 3-1 : Catégorisation de la densité de la canopée

Densité de canopée (%)	Classe de canopée	Probable occupation du sol
0 – 10 %	Très ouverte	Savanes herbeuses, sols nus
10 – 40 %	Ouverte	Forêts ouvertes, savanes arbustives, cultures
40 – 70 %	Modérément dense	Forêts fragmentées, savanes boisées
70 – 100 %	Très dense	Forêts sempervirentes

Source : FAO [240]

3.2.3. Indice de végétation

Des données d'indices de végétation mensuelles MOD13A3 provenant du satellite MODIS Terra de résolution spatiale 1 km [242] ont été utilisées dans cette recherche pour évaluer l'état ou la phénologie de la végétation. Ces produits MODIS fournissent des données sur l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) et l'indice de végétation améliorée (EVI).

Pour cette étude, 192 données mensuelles MODIS NDVI couvrant la période 2001-2016, de niveau 3, contenues dans la grille h17v08 ont été utilisées. Les données mensuelles de feux ont été projetées sur ces données pour l'extraction des valeurs de NDVI. Les valeurs réelles de NDVI ont été calculées en multipliant les valeurs fournies par la bande NDVI par 0,0001 ; les valeurs fournies variant de -2 000 à 10 000. Ces valeurs de NDVI ont permis de catégoriser l'occupation du sol [243] (Tableau 3-2).

Tableau 3-2 : Catégorisation du NDVI

Valeur NDVI	Classe NDVI	Type d'occupation du sol
< 0	Eau ou nuage	Eau ou nuage
0 – 0,1	Très faible	Sols nus
0,1 – 0,3	Faible	Végétation clairsemée
0,3 – 0,5	Moyen	Végétation moyennement dense
0,5 – 0,7	Elevé	Végétation dense
0,7 – 1	Très élevé	Végétation très dense

Source : Tucker [243]

3.2.4. Modèle numérique d'altitude

Le BVN a été délimité en utilisant les données d'altitude du projet *Shuttle Radar Topography Mission 3* (SRTM-3). C'est un Modèle Numérique d'Altitude (MNA) à une seconde d'arc de résolution spatiale 30 m à l'équateur, couvrant 80 % des terres émergées [244]. Dans le cadre de cette étude, cinq fenêtres SRTM-3, correspondant à une zone allant de 5° à 9° en latitude nord et de 4° à 6° en longitude ouest, ont été téléchargées et mosaïquées. Les valeurs des altitudes ont été extraites à partir de ces MNA. Ces valeurs ont été subdivisées en trois classes d'altitude comprises entre 0 et 100 m (plates), 100 à 300 m (modérées) et 300 à 600 m (forte altitude) [245]. La pente (déclivité du terrain) et l'aspect (direction de la pente descendante) ont été dérivés des données d'altitude. Les valeurs de pente ont été classifiées suivant l'échelle utilisée par Garah *et al.* [246].

3.3. DONNEES CLIMATIQUES

Les stations synoptiques situées dans le bassin versant et ainsi que celles situées dans un rayon de 100 km autour de la zone d'étude ont été choisies pour étudier l'évolution du climat et l'action des facteurs climatiques sur la dynamique des feux. Les stations météorologiques sélectionnées pour cette étude se trouvent dans le Tableau 3-3.

Tableau 3-3 : Stations météorologiques de l'étude

Zone phytogéographique	Station	Latitude	Longitude	Altitude	Série chronologique
Zone forestière	Gagnoa	6,133	-5,95	210	1973-2016
Zone préforestière	Dimbokro	6,650	-4,700	92	1973-2016
	Yamoussoukro	6,903	-5,366	213,1	1978-2016
Zone savanicole	Bouaké	7,739	-5,074	374,9	1973-2002 ;
	Korhogo	9,387	-5,557	370	2014-2016

La zone savanicole étant sous contrôle de la rébellion armée durant la crise militaro-politique de 2002 à 2010, les stations synoptiques ont été endommagées en septembre 2002 et les données

climatiques n'ont pu être collectées. La collecte de données a repris en novembre 2014 avec la réparation des stations synoptiques.

Les données climatiques journalières (pluviométrie, température maximale et minimale, vitesse du vent, humidité relative, etc.) des stations synoptiques sélectionnées ont été téléchargées à partir du serveur de la *NOAA National Climatic Data Center* [247]. Ces données, à l'exception de celle de Bouaké et Korhogo, respectent la période minimale de 30 ans d'observations (échelle climatologique de référence) définie par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) pour le suivi de climat [248].

3.4. DONNEES CARTOGRAPHIQUES

3.4.1. Données d'occupation du sol et de dynamique forestière

Dans le cadre de cette étude, les cartes de la dynamique forestière [84] et des occupations du sol [230] réalisées par le BNETD respectivement en 2016 et 2019 ont été utilisées. Ces cartes ont été élaborées avec l'appui de la FAO dans le cadre de la mise en œuvre du mécanisme REDD+ en Côte d'Ivoire. La carte de la dynamique forestière est issue de la classification supervisée des images satellitaires Landsat des années 1990, 2000 et 2015 tandis que la carte d'occupation du sol a été réalisée à l'aide de données Sentinel 2A de l'année 2016. Les types d'occupation du sol ont été réclassifiés en fonction des types de formations végétales et des classes d'occupation du sol (terres forestières, terres cultivées, terres graminéennes, terres humides, zones artificielles et autres terres) proposées par le GIEC [249].

3.4.2. Données de population

Les données modélisées de densité de population³ issues de la collection « *Gridded Population of the World (GPW) version 4* » ont été utilisées. Ces données sont des estimations de la densité de la population humaine basées sur les recensements nationaux et les registres de population pour les années 2000, 2005 et 2010, 2015 et 2020. Les fichiers de données ont été produits sous forme de rasters globaux à une résolution de 30 secondes d'arc (environ 1 km à l'équateur) [250]. Les valeurs de la densité de population ont été subdivisées en trois classes : 0 à 25 hab./km² (faible), 25 à 75 hab./km² (moyen) et 75 à 150 hab./km² (dense) [239]. En plus de ces données, des données de population issues du recensement général de la population et de l'habitat de 2014 ont été utilisées [233].

³ Nombre d'habitants par kilomètre carré

3.4.3. Autres données cartographiques

Cette étude a utilisé les données numériques géoréférencées des localités, du réseau routier et ferroviaire ont été obtenues auprès du BNETD pour l'environnement de propagation des sols. Les distances des feux de végétation éclos par rapport à ces infrastructures ont été calculées et catégorisées suivant les travaux de Stolle *et al.* [245]. En outre, des données pédologiques provenant de l'atlas des sols d'Afrique réalisé par Jones *et al.* [227] ont été utilisées pour évaluer l'occurrence des feux selon le type de sols.

La carte d'accessibilité aux villes développée par Nelson [251] pour l'année 2000 a été utilisée pour estimer le temps de déplacement vers les grandes villes (50 000 habitants ou plus) par voie terrestre ou aquatique. Elle mesure la facilité avec laquelle les communautés communiquent avec les services, les institutions et les centres urbains et stratifie l'état socio-économique, éducatif et sanitaire des communautés. Les valeurs de l'accessibilité aux grandes villes ont été subdivisées en quatre classes comprises entre 0 et 1 heure (très facile), 1 à 3 heures (facile), 3 à 10 heures (difficile) et plus de 10 heures (extrêmement difficile).

3.5. MATERIEL DE TERRAIN

Pour la réalisation des travaux sur le terrain (enquête et observations de terrain), divers matériels ont été utilisés. Le marquage, la recherche de points de feu et la prise de coordonnées des différents types d'occupation du sol ont été réalisés à l'aide d'un récepteur GPS (*Global Positioning System*) Garmin (GSmap 64S). La description de l'occupation et la notation des informations utiles (lieu et date de collecte, coordonnées géographiques, surface brûlée, etc.) ont été réalisées à l'aide de la fiche de relevé préparée à cet effet (Annexe 2). Le questionnaire de l'enquête a été numérisé au sein d'une tablette équipée de l'application Open Data Kit (ODK) Collect pour faciliter la collecte de données (enquête, observations de terrain, prise de vue, etc.). En outre, un guide d'entretien a été préparé pour les groupes de discussions.

CHAPITRE 4 : METHODES

4.1. EVOLUTION DU CLIMAT

4.1.1. Calcul des paramètres et indices climatiques

4.1.1.1. Estimation de l'évapotranspiration de référence

L'évapotranspiration de référence (ET0) est une mesure de la capacité de l'atmosphère à éliminer l'eau de la surface d'un sol avec un couvert végétal disposant de l'eau en abondance. C'est la quantité maximale d'eau susceptible d'être perdue en phase vapeur, sous un climat donné, par un couvert végétal continu spécifié bien alimenté en eau et pour des végétaux sains en pleine croissance [252]. L'évapotranspiration de référence est un important paramètre agrométéorologique dans les études climatiques, hydrologiques et environnementales (suivi des feux, etc.) [128,253,254]. Elle permet expliquer et quantifier les transferts d'eau dans les écosystèmes pour la gestion de l'eau des espaces végétalisés naturels ou semi-naturels et l'estimation des conséquences d'un changement de végétation d'un milieu [128,253,254]. L'équation de Hargreaves modifiée définie par l'équation 18 et adaptée aux données journalières [255,256], a été adoptée dans cette étude. Cette équation a été utilisée dans plusieurs études en zone tropicale [257,258].

$$ET0 = 0,0013 * 0,408 * R_a * (T_{moy} + 17) * (T_{max} - T_{min} - 0,0123 P)^{0,76} \quad (\text{Equation 18})$$

où :

- P est la précipitation journalière en mm ;
- R_a la radiation extraterrestre en $\text{MJ m}^{-2} \text{j}^{-1}$;
- T_{moy} la température moyenne journalière en $^{\circ}\text{C}$;
- T_{max} et T_{min} représentent la température maximale journalière et la température minimale journalière respectivement.

La constante 0,408 est utilisée pour convertir la radiation de $\text{MJ m}^{-2} \text{j}^{-1}$ en mm j^{-1} .

Dans l'équation de Hargreaves, la température moyenne de l'air est une moyenne de la température maximale et minimale, tandis que la radiation extraterrestre (R_a) est calculée en fonction de l'emplacement du site (latitude) et du jour de l'année (jour) suivant équation 19 définie par Walter et al. [259] :

$$R_a = \frac{24}{\pi} * G_{sc} * d_r (\psi_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\psi_s)) \quad (\text{Equation 19})$$

où :

- G_{sc} est la constante solaire ($0,0820 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$) ;

- d_r est l'inverse de la distance relative entre la terre et le soleil, $d_r = 1 + 0,003 \cos [(2\pi J/365)]$;
- ψ_s est l'angle de l'heure du coucher du soleil (en radians) $\psi_s = \arcsin [-\tan(\varphi) \tan(\delta)]$;
- φ est la latitude du site ;
- δ représente la déclinaison solaire $\delta = 0,409 \sin (2\pi J/365 - 1,39)$;
- J est le jour de l'année (jour julien).

4.1.1.2. Déficit de pression de vapeur

Le déficit de pression de vapeur (ou déficit de saturation ou VDP) est la différence entre la pression de vapeur saturante de l'air et la pression de vapeur actuelle. Il est directement lié aux taux de transpiration des plantes et a une influence sur la santé et la croissance des plantes. Il est défini par l'équation 20 ci-dessous :

$$VDP = e_a - e_s \quad (\text{Equation 20})$$

où e_a est la pression de vapeur réelle quotidienne moyenne et e_s la pression de vapeur moyenne de saturation quotidienne.

4.1.1.3. Anomalie standardisée des pluies et températures

L'anomalie standardisée utilisée pour quantifier le déficit des paramètres climatiques (précipitations, températures) et caractériser la sécheresse météorologique sur une gamme d'échelles de temps.

Pour chaque paramètre climatique, l'anomalie a été calculée en suivant l'équation 21 ci-dessous :

$$A_i = \frac{(\overline{X_m} - \langle \overline{X_m} \rangle)}{\sigma(\overline{X_m})} \quad (\text{Equation 21})$$

où :

- X est la variable étudiée ;
- $\overline{X_m}$ est la valeur moyenne spatiale pour la période étudiée m ;
- $\langle \overline{X_m} \rangle$ est la moyenne de $\overline{X_m}$ sur la même période sur l'ensemble des données plurimensuelles ou pluriannuelles ;
- $\sigma(\overline{X_m})$ est l'écart type de $\overline{X_m}$ pour la série chronologique totale sur la même période.

Une anomalie positive indique que la variable analysée pour un mois spécifique est plus grande que la moyenne.

L'anomalie des précipitations (Indice Standardisé des Précipitations ou SPI) est utilisée pour déterminer l'intensité, la durée et la fréquence des épisodes de sécheresse dans les différentes

régions étudiées. Les valeurs positives indiquent une période humide. Inversement, des valeurs négatives sous-tendent des périodes sèches. Les périodes sèches ou humides ont été catégorisées en utilisant la classification de McKee *et al.* [260] (Tableau 4-1).

Tableau 4-1 : Catégorisation de l'Indice Standardisé des Précipitations

Valeurs du SPI	Catégorie	Valeurs du SPI	Catégorie
0 à -0,99	Sécheresse légère	0 à 0,99	Humidité légère
-1,00 à -1,49	Sécheresse modérée	1,00 à 1,49	Humidité modérée
-1,50 à -1,99	Sévère sécheresse	1,50 à 1,99	Sévère humidité
≤ -2,00	Extrême sécheresse	≥ 2,00	Extrême humidité

Source : McKee *et al.* [260]

On considère que l'on est en face d'une période sèche ou humide dès lors que les valeurs de l'indice deviennent inférieures à -0,99 ou supérieures à 0,99 respectivement. La durée de la séquence sèche ou humide correspond à la durée pendant laquelle les valeurs du SPI restent inférieures à -0,99 ou supérieures à 0,99 respectivement [260,261].

L'anomalie de température quant à elle permet de déterminer les périodes chaudes au sein des stations d'intérêt. La catégorisation de l'anomalie standardisée des températures est basée sur celle du SPI.

4.1.1.4. Estimation des indices de risque de feu

4.1.1.4.1. Indice d'Angström

L'indice d'Angström (AI) est couramment utilisé en Suède et en Afrique du Sud [262]. Il utilise la température de l'air et l'humidité relative pour calculer un indice numérique du risque d'incendie [263]. Ce nombre est égal à la gravité du risque d'incendie et peut être caractérisé de « Extrême », « Très Elevé », « Elevé », « Modéré » et « Bas » en fonction des valeurs. Il est basé uniquement sur les conditions météorologiques, sans ajustement pour l'humidité du combustible. Plus le nombre est faible, plus le risque d'incendie est élevé [264].

L'indice d'Angström est estimé par l'équation 22.

$$AI = \left(\frac{RH}{20}\right) + \left(\frac{27 - TMOY}{10}\right) \quad (\text{Equation 22})$$

où *TMOY* est la température moyenne et *RH* est l'humidité relative.

Si

- $AI > 4$, occurrence d'incendie improbable
- $2,5 < AI < 4,0$, conditions d'incendie sont défavorables
- $2,0 < AI < 2,5$, conditions d'incendie sont favorables

- $AI < 2$, occurrence de feu très probable

4.1.1.4.2. Indice de risque de feu de Lowveld

L'indice Lowveld Fire Danger Index (FDI), largement utilisé en Afrique du Sud et fournissant une mesure raisonnable du risque d'incendie à court terme, a été utilisé dans cette étude. Il décrit les conditions qui influent sur la facilité d'inflammation, la vitesse de propagation et l'impact des incendies. Le FDI est estimé à l'aide de la température et l'humidité relative [30] et défini par l'équation 23 :

$$FDI = (TMOY - 35) - \left(\frac{35 - TMOY}{30} \right) + (100 - RH) \times 0,37 + 30 \quad (\text{Equation 23})$$

où $TMOY$ est la température moyenne et RH est l'humidité relative.

Les catégories du FDI sont les suivantes :

- $0 < FDI < 20$, risque très faible;
- $21 < FDI < 45$, risque modéré ;
- $46 < FDI < 60$, risqué élevé ;
- $61 < FDI < 75$, risqué très élevé ;
- $76 < FDI < 100$, risqué extrêmement élevé.

4.1.2. Analyse des tendances

Le test non paramétrique de Mann-Kendall est couramment utilisé pour détecter des tendances monotones dans des séries de données environnementales, de données climatiques ou de données hydrologiques [265,266]. Il permet d'identifier les tendances au sein de ces données de séries chronologiques [267]. Les tendances des données climatiques mensuelles (précipitations, température maximale et minimale, humidité relative, évapotranspiration de référence) au cours des 44 dernières années (1973-2016) des stations synoptiques sélectionnées ont été calculées en utilisant le test non paramétrique de Mann-Kendall [265,266] et l'estimateur de pente de Theil-Sen [268].

Le test de Man-Kendall est un test simple, robuste et adapté aux données non distribuées normalement et ayant des valeurs aberrantes [14]. Il est basé sur les valeurs de la statistique S , qui pour une série temporelle x_i est donnée par les équations 24 et 25 :

$$S = \sum_i^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(X_j - X_i) \quad (\text{Equation 24})$$

$$\text{sign}(X_j - X_i) = \begin{cases} 1 & \text{si } X_j - X_i > 0 \\ 0 & \text{si } X_j - X_i = 0 \\ -1 & \text{si } X_j - X_i < 0 \end{cases} \quad (\text{Equation 25})$$

Les valeurs positives (négatives) de S indiquent une tendance monotone positive (négative). Pour des données distribuées de façon identique et indépendante, la moyenne $E(S) = 0$ et la variance est définie par l'équation 26 :

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^q t_i(t_i-1)(2t_i+5)] \quad (\text{Equation 26})$$

où q est le nombre de groupes liés et t_i est le nombre de valeurs de données dans le $i^{\text{ème}}$ groupe. La statistique du test standard Z est calculée par la formule définie par l'équation 27 :

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{si } S < 0 \end{cases} \quad (\text{Equation 27})$$

La présence d'une tendance statistiquement significative est évaluée en utilisant la valeur Z . Une valeur positive de Z indique une tendance à la hausse, tandis que les valeurs négatives présentent une tendance à la baisse. Pour tester une tendance monotone ascendante ou descendante (test bilatéral) au niveau de signification α , H_0 est rejetée si $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$, où $Z_{1-\alpha/2}$ est obtenu à partir des tables de distributions cumulées normales.

Bien que la statistique de Mann-Kendall indique la présence d'une tendance monotone dans les séries chronologiques, elle est souvent complétée par l'estimateur de pente de Theil-Sen (tau ou τ) [268] qui donne la tendance linéaire médiane correspondante. Il est défini selon l'équation 28 :

$$\tau = \text{médiane}\left(\frac{y_j - y_i}{x_j - x_i}\right) \quad ; j > i \quad (\text{Equation 28})$$

L'intersection de la droite ou ordonnée à l'origine a été calculée à l'aide de l'estimateur de Conover (IC) utilisant la pente médiane et la médiane des variables [269] (équation 29).

$$IC = \text{médiane}(y) - \tau * \text{médiane}(x) \quad ; j > i \quad (\text{Equation 29})$$

Le test non paramétrique de Mann-Kendall et l'estimation de la pente de Sen pour les données climatiques ont été calculés en utilisant le package trend [267] du logiciel R [270].

4.1.3. Détection de rupture

Le test non paramétrique de Pettitt [271] a été utilisé pour détecter le point de changement au sein des données pluviométriques et hygrométriques. Il teste l'hypothèse nulle selon laquelle les T variables suivent une même distribution F (pas de changement), et l'hypothèse alternative comme étant qu'à un temps t se produit un changement de distribution. La statistique non paramétrique est définie par l'équation 30 :

$$K_T = \max \left| \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^T \text{sign}(X_i - X_j) \right| \quad (\text{Equation 30})$$

La probabilité de dépassement approximative d'une valeur k est définie et permet d'apprécier l'importance de la rupture (équation 31).

$$\text{Prob}_{K_T} \approx 2 \exp\left(\frac{-6K_T^2}{T^3 + T^2}\right) \quad (\text{Equation 31})$$

Le test non paramétrique de Pettitt pour les données pluviométriques et hygrométriques a été réalisé en utilisant le package trend [267] du logiciel R [270].

4.2. DYNAMIQUE RETROSPECTIVE ET PROSPECTIVE DES FEUX DE VEGETATION

Le phénomène de feux de brousse est habituellement caractérisé par deux paramètres, à savoir : la surface brûlée et le nombre de feux, exprimés par une moyenne ou une somme pour une période donnée. La dynamique de feux a été analysée sur une période de 16 années allant de 2001 à 2016. L'analyse spatio-temporelle de l'apparition des feux dans la zone ont été évalués avec une combinaison de données MODIS de feux actifs MCD14DL de la résolution de 1 km [154], VIIRS de feux actifs de la résolution de 375 m [153] et des emprises de zones brûlées générées à partir de données MODIS de surfaces brûlées (MCD64A1) de résolution 500 m [55,56,157].

4.2.1. Vérité terrain et prétraitement des produits de feux actifs

Les feux actifs enregistrés par les capteurs MODIS et VIIRS ont fait l'objet d'une validation à travers des missions de terrain en utilisant les coordonnées géographiques associées à ces feux. Compte tenu de la persistance des traces des feux plusieurs jours après le feu, l'objet des missions était de vérifier la présence ou l'absence de départ de feu à l'endroit identifié comme feu actif. Ces missions ont lieu entre novembre 2016 et mars 2017 au sein des trois écorégions et ont permis de visiter 53 points de feux.

Pour cette étude, les foyers de feu détectés avec une probabilité de détection élevée (entre 80 et 100 %) ont été considérés au regard des observations de terrain pour éviter la prise en compte des faux départs de feux détectés [53,272]. Le produit des feux actifs peut détecter des pixels de feu répétés liés au même évènement de brûlure pour plusieurs raisons :

- il peut détecter différentes sections du même front d'incendie et générer différents feux ;
- le capteur peut être saturé et générer des incendies répétés le long de la trajectoire satellitaire ;
- le même incendie peut brûler pendant plusieurs heures et donc être détecté par les satellites Terra et Aqua.

Pour évaluer la variabilité intra-annuelle du nombre de feux actifs, ces données ont été regroupées et leur proportion cumulative mensuelle calculée suivant l'équation 32 définie par Oliveras *et al.* [53] :

$$P_i = P_{i-1} + \frac{Px_i}{Px} \quad (\text{Equation 32})$$

où :

- P_i est la proportion cumulée de feux actifs pour le mois i ;
- P_{i-1} est la proportion cumulée de feux actifs pour le mois précédent $i-1$;
- Px_i est le nombre de feux actifs au mois i ;
- Px est le nombre total annuel de feux actifs.

Aussi, les données ont été ensuite regroupées annuellement, et les valeurs totales des feux détectés ont été calculées pour évaluer les tendances à long terme. A l'instar des paramètres climatiques, les anomalies annuelles de foyers de feu ont été évaluées.

4.2.2. Traitement des produits de surfaces brûlées

Pour trouver la superficie des parcelles parcourues par le feu, nous avons utilisé des données mensuelles *MODIS Burned Area Product* – collection 6 (MCD64A1) de la grille h17v08. La couche « *Burn Date* » contenant les jours de brûlure de la végétation a été utilisée. Cette couche contient plusieurs types d'information :

- 0 : zone non brûlée ;
- 1-366 : jour approximatif de brûlure (jour julien) ;
- 900 : neige et autre aérosol ;
- 9998 : eau continentale ;
- 99999 : eau maritime (mer et océan) ;
- 10000 : non classifiée (pas assez de données).

Les données de cette couche ont fait l'objet d'une reclassification (valeurs comprises entre 1 et 366 codées « 1 » et les autres valeurs codées « 0 »). Les données ont été combinées par mois et par année à l'aide de l'outil de calculatrice raster afin d'identifier le degré de brûlage de chaque pixel par addition, et ont fait l'objet d'une vectorisation⁴. Les données vectorisées ont été découpées suivant les contours du bassin versant. Les superficies des polygones créés ont été calculées et exportées sous Excel pour regroupement et manipulation.

Pour trouver la surface des zones brûlées mensuellement, tous les pixels de zones brûlées ont été regroupés. Pour ce produit, la taille minimale des pixels est de 23,5 ha. A l'instar des feux actifs, la proportion cumulée de surfaces brûlées a été calculée en utilisant l'équation de Oliveras *et al.* [53] pour évaluer la variabilité intra-annuelle des zones brûlées. Une typologie des surfaces brûlées a été faite suivant l'échelle proposée par Oliveras *et al.* [53] :

- petite : superficie brûlée < 23,6 ha ;
- moyenne : $23,6 \text{ ha} \leq \text{superficie brûlée} < 100 \text{ ha}$;
- grande : superficie brûlée $\geq 100 \text{ ha}$.

De plus, les anomalies annuelles standards de surfaces brûlées ont été calculées pour la période 2001-2016 à l'aide de l'équation 21.

4.2.3. Répartition spatiale des feux

Une analyse spatiale est faite dans les unités administratives représentées par les sous-préfectures à l'intérieur du bassin versant et concerne le nombre de feux actifs et les surfaces brûlées par unité administrative par année.

Les caractéristiques pyrologiques comme la fréquence, la densité et le feu moyen (ou surface unitaire par feu) ont été calculées à l'aide des cumuls mensuels et spatialisées afin d'évaluer la distribution et la gravité relative des feux dans la zone d'étude.

En plus, les données ponctuelles de foyers de feux ont été utilisées pour produire une carte d'intensité de feux. Une estimation non paramétrique de densité de noyau avec une bande passante fixe a été utilisée pour produire des surfaces continues d'intensité de feu à partir des données ponctuelles [273,274]. La densité des incendies sur l'ensemble du BVN a été évaluée à l'aide du logiciel QGIS avec une résolution spatiale de 300 m.

⁴ Conversion d'un fichier au format raster (où l'information est contenue dans des pixels) à un format vecteur (où l'information est contenue dans des entités de type point, ligne ou polygone).

4.2.4. Modélisation des séries temporelles pyrologiques

4.2.4.1. Analyse des tendances

Les tendances au sein des données pyrologiques ont été analysées à l'aide du test non paramétrique de Kendall saisonnier [275] et des estimateurs de la pente de Sen [268] et d'intersection de Conover [269]. Le principe du test de Kendall saisonnier est identique à celui du test de Mann-Kendall, mais le caractère saisonnier de la série est pris en compte. Il calcule séparément le test de Mann-Kendall pour chacune des m saisons, puis combinant les résultats obtenus. La statistique S de Kendall pour chaque saison est additionnée pour former la statistique globale S' . L'amplitude des tendances a été obtenue à partir de la pente de la droite de régression en utilisant la méthode de Theil-Sen [268]. La présence d'une tendance statistiquement significative a été évaluée en utilisant les valeurs de la statistique Z . Une valeur positive de Z indique une tendance croissante alors qu'une valeur négative de Z indique inversement une tendance décroissante. Il est émis l'hypothèse qu'il n'y a pas de tendance ($Z = 0$) pour la série temporelle étudiée.

4.2.4.2. Modélisation des séries pyrologiques

Les modèles SARIMA ont été utilisés pour la modélisation des séries pyrologiques. La construction des modèles SARIMA a été réalisée en suivant trois étapes proposées par Box et Jenkins : identification, estimation et diagnostic [130,212,218–220].

La stationnarité des séries a été évaluée à l'aide des tests ADF et KPSS (Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin), précédée d'une transformation de Box-Cox visant la stabilisation de la variance. En effet, compte tenu de la distribution non normale des données brutes des variables étudiées (Annexe 4), leur logarithme naturel a été utilisé afin de les normaliser. Une unité a été ajoutée à ces variables afin d'éviter les valeurs nulles dans le calcul logarithmique (Equation 33).

$$Y = \log(X + 1) \quad (\text{Equation 33})$$

La dépendance entre les séries temporelles pyrologiques (occurrence des feux et surfaces brûlées) a été analysée à l'aide des ACF et PACF. Les corrélogrammes ont été tracés avec un intervalle de confiance de 95 % afin de déterminer les coefficients statistiquement significatifs. Les modèles SARIMA ainsi que les coefficients ont été estimés à l'aide de la fonction *auto.arima* du logiciel R [276]. Cette fonction combine des tests de racine unitaire, une minimisation de l'AICc et une évaluation de maximum de vraisemblance pour sélectionner automatiquement le modèle SARIMA adéquat [277]. Ces modèles sont proposés à un intervalle

de confiance de 95 %. De plus, les valeurs simulées ont été comparées aux valeurs des données réelles pour évaluer la capacité prédictive des modèles.

Dans le cadre de cette étude, les modèles ont été validés par l'évaluation de la significativité des paramètres, l'analyse des résidus (autocorrélation, normalité, test de Ljung-Box), l'analyse des erreurs (RMSE, MSE et MAE) [278].

Après avoir démontré que les résidus sont des bruits blancs, une prévision des valeurs futures des variables étudiées est faite à l'aide des modèles SARIMA valides issus de la modélisation. Ces prévisions ont été réalisées sur un horizon de 4 ans (2017-2020). Les analyses ont été effectuées en utilisant les packages forecast [277,279] et trend [267] du logiciel R [270].

4.3. IMPACT DES FACTEURS CLIMATIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX SUR LA DYNAMIQUE DES FEUX

4.3.1. Extraction des données

Les variables étudiées sont le nombre de foyers de feux et la surface brûlée observée dans le cadre de cette étude. L'évaluation de l'impact des variables climatiques sur les variables étudiées s'est réalisée à l'aide des données météorologiques. Les moyennes mensuelles et annuelles des variables météorologiques ont été calculées à partir des données journalières des stations synoptiques situées dans la zone d'étude. Les variables météorologiques et climatiques utilisées dans cette étude sont consignées dans le Tableau 4-2.

En outre, cette étude a évalué l'effet des variables environnementales sur l'occurrence des feux de végétation. Les données de végétation (type d'occupation du sol, indice de végétation, densité de la canopée), topographie (altitude, aspect, pente, sols) et facteurs anthropogéniques (distance aux routes et aux localités, accessibilité aux villes, densité de population) ont été utilisées pour évaluer leur impact sur la dynamique des feux.

Les points de feux ont été superposés aux variables environnementales spatialisées (altitude, pente, occupation du sol, densité de canopée, etc.). Les valeurs des pixels de ces variables d'intérêt ont été extraites à l'aide du logiciel QGIS.

Tableau 4-2 : Variables météorologiques et climatiques utilisées

Type	Code	Signification	Unité
Variables météorologiques	PRCP	Précipitation totale	mm
	TMOY	Température moyenne	°C
	MAX	Température maximale	°C
	MIN	Température minimale	°C
	AT	Amplitude thermique ⁵	°C
	ET0	Evapotranspiration de référence	mm
	WDSP	Vitesse moyenne du vent	m/s
	MXSPD	Vitesse maximale du vent	m/s
	RH	Humidité relative moyenne	%
	VDP	Déficit de pression de vapeur	mbar
	SLP	Pression réduite au niveau de la mer	mbar
	DEWP	Point de rosée ou température de rosée	°C
	VISIB	Visibilité moyenne	km
Indices de sécheresse et de risque de feu	SPI1	Anomalie pluviométrique à 1 mois	
	SPI3	Anomalie pluviométrique à 3 mois	
	SPI6	Anomalie pluviométrique à 6 mois	
	SPI9	Anomalie pluviométrique à 9 mois	
	SPI12	Anomalie pluviométrique à 12 mois	
	AI	Indice d'Angstrom	
	FDI	Indice de danger de feu de Lowveld	

4.3.2. Analyse multivariée

Dans le cadre de cette étude, des analyses multivariées ont été effectuées afin d'évaluer la corrélation entre les variables environnementales et les phénomènes étudiés (occurrence des feux et surface brûlée), définir les interactions qui existent entre elles et les regrouper en fonction de leur similitude. Du fait de la distribution non normale des données des variables pyrologiques (Annexe 4), seulement des tests non paramétriques ont été utilisés pour l'analyse des données. L'ensemble de ces analyses a été effectué dans l'environnement R.

4.3.2.1. Corrélations de Spearman

La corrélation entre les variables météorologiques et les variables pyrologiques (nombre de feux et surface brûlée) a été évaluée au moyen du test de corrélation non paramétrique de Spearman (coefficient des rangs de Spearman ou rho) au niveau saisonnier et phytogéographique en utilisant les données mensuelles, dans le but de filtrer les variables les plus corrélées aux variables pyrologiques. Une matrice de corrélation a été construite au niveau saisonnier et phytogéographique en croisant les variables pyrologiques étudiées aux variables

⁵ Différence entre la température maximale et la température minimale

météorologiques contenues dans le Tableau 4-2. L'analyse a été réalisée à l'aide du package `corrplot` [280].

4.3.2.2. Modèles additifs généralisés

La relation entre les facteurs environnementaux et les variables pyrologiques a été analysée en utilisant des modèles additifs généralisés (GAM) [281]. Les GAM, version non paramétrique et non linéaire des modèles linéaires généralisés (GLM), sont utiles pour identifier les relations non linéaires et ne nécessitent pas une connaissance a priori de la forme des courbes de réponse [282,283]. Ces courbes sont déterminées par les données elles-mêmes [282,283]. Un modèle GAM est construit par la somme des fonctions lissées des variables prédictives. Ces fonctions permettent d'identifier les types d'effets et les relations non linéaires entre les variables. À cette fin, il est courant d'utiliser des fonctions polynomiales définies par intervalles ou morceaux appelés *splines* [283,284]. En général, la structure d'un GAM selon Wood [283] pourrait être estimée par l'équation 34 :

$$g(\mu_i) = A_i\theta + f_1(x_{1i}) + f_2(x_{2i}) + f_3(x_{3i}, x_{4i}) + \dots \quad (\text{Equation 34})$$

où :

- $\mu_i \equiv E(Y_i)$ et $Y_i \sim \text{EF}(\mu_i, \phi)$;
- Y_i est une variable de réponse ;
- $\text{EF}(\mu_i, \phi)$ désigne une distribution familiale exponentielle avec un paramètre μ_i et une moyenne d'échelle ϕ ;
- A_i est une ligne de la matrice du modèle pour toute composante strictement paramétrique ;
- θ est le vecteur des paramètres associé ;
- f_j sont des fonctions de lissage des covariables, x_k .

L'approche par étapes a été utilisée pour déterminer le modèle avec l'ensemble optimal de covariables sur la base du plus faible critère d'information d'Akaike (AIC) et du plus faible coefficient de validation croisée généralisée (GCV – *Generalized Cross Validation*). Les erreurs de processus et d'observation sont supposées gaussiennes. La signification des termes *splines* a été évaluée et ajustée avec des interactions linéaires lorsque la non-signification est détectée. Les courbes des formes fonctionnelles pour les covariables sélectionnées ont été tracées. Lorsque les pentes des formes fonctionnelles sont positives, les covariables sont positivement liées aux variables dépendantes. Inversement, lorsque les pentes des formes

fonctionnelles sont négatives, les covariables sont négativement liées aux variables dépendantes.

Pour l'évaluation de la précision, la validation croisée répétée 10 fois a été utilisée [285]. Dans le cadre de cette évaluation, chaque modèle a été réévalué 10 fois en utilisant 90 % des données et les prévisions dérivées des modèles ajustés ont été comparées aux observations des 10 % restants. Le coefficient de détermination (R^2) et l'erreur quadratique moyenne ont été calculés pour quantifier la qualité de l'ajustement des modèles. Le choix du modèle a été fait en sélectionnant celui présentant le plus faible AIC [286], le coefficient R^2 ajusté le plus élevé et la plus forte déviance expliquée. La régression GAM a été réalisée à l'aide du package `mgcv` [282], et la validation croisée en utilisant le package `gamclass` [287].

4.3.2.3. Test de Kruskal-Wallis

Le test non paramétrique de Kruskal-Wallis permet de déterminer si les données d'une variable sont significativement différentes d'une autre. Il a été appliqué pour comparer les moyennes des variables pyrologiques étudiées (selon l'écorégion et les variabilités temporelles), des paramètres climatiques (selon l'écorégion et les variabilités temporelles) et des paramètres biophysiques (selon les modalités). Les moyennes ont été différenciées au seuil de 5 %, en utilisant le test de Wilcoxon-Mann-Whitney (ou test U de Mann-Whitney). Les analyses ont été effectuées à l'aide du package `stats` [270].

4.3.2.4. Classification Hiérarchique

Une classification hiérarchique (HCPC - *Hierarchical Clustering on Principal Components*) a été utilisée pour identifier les différents groupes d'objets similaires au sein des données pyrologiques. Cette méthode permet de combiner les trois méthodes standards utilisées dans les analyses de données multivariées (les composantes principales, la classification ascendante hiérarchique et le partitionnement en k-moyennes). Les graphiques issus de la classification hiérarchique mettent en évidence des regroupements possibles au niveau mensuel et annuel. Cette analyse a été effectuée à l'aide des packages `FactoMineR` [288] et `factoextra` [289] du logiciel R [270].

4.3.3. Corrélation croisée des variables environnementales et pyrologiques

L'évaluation de l'impact des variables climatiques et biologiques sur les variables pyrologiques a nécessité l'utilisation des corrélations croisées de ces séries temporelles [290–292]. La corrélation croisée des séries chronologiques exige que les séries temporelles soient stationnaires et préblanchies [291]. Elle est utile pour explorer les relations entre un certain

nombre de séries temporelles et identifier les retards d'une série temporelle (X_t) qui pourraient être des prédicteurs utiles d'une autre série temporelle (y_t) [290]. Ces séries chronologiques ont été comparées à l'aide des fonctions de corrélation croisée (CCF) et de régressions décalées [220,291]. Le modèle de régression est donné par l'équation 35 :

$$y_t = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} \beta_j X_{t-j} + Z_t \quad (\text{Equation 35})$$

Où :

- Z_t suit un modèle ARIMA(p, d, q),
- X et y sont dépendants ;
- X et Z sont indépendants ;
- β représente les coefficients du processus.

L'échantillon CCF entre les deux séries temporelles (y_t et X_t) est défini comme l'ensemble des corrélations d'échantillons entre X_{t+h} et y_t pour $h = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$, etc. Les valeurs négatives de h indiquent les corrélations entre la variable y et les valeurs passées de la variable X , tandis que les valeurs positives de h indiquent une corrélation entre y et les valeurs futures de X . Par exemple, si $h = -2$, la valeur CCF donnerait la corrélation entre X_{t-2} et y_t .

Les tests de racine unitaire et de stationnarité ont été réalisés respectivement à l'aide des tests ADF et KPSS. L'analyse a été effectuée à l'aide des packages forecast [277,279] et CADFtest [293] du logiciel R.

4.4. PERCEPTIONS DES COMMUNAUTÉS LOCALES

4.4.1. Collecte et analyse de données quantitatives

4.4.1.1. Techniques d'échantillonnage et taille de l'échantillon

La technique d'échantillonnage adopté dans cette étude pour évaluer les perceptions de la variabilité pyroclimatique est la technique d'échantillonnage multi-strate. La stratification a été faite en fonction de la situation phytogéographique et des circonscriptions administratives (sous-préfectures et localités).

A cet effet, trois zones de collectes de données ont été identifiées pour la première strate. La deuxième strate est composée des sous-préfectures tandis que la troisième strate est constituée des localités identifiées comme des districts de recensement⁶. La première zone concerne la zone savanicole où la localité d'Arikokaha a été aléatoirement tirée. La deuxième zone est

⁶ Un district de recensement est une unité d'aire géographique définie essentiellement pour les besoins d'un recensement ou d'une enquête regroupant en moyenne 1 200 habitants [233].

relative à la zone préforestière dans laquelle la localité d'Abigui dans la sous-préfecture de Dimbokro a été sélectionnée. La troisième zone est la zone forestière où la localité de Pacobo a été sélectionnée. Les ménages des agriculteurs constituent l'unité statistique de notre étude. La taille de l'échantillon a été calculée en utilisant l'équation 36 :

$$n = t^2 \times p \times \frac{(1 - p)}{m^2} \quad (\text{Equation 36})$$

avec :

- n : taille d'échantillon minimale ;
- t : niveau de confiance ;
- p : proportion estimée de la population ;
- m : marge d'erreur.

Dans le cadre de cette enquête, 259 ménages agricoles ont été enquêtés au sein du BVN. Cet effectif a été obtenu en se fixant un niveau de confiance de 95 %, une marge d'erreur de 6,1 % et une proportion 50 %.

4.4.1.2. Procédure de sélection des ménages

La procédure de tirage des ménages à enquêter utilisé est la technique de tirage à pas de sondage constant. Cette technique fait partie des techniques probabilistes. Elle consiste premièrement à déterminer le nombre total de ménages dénombrés en distinguant les ménages agricoles des ménages non agricoles. Ensuite, en se basant sur le nombre de ménages à enquêter par localité, on procède au calcul du pas de sondage défini par l'équation 37 :

$$\text{Pas de sondage} = \frac{\text{Nombre total de ménages dans la localité}}{\text{Nombre de ménages à enquêter par localité}} \quad (\text{Equation 37})$$

Le pas de sondage obtenu devient le premier ménage à enquêter dans le district agricole. Le récapitulatif de localités enquêtées se trouve dans le Tableau 4-3.

Tableau 4-3 : Récapitulatif des localités enquêtées

Zone phytogéographique	Localité	Population RGPH 2014	Nombre de ménages RGPH 2014	Pas de sondage	Nombre de ménages enquêtés
Zone savanicole	Arikokaha	1 233	198	5	88
Zone préforestière	Abigui	2 149	297	8	85
Zone forestière	Pacobo	1 710	243	6	86

Source : INS [233], Enquête terrain

4.4.1.3. Réalisation de la collecte de données

L'enquête auprès des ménages agricoles a été implémentée en deux étapes composées d'une phase de prétest et la collecte de données proprement dites. La phase de prétest du questionnaire dans la zone d'étude a permis d'identifier des questions difficilement compréhensibles par les enquêtés et faire en sorte que les questions et les méthodes soient adaptées aux conditions locales. Le questionnaire, principalement composé de questions fermées et semi-fermées, a été révisé en fonction des commentaires de l'enquête pilote. L'enquête a été réalisée de février à mars 2017. Les données ont été collectées à l'aide d'une tablette Android équipée de l'application ODK Collect pour faciliter la collecte et améliorer la qualité des données.

4.4.1.4. Analyse des données

Les statistiques descriptives de base, telles que la moyenne, la fréquence et le pourcentage, ont été utilisées pour fournir des indications concernant la perception des agriculteurs sur la variabilité climatique et les feux de brousse. Le test du chi carré a été utilisé pour tester la signification statistique des différences entre les réponses des trois sites étudiés. L'analyse a été réalisée à l'aide du package questionr [294] du logiciel R.

4.4.2. Collecte et analyse de données qualitatives

4.4.2.1. Sélection des participants

Un échantillonnage raisonné sur la base de la saturation théorique a été adopté pour les discussions des groupes dans cette étude [295]. Cette technique permet de recueillir des informations à partir des types spécifiques de personnes. Pour mettre en œuvre cette technique, les consultations publiques avec les chefs des différents groupes ethniques, les présidents des jeunes, des femmes et agents de développement rural, ont été menées pour l'établissement d'une liste de personnes aptes à participer au focus group. Les critères retenus comprennent :

- l'âge (avoir plus de 18 ans) ;
- la durée de vie dans la communauté (avoir vécu continuellement entre 15-20 ans dans la communauté) ;
- les connaissances agricoles (avoir une bonne connaissance des pratiques agricoles) ;
- les connaissances sur le changement climatique (avoir une bonne connaissance des stratégies locales et améliorées de lutte contre le changement climatique) ;
- la disponibilité (être disponible le jour et l'heure d'organisation du groupe de discussion).

4.4.2.2. Réalisation de focus group

Les focus groups ont été réalisés afin d'obtenir une meilleure compréhension des perceptions communautaires sur les impacts du changement climatique et des feux de brousse, ainsi que les stratégies d'adaptation, et la collecte d'autres informations utiles. Les discussions lors des focus groups ont été enregistrées à l'aide des tablettes. Dans chaque localité, les participants des focus groups ont été composés de six participants, dont trois hommes et trois femmes.

4.4.2.3. Analyse des données

Après la collecte des informations audio au focus group, ces informations ont été transcrites et codifiées. L'analyse a consisté à mettre en évidence les tendances et les concepts développés pour présenter les situations particulières et de mettre en exergue les significations des signes et des symboles.

TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE 5 : RESULTATS

5.1. VARIABILITE ET TENDANCES CLIMATIQUES

Cette section présente la variation des paramètres climatiques dans le bassin versant étudié de 1973 à 2016. Les données climatiques ont été comparées à la normale 1980-1990 et les tests de Mann-Kendall et Pettitt ont été utilisés pour évaluer la tendance et la rupture des séries étudiées, respectivement.

5.1.1. Variabilité climatique

5.1.1.1. Variabilité thermométrique

5.1.1.1.1. Variation moyenne mensuelle

L'évolution des températures moyennes mensuelles est présentée par la Figure 5-1.

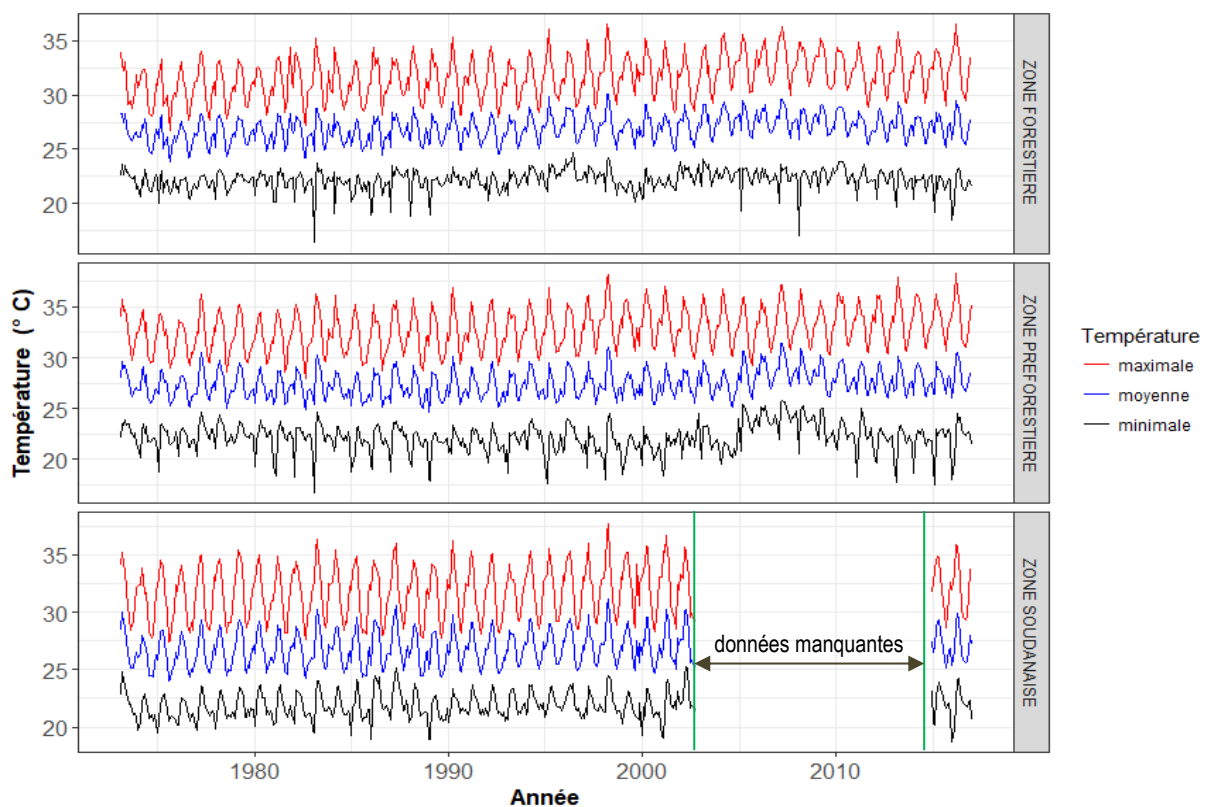


Figure 5-1 : Evolution mensuelle des températures en fonction des écorégions

La Figure 5-1 montre que les températures moyennes (courbe en bleu) oscillent de 23,8 °C à 30,1 °C dans la zone forestière. Ces températures varient de 24,6 °C à 31,4 °C dans la zone préforestière, tandis que dans la zone soudanaise, elles fluctuent de 24 °C à 31,1 °C. Les observations au niveau des extrêmes thermiques montrent que :

- les maxima (en rouge) ont varié de 26,8 °C à 36,5 °C dans la zone forestière, de 28 °C à 38,2 °C dans la zone préforestière et de 27,4 °C à 38,7 °C dans la zone soudanaise ;

- les minima (en noir) sont passés de 16,4 °C à 24,7 °C dans la zone forestière, de 16,8 °C à 25,7 °C dans la zone préforestière et de 18,7 °C à 25,2 °C dans la zone soudanaise.

L'année 1998 a été l'année la plus chaude au sein de toutes les zones phytogéographiques avec des températures moyennes supérieures à 30 °C pendant la saison sèche.

Le mois le plus chaud demeure février dans la zone forestière, tandis que mars a enregistré les plus fortes températures dans les zones préforestière et soudanaise. Inversement, les températures moyennes les plus faibles ont été enregistrées dans le mois d'août dans toutes les zones phytogéographiques.

Au niveau de la zone soudanaise, aucune donnée n'est disponible de 2002 à 2014.

5.1.1.1.2. Anomalie thermométrique

La magnitude des anomalies thermométriques des températures moyennes par rapport à la normale 1980-1990 est présentée par la Figure 5-2.

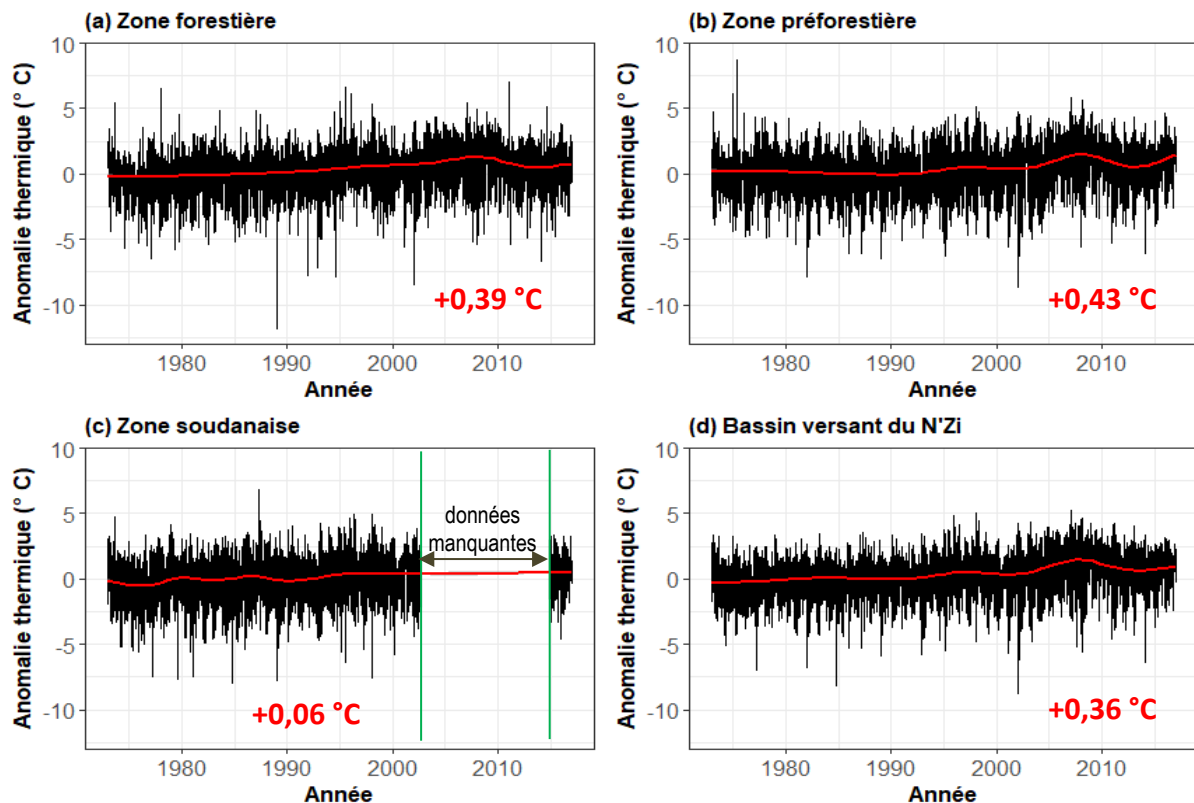


Figure 5-2 : Anomalie thermométrique journalière dans (a) la zone forestière, (b) la zone préforestière, (c) la zone soudanaise et (d) l'ensemble du BVN

D'une manière générale, la température moyenne journalière est demeurée supérieure à la normale de 1980-1990. Les anomalies des températures moyennes montrent une tendance significative à la hausse. La magnitude des anomalies des températures moyennes journalières varie de -11,8 °C à +7 °C dans la zone forestière, de -8,7 °C à +8,7 °C dans la zone préforestière et de -7,9 °C à 6,8 °C dans la zone soudanaise. Pour la période 1973-2016,

l'anomalie thermométrique moyenne est évaluée à $+0,39\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+0,43\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $0,06\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour les zones forestière, préforestière et soudanaise, respectivement. L'anomalie moyenne sur l'ensemble du BVN est estimée $+0,36\text{ }^{\circ}\text{C}$ et indique que la température moyenne a augmenté dans la zone d'étude.

5.1.1.2. Variabilité pluviométrique et l'évapotranspiration de référence

5.1.1.2.1. Variation moyenne mensuelle

L'évapotranspiration représente la quantité d'eau transférée vers l'atmosphère, par l'évaporation au niveau du sol et au niveau de l'interception des précipitations, et par la transpiration des plantes. La variation mensuelle des précipitations et de l'évapotranspiration au sein des différentes écorégions est présentée par la Figure 5-3.

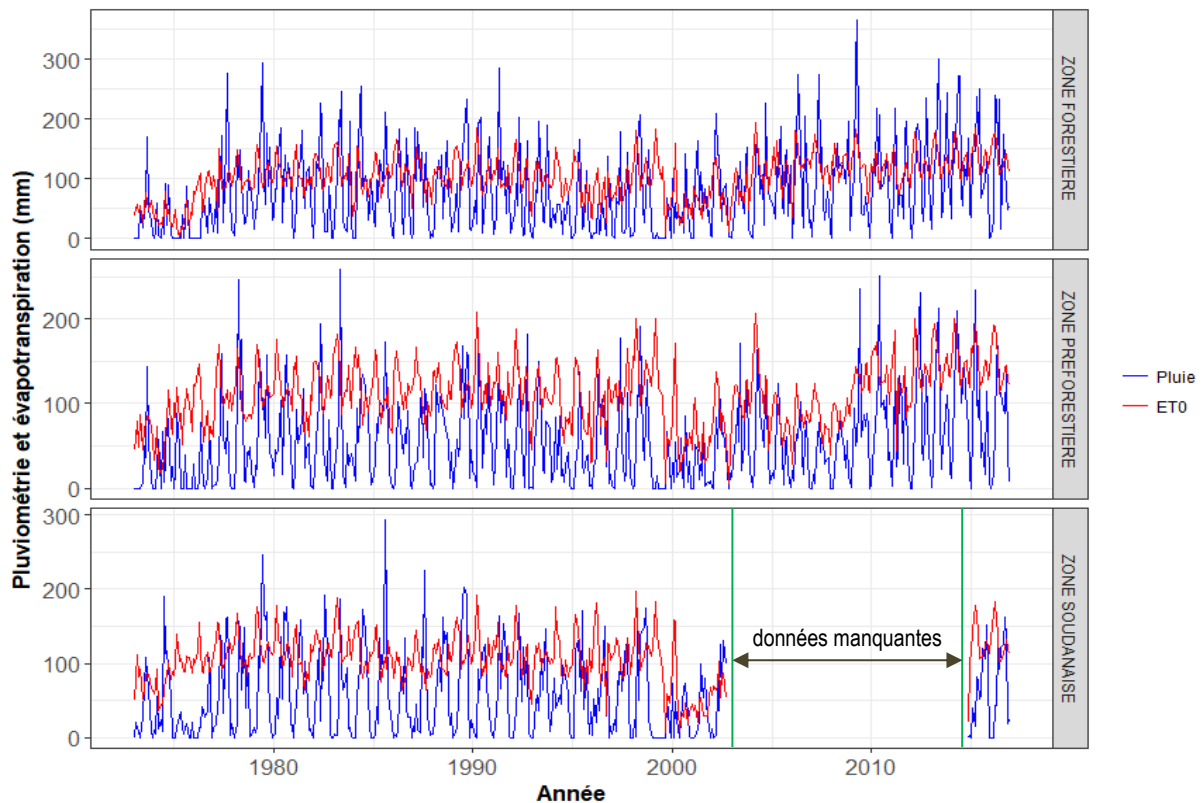


Figure 5-3 : Evolution mensuelle des précipitations et de l'évapotranspiration de référence en fonction des écorégions

Les hauteurs pluviométriques mensuelles oscillent de 0 mm à 364,8 mm/mois dans la zone forestière, de 0 mm à 257,9 mm/mois dans la zone préforestière et de 0 à 293,5 mm/mois dans la zone soudanaise.

L'ET0, quant à elle, varie de 4 mm/mois à 195 mm/mois dans la zone forestière, de 5,2 mm/mois à 207,9 mm/mois dans la zone préforestière et de 6,2 mm/mois à 196,5 mm/mois dans la zone soudanaise. Les pics pluviométriques les plus élevés correspondent à la saison pluvieuse

et les plus bas à la grande saison sèche. Inversement, les pics de l'ET0 sont identifiables en période de grande sécheresse et les plus faibles en période pluvieuse.

Le diagramme ombrothermique des différentes stations est présenté en Annexe 3. Le mois le plus pluvieux dans les zones forestière, préforestière et soudanaise est respectivement mai, juin et août. Dans le BVN, le comportement pluvieux évolue d'un régime bimodal dans les zones forestière et préforestière à un régime unimodal dans la zone soudanaise (Annexe 3).

Les précipitations moyennes annuelles sont de 953 mm/an, 659,2 mm/an et 664,1 mm/an dans les zones forestière, préforestière et soudanaise, respectivement.

5.1.1.2.2. Anomalie pluviométrique

L'évolution de l'anomalie pluviométrique mensuelle est présentée par la Figure 5-4.

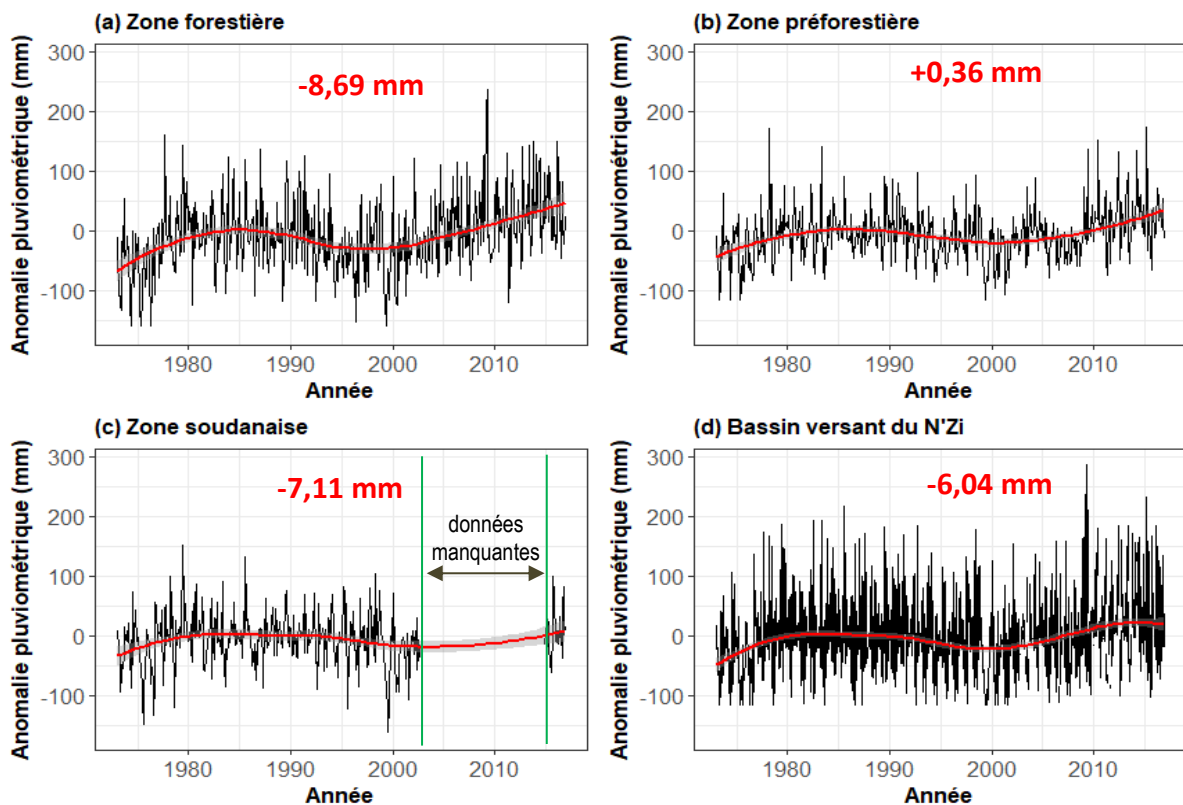


Figure 5-4 : Anomalie pluviométrique mensuelle dans (a) la zone forestière, (b) la zone préforestière, (c) la zone soudanaise et (d) l'ensemble du BVN

Les anomalies pluviométriques sont restées inférieures à la normale (1980-1990) et ont toutes une allure croissante. Elles ont oscillé de -159,4 à +235,2 mm dans la zone forestière, tandis que la zone préforestière a enregistré des anomalies variant de -116,8 à +173,9 mm. Par contre, la zone soudanaise a connu des anomalies pluviométriques variant de -162,1 à 150,9 mm. Ces observations ont donné une moyenne mensuelle de -8,68, +0,36 et -7,11 mm respectivement dans les zones forestière, préforestière et soudanaise. Les moyennes au niveau du BVN donnent une variation de -116,7 mm à +285,1 mm de pluies pour une moyenne de -6,04 mm.

La Figure 5-5 présente l'évolution de l'anomalie interannuelle des pluies dans le bassin versant étudié sur la période 1973-2016.

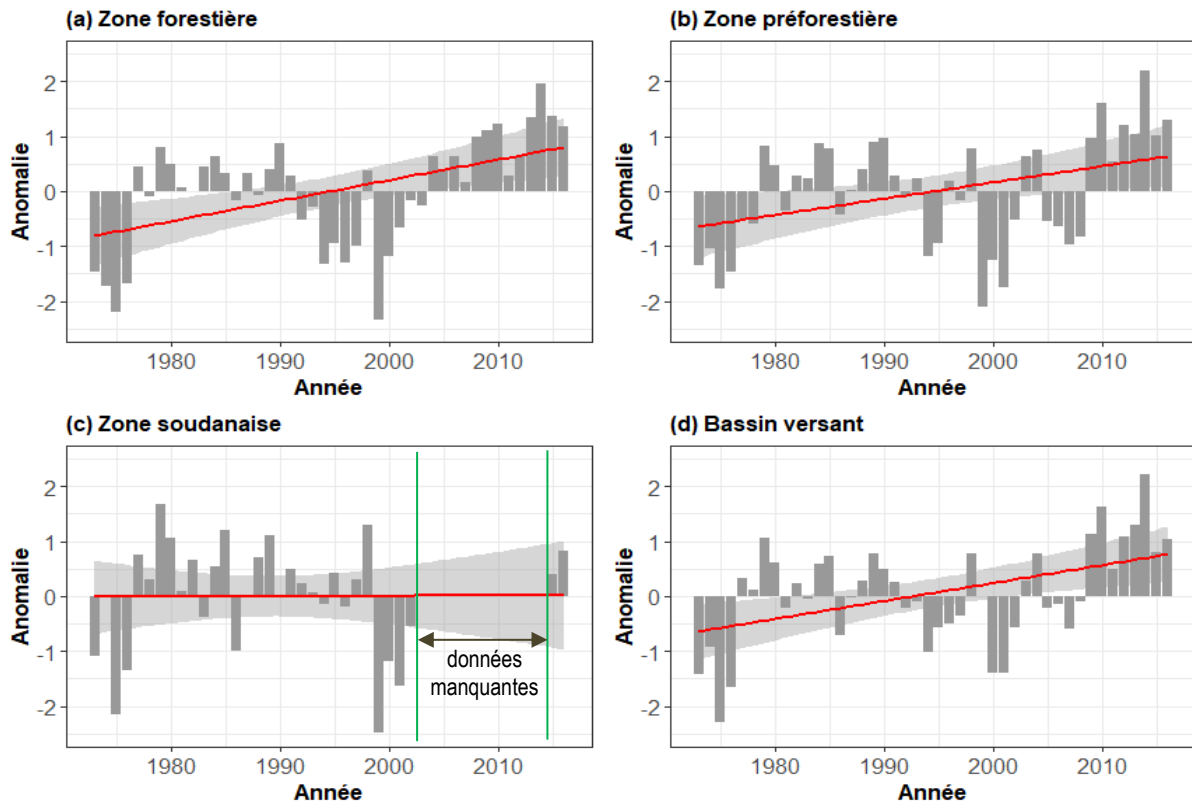


Figure 5-5 : Anomalie pluviométrique annuelle dans (a) la zone forestière, (b) la zone préforestière, (c) la zone soudanaise et (d) l'ensemble du BVN

Le BVN a connu une évolution variable de l'anomalie des pluies annuelles (Figure 5-5). Dans la zone forestière, une baisse importante de la pluviométrie annuelle a été identifiée durant la période 1973-1976, suivi d'une légère amélioration pluviométrique de 1977 à 1991. De 1992 à 2003, une péjoration importante des conditions pluviométriques a été enregistrée suivie d'une reprise importante des pluies à partir de 2004.

Au niveau de la zone préforestière, les pluies ont connu une baisse sévère de 1973 à 1978, suivi d'une amélioration irrégulière de 1979 à 1994. Durant la période 1995-2008, une sévère baisse des pluies a été identifiée suivie d'une reprise significative à partir de 2009.

Concernant la zone soudanaise, la période 1973-1975 a été marquée par une diminution importante des pluies suivie d'une augmentation irrégulière de 1976 à 1998. L'année 1999 marque une diminution régulière des pluies.

Ainsi, dans l'ensemble du BVN, on note deux périodes sèches (1973-1976 et 1992-2008) et deux périodes humides (1977-1991 et 2009-2016).

Les courbes de tendance des anomalies pluviométriques (en rouge) montrent que les zones forestière, préforestière et l'ensemble du BVN suivent une tendance haussière, alors que la zone soudanaise ne présente aucune tendance.

5.1.1.3. Variabilité hygrométrique

L'humidité relative, évaluée en pourcentage, représente le rapport de la quantité d'eau effectivement contenue dans l'air et la capacité d'absorption à une température donnée.

L'évolution de l'anomalie de l'humidité relative dans le BVN est présentée par la Figure 5-6.

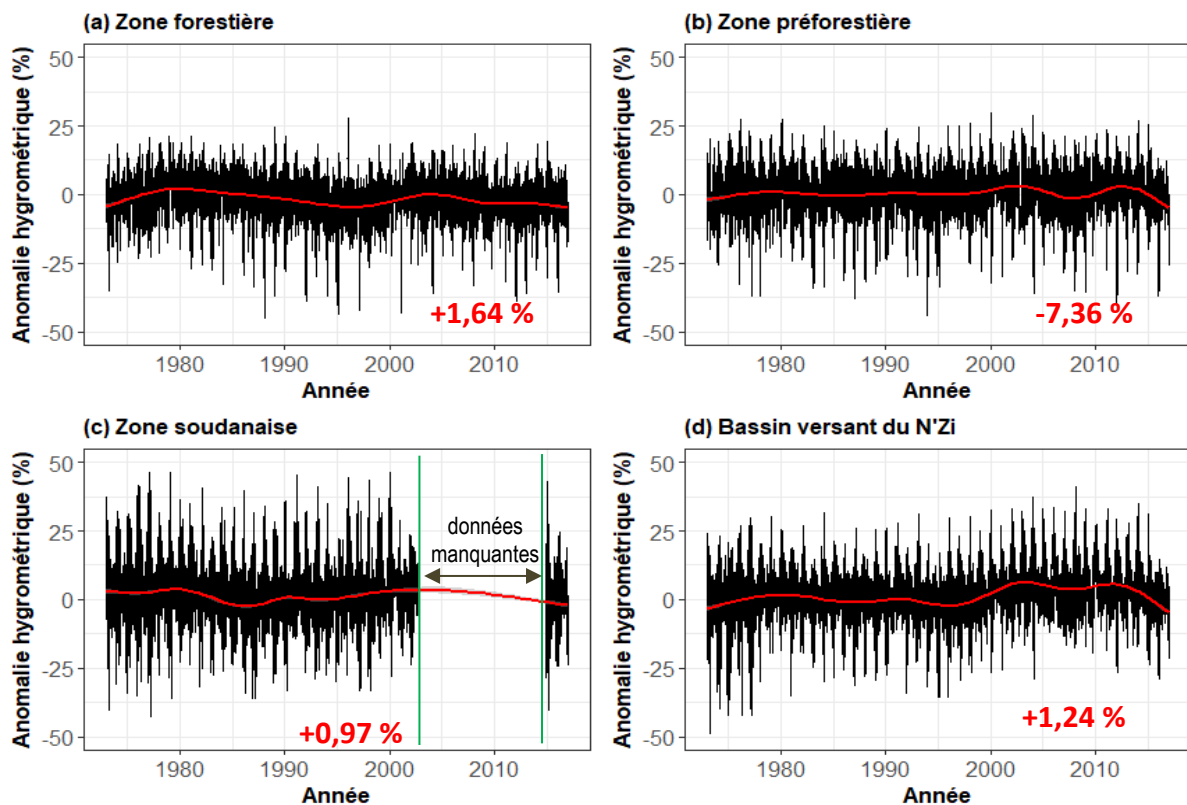


Figure 5-6 : Anomalie hygrométrique journalière dans (a) la zone forestière, (b) la zone préforestière, (c) la zone soudanaise et (d) l'ensemble du BVN

La Figure 5-6 montre que les anomalies hygrométriques ont varié de -44,9 % à +28 % dans la zone forestière, de -44,1 % à +29,9 % dans la zone préforestière et de -42,5 % à +46,5 % dans la zone soudanaise. Les anomalies moyennes journalières s'évaluent à +1,64 %, -7,36 % et +0,97 % respectivement dans les zones forestière, préforestière et soudanaise. La moyenne sur l'ensemble du BVN est estimée à +1,24 %.

De 1973 à 2016, l'humidité relative moyenne mensuelle a varié entre 56,5 % (janvier) à 83,5 % (août) dans l'ensemble du BVN. Les variations saisonnières de l'hygrométrie sont analogues à celles de la pluviométrie dont les maxima (70 à 95 %) correspondent aux saisons pluvieuses et

les minima (30 à 40 %) à la saison sèche. Ces variations hygrométriques dans le temps, en durée et en longueur, constituent un indicateur de l'évolution du climat.

5.1.2. Tendances des séries climatiques

Les résultats du test de Mann-Kendall appliqués aux séries climatiques essentielles de la période 1973-2016 sont consignés dans le Tableau 5-1.

Tableau 5-1 : Tendances des séries climatiques en fonction des écorégions

Variable climatique	Zone forestière		Zone préforestière		Zone soudanaise		Ensemble du bassin	
	Pente de Sen	Test Z	Pente de Sen	Test Z	Pente de Sen	Test Z	Pente de Sen	Test Z
PRCP	$8,40 \times 10^{-2}$	5,129 ***	$4,22 \times 10^{-2}$	3,931 ***	0	2,475 *	$5,68 \times 10^{-2}$	4,289 ***
MAX	$4,36 \times 10^{-3}$	7,631 ***	$3,85 \times 10^{-3}$	6,353 ***	0	0,943 ^{ns}	$4,14 \times 10^{-3}$	6,778 ***
MIN	$8,11 \times 10^{-4}$	3,417 ***	$3,89 \times 10^{-4}$	1,088 ^{ns}	$5,49 \times 10^{-4}$	4,283 ***	$1,39 \times 10^{-3}$	4,499 ***
TMOY	$2,56 \times 10^{-3}$	7,115 **	$2,26 \times 10^{-3}$	5,738 ***	$1,86 \times 10^{-4}$	3,185 **	$2,80 \times 10^{-3}$	7,095 ***
RH	$-6,69 \times 10^{-3}$	-4,547 ***	$1,23 \times 10^{-3}$	0,728 ^{ns}	0	-2,429 *	$4,32 \times 10^{-3}$	2,112 *
ET0	$8,35 \times 10^{-2}$	8,092 ***	$5,45 \times 10^{-2}$	4,921 ***	0	0,96 ^{ns}	$5,28 \times 10^{-2}$	5,647 ***
WDSP	$5,51 \times 10^{-5}$	1,172 ^{ns}	$9,74 \times 10^{-4}$	14,904 ***	$1,12 \times 10^{-4}$	4,607 ***	$-1,98 \times 10^{-4}$	-2,332 *
MXSPD	0	-0,337 ^{ns}	$3,34 \times 10^{-3}$	17,144 ***	$9,32 \times 10^{-5}$	4,171 ***	$2,64 \times 10^{-5}$	0,14 ^{ns}

*ns = non significatif ; * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$*

PRCP : Précipitations, MAX : Température maximale, MIN : Température minimale, TMOY : Température moyenne, RH : Humidité relative moyenne, ET0 : Evapotranspiration potentielle, WDSP : Vitesse moyenne du vent, MXSPD : Vitesse maximale du vent

Le test de Mann-Kendall (Tableau 5-1) met en évidence une tendance croissante significative au seuil de 5 % (test $Z > 0$) au sein des données de températures minimales (MIN), maximales (MAX) et moyennes (TMOY) dans l'ensemble des écorégions, à l'exception des températures minimale et maximale des zones forestière et soudanaise où des tendances haussières non significatives ont été identifiées. Quant à PRCP, elle présente une tendance haussière significative dans l'ensemble des écorégions du BVN.

RH présente une tendance décroissante significative dans les zones forestière et soudanaise tandis qu'une tendance haussière non significative a été détectée dans la zone préforestière. Sur l'ensemble du BVN, RH a présenté une tendance haussière significative.

WDSP et MXSPD montrent une tendance croissante significative dans toutes les écorégions, à l'exception de la zone forestière qui présente une tendance haussière statistiquement non significative.

ET0 présente une tendance haussière significative sur l'ensemble du BVN excepté la zone soudanaise qui présente des valeurs non significatives statistiquement au seuil de 5 %.

5.1.3. Ruptures des séries pluviométriques et hygrométriques

La détection des ruptures de stationnarité des précipitations et de l’hygrométrie a été faite par le test de Pettitt. L’application de ce test a permis d’observer une modification dans l’évolution de l’humidité relative et des précipitations à partir de 1982 et 1998, respectivement (Tableau 5-2).

Tableau 5-2 : Ruptures des séries pluviométriques et hygrométriques en fonction des écorégions

Ecorégion	Précipitations			Humidité relative		
	K _T	Test U*	Significativité	K _T	Test U*	Significativité
Zone forestière	2003	333	***	1987	303	**
Zone préforestière	2008	270	*	2004	92	ns
Zone soudanaise	1998	228	ns	1982	244	*

*ns = non significatif ; * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001*

L’application du test de Pettitt (Tableau 5-2) sur les séries pluviométriques a identifié une rupture significative en 2003 et 2008 dans les zones forestière et préforestière à l’exception de la zone soudanaise où une rupture non significative a été détectée en 1998.

Concernant l’humidité relative, elle présente une rupture en 1987 et 1982 respectivement pour les zones forestière et soudanaise, tandis qu’aucune rupture n’a été détectée au sein de la zone préforestière (test statiquement non significatif à 95 %).

5.2. DYNAMIQUE RETROSPECTIVE DES FEUX DE VEGETATION

Cette section présente l’évolution des variables pyrologiques (nombre de feux et surfaces brûlées) de 2001 à 2016. Le test de Kruskal-Wallis et le test saisonnier de Kendall ont été utilisés pour différencier les données pyrologiques en fonction du temps et la zone phytogéographique et évaluer la tendance de ces données.

5.2.1. Dynamique spatio-temporelle des foyers de feux et des surfaces brûlées

5.2.1.1. Evolution mensuelle

La variation mensuelle de foyers de feux a été faite à l’aide des données de feux actifs détectés lors des différents passages des satellites au-dessus du bassin versant. Ces données possèdent un indice de confiance supérieur à 80 %. La Figure 5-7 représente la répartition mensuelle des détections de feux actifs dans l’ensemble des zones phytogéographiques qui composent le BVN.

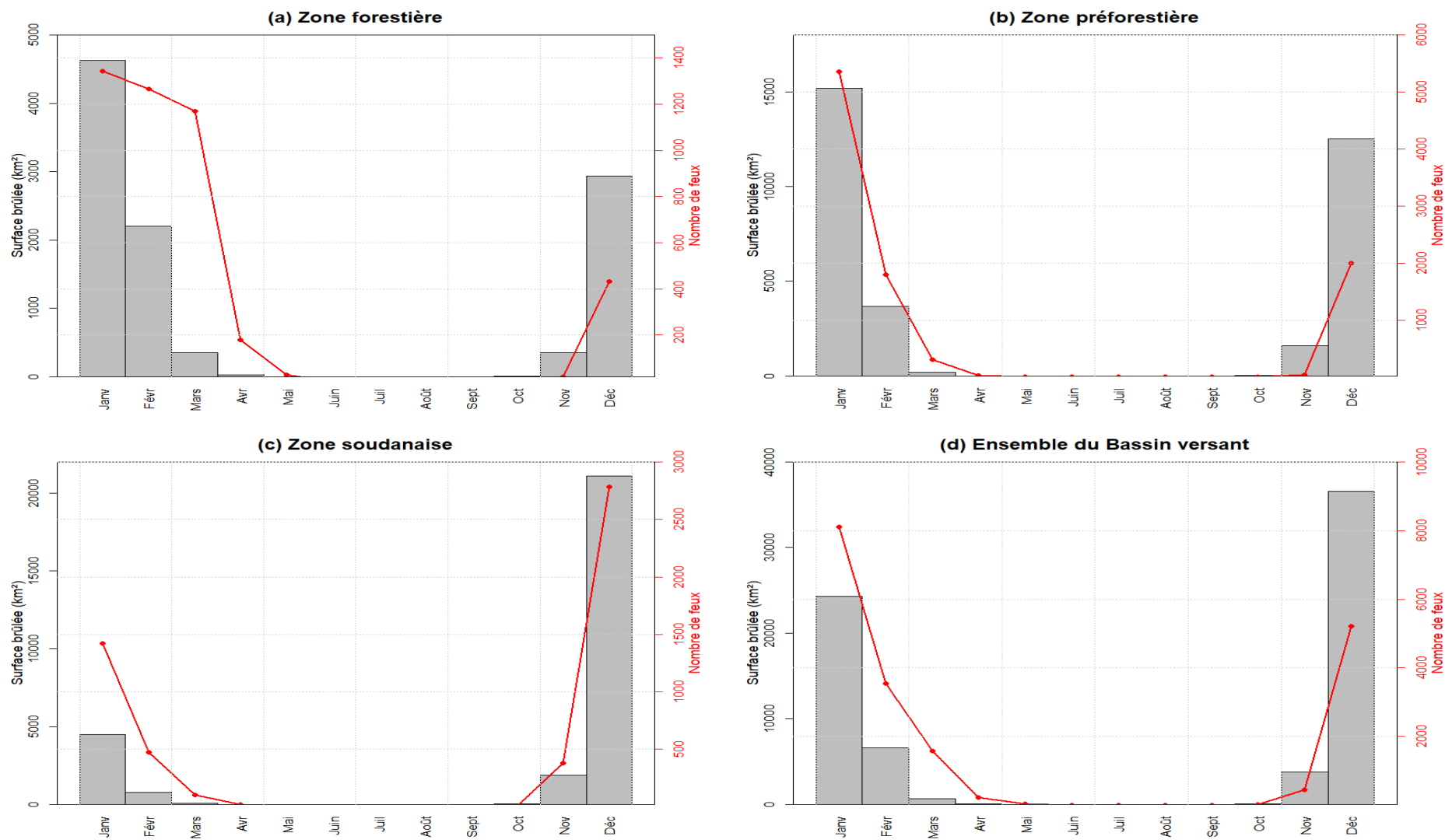


Figure 5-7 : Evolution mensuelle du nombre de feux détectés et des surfaces brûlées dans (a) la zone forestière, (b) la zone préforestière, (c) la zone soudanaise et (d) l'ensemble du BVN

Au cours des 16 dernières années, 19 156 incendies ont été détectés dans le BVN, brûlant environ 71 979,7 km² de terres végétatives. Les incendies de végétation ont montré une forte dépendance saisonnière au sein du BVN. Cette saisonnalité était quasi similaire d'une zone écologique à l'autre. Les feux de végétation étaient plus fréquents pendant la saison sèche dans toutes les écorégions et plus modérés jusqu'au début de saison pluvieuse (mars-avril). Les feux de végétation ont généralement atteint leur maximum en nombre et en surface de décembre à janvier dans le BVN. L'occurrence des feux débute en novembre pour s'estomper en avril et devenir quasi inexistante les mois suivants. Le nombre de feux s'accroît rapidement en décembre pour atteindre le pic en janvier, tandis que les tailles des zones brûlées atteignent leur pic en décembre et décroissent en janvier. Dès février, le nombre de feux et les surfaces brûlées décroissent pour décliner complètement en avril. Ainsi, la saison de feu dure 6 mois (novembre à avril) au niveau du BVN et dans la zone forestière, tandis qu'elle s'étend sur 5 mois (novembre à mars) au niveau des zones préforestière et soudanaise.

Au niveau de l'ensemble du BVN, les valeurs les plus élevées de foyers de feux et de surfaces brûlées ont été enregistrées dans la zone préforestière. Le mois de décembre était le mois critique, avec 8 116 feux détectés (42,4 %), tandis que le mois de janvier était le plus désastreux, avec 36 557,77 km² de végétation brûlée (50,8 %). De plus, le mois de janvier a enregistré 1 344 feux et 5 353 foyers de feux respectivement pour les zones forestière et préforestière, tandis que 4 627,6 km² et 15 203,4 km² de végétation brûlée ont été recensés pour ces mêmes zones.

Les résultats de l'analyse descriptive et du test de Kruskal-Wallis pour l'évolution mensuelle des séries pyrologiques sont présentés par le Tableau 5-3.

Sur l'ensemble du BVN (Tableau 5-3), on note une différence hautement significative entre les variables pyrologiques et les mois d'apparition (Test de Kruskal-Wallis, $p < 0,001$). La différenciation des moyennes des foyers de feux et des surfaces brûlées à l'aide du test de Mann-Whitney a permis de regrouper les données mensuelles en 6 groupes distincts. Le mois de janvier comptabilise à lui seul 42,37 % des points de feux, suivi par le mois de décembre avec 27,2 % des feux. Inversement, le mois décembre enregistre les plus grandes surfaces brûlées avec 50,8 % des surfaces brûlées, secondé par le mois de janvier 33,8 % des zones brûlées.

Pendant la grande saison sèche (novembre à février), 17 251 feux (90,06 %) ont été enregistrés détruisant 71 302,51 km² de végétation (99,06 %), tandis que pendant la grande saison pluvieuse a enregistré 1 833 feux (9,57 %) consommant 620,25 km² (0,86 %) de terres végétatives, principalement en mars et avril.

Tableau 5-3 : Variation du nombre de feux et des surfaces brûlées en fonction du mois

Mois	Nombre de feux			Surface brûlée (km ²)		
	Total	Proportion (%)	Moyenne ± SE	Total	Proportion (%)	Moyenne ± SE
Janvier	8116	42,37	169,08 ± 175,09 ^a	24332,21	33,8	506,92 ± 535,45 ^a
Février	3535	18,45	73,65 ± 65,92 ^b	6604,64	9,18	137,6 ± 199,4 ^b
Mars	1572	8,21	32,75 ± 38,81 ^c	617,42	0,86	12,86 ± 40,95 ^d
Avril	227	1,19	4,73 ± 7,74 ^d	27,83	0,04	0,58 ± 1,34 ^e
Mai	32	0,17	0,67 ± 1,64 ^e	0	0	0 ± 0 ^f
Juin	2	0,01	0,04 ± 0,2 ^f	0	0	0 ± 0 ^f
Juillet	0	0	0 ± 0 ^f	0	0	0 ± 0 ^f
Août	4	0,02	0,08 ± 0,35 ^f	0	0	0 ± 0 ^f
Septembre	4	0,02	0,08 ± 0,35 ^f	0	0	0 ± 0 ^f
Octobre	9	0,05	0,19 ± 0,73 ^f	31,94	0,04	0,67 ± 1,72 ^e
Novembre	439	2,29	9,15 ± 28,23 ^d	3807,89	5,29	79,33 ± 136,81 ^c
Décembre	5216	27,23	108,67 ± 108,53 ^{ab}	36557,77	50,79	761,62 ± 735,51 ^a
Test de Kruskal-Wallis	$\chi^2 = 473,63$; p-value < $2,2 \times 10^{-16}$ (***)			$\chi^2 = 494,84$; p-value < $2,2 \times 10^{-16}$ (***)		

Les valeurs avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes

La distribution spatiale des feux et des zones brûlées selon les mois sont présentées en Annexe 7 et 8, respectivement.

5.2.1.3. Evolution annuelle

L'évolution du nombre de feux et des surfaces brûlées annuels dans le BVN est présentée par la Figure 5-8. Cette figure montre que le nombre de feux et les surfaces brûlées ne suivent pas une tendance régulière, mais varient énormément d'une année à l'autre.

En 2008, le plus grand nombre de feux sont observées dans la zone préforestière, soudanaise et l'ensemble du BVN à l'exception de la zone forestière où le pic le plus élevé de foyers de feux est observé en 2016. En revanche, les valeurs les plus basses de foyers de feux ont été enregistrées en 2001 dans la zone préforestière, la zone soudanaise et l'ensemble du BVN excepté la zone forestière qui a présenté les plus faibles quantités de foyers de feux en 2009.

Au niveau des surfaces brûlées, 2016 a enregistré les plus grandes surfaces brûlées dans la zone forestière, la zone préforestière et l'ensemble du BVN à l'exception de la zone soudanaise où l'année 2005 a présenté les plus grandes zones brûlées. Par contre, les valeurs les plus basses des surfaces brûlées ont été identifiées 2014 dans la zone forestière et l'ensemble du BVN, tandis que les tailles les plus faibles de surfaces brûlées ont été observées en 2010 et 2015 respectivement pour la zone soudanaise et la zone préforestière.

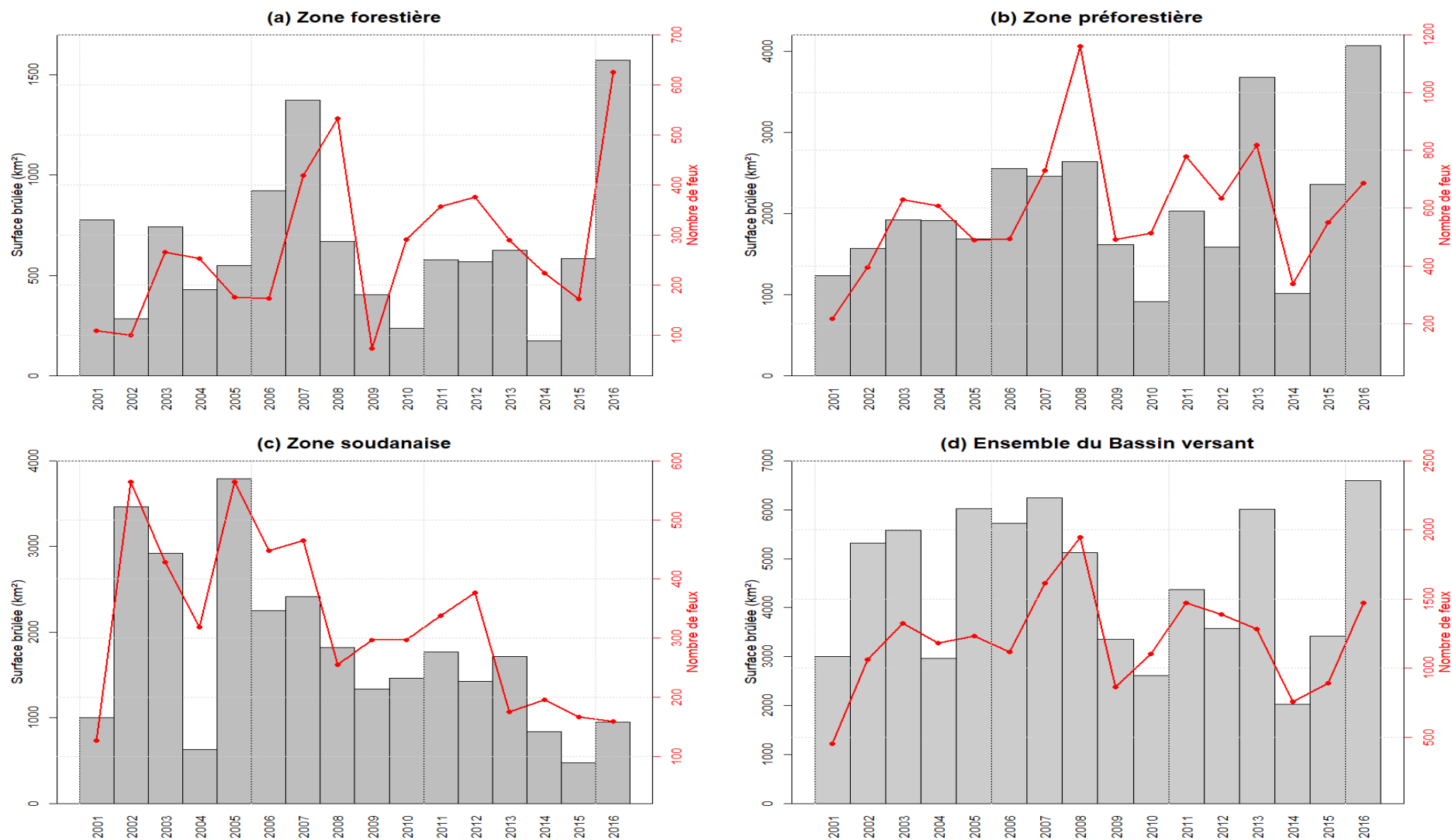


Figure 5-8 : Evolution annuelle du nombre de feux et des surfaces brûlées dans (a) la zone forestière, (b) la zone préforestière, (c) la zone soudanaise et (d) l'ensemble du BVN

Les feux actifs détectés et les surfaces brûlées ont été cartographiés afin d'établir leur distribution spatiale à l'échelle du BVN sur la période d'étude 2001-2016 (Figure 5-9).

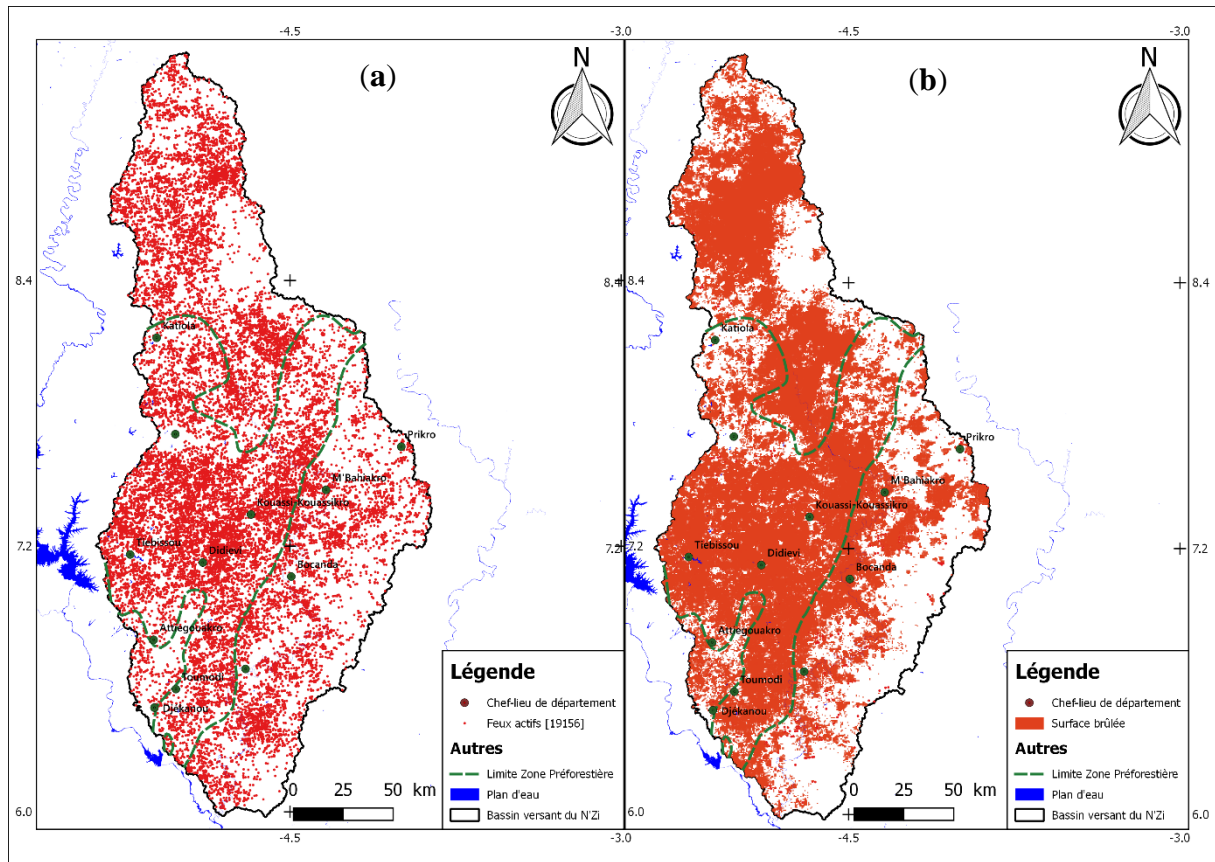


Figure 5-9 : Distribution spatiale des feux actifs (a) et des surfaces brûlées (b) dans le BVN sur la période 2001-2016

Cette carte montre que les feux de végétation se propagent dans la quasi-totalité du BVN. Cette propagation n'est pas homogène sur l'ensemble de la zone étudiée. La majorité des feux de végétation et des surfaces brûlées sur la période d'étude sont localisés dans la zone préforestière au centre et la zone soudanaise au nord du BVN. L'épicentre des feux de végétation et des surfaces brûlées demeure la zone préforestière où la quasi-totalité de la surface a été parcourue par un feu au moins une fois sur les 16 ans. La partie méridionale de la zone forestière a enregistré très peu de feux et de surfaces brûlées.

Les résultats de l'analyse descriptive et du test de Kruskal-Wallis pour l'évolution annuelle des séries pyrologiques sont présentés le Tableau 5-4.

Tableau 5-4 : Evolution du nombre de feux et des surfaces brûlées en fonction des années

Année	Nombre de feux			Surface brûlée (km ²)		
	Total	Proportion (%)	Moyenne ± SE	Total	Proportion (%)	Moyenne ± SE
2001	453	2,36	12,58 ± 28,1	3007,15	4,18	83,53 ± 214,75
2002	1060	5,53	29,44 ± 95,97	5315,74	7,39	147,66 ± 461,32
2003	1325	6,92	36,81 ± 93,74	5580,55	7,75	155,02 ± 520,99
2004	1179	6,15	32,75 ± 69,59	2969,64	4,13	82,49 ± 202,59
2005	1232	6,43	34,22 ± 74,3	6027,44	8,37	167,43 ± 404,04
2006	1115	5,82	30,97 ± 71,25	5723,73	7,95	158,99 ± 416,57
2007	1615	8,43	44,86 ± 88,95	6248,22	8,68	173,56 ± 454,55
2008	1949	10,17	54,14 ± 163,44	5131,55	7,13	142,54 ± 411,98
2009	862	4,5	23,94 ± 69,38	3357,69	4,66	93,27 ± 263,39
2010	1102	5,75	30,61 ± 62,98	2615,33	3,63	72,65 ± 225,39
2011	1473	7,69	40,92 ± 79,22	4371,27	6,07	121,42 ± 281,81
2012	1388	7,25	38,56 ± 86,89	3579,25	4,97	99,42 ± 274,38
2013	1284	6,7	35,67 ± 85,09	6016,67	8,36	167,13 ± 463,28
2014	758	3,96	21,06 ± 35,82	2024,03	2,81	56,22 ± 152,94
2015	890	4,65	24,72 ± 55,43	3417,54	4,75	94,93 ± 245,31
2016	1471	7,68	40,86 ± 87,52	6593,9	9,16	183,16 ± 483,62
Test de Kruskal-Wallis	$\chi^2 = 4,0201$; p-value = 0,9977 (ns)			$\chi^2 = 5,12977$; p-value = 0,9909695 (ns)		

Les valeurs avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes, ns= non significatif

Ces résultats montrent que les foyers de feux détectés et les surfaces brûlées observés ne diffèrent pas en fonction de l'année (test de Kruskal-Wallis $p > 0,05$).

Les totaux annuels des feux actifs indiquent que 2007, 2008, 2011 et 2016 ont connu une activité intense des feux à l'échelle du BVN. Les surfaces parcourues par les feux étaient larges de 2005 à 2008 sur l'ensemble du BVN, suivi d'une baisse en 2009-2010 et une reprise en 2013. L'année 2016 a été exceptionnellement désastreuse tant en quantité de foyers de feux qu'en surfaces consumées par le feu.

Les annexes 9 et 10 présentent la localisation des feux actifs et des zones brûlées par année.

5.2.1.3. Evolution en fonction des écorégions

L'influence de l'écorégion sur l'activité des feux a été mise en exergue par le test de Kruskal-Wallis (Tableau 5-5).

Tableau 5-5 : Evolution des feux en fonction des écorégions

Ecorégion	Nombre de feux			Surface brûlée (km ²)		
	Total	Proportion (%)	Moyenne ± SE	Total	Proportion (%)	Moyenne ± SE
Zone forestière	4443	23,19	23,14 ± 45,51	10488,412	14,57	54,63 ± 133,26
Zone préforestière	9536	49,78	49,67 ± 117,9	33211,962	46,14	172,98 ± 407,17
Zone soudanaise	5177	27,03	26,96 ± 64,69	28279,328	39,29	147,29 ± 443,6
Ensemble du BVN	19156	100	33,26 ± 82,66	71979,701	100	124,96 ± 359,06
Test de Kruskal-Wallis	$\chi^2 = 1,3461$, p-value = 0,5101 (ns)			$\chi^2 = 0,94734$; p-value = 0,6227 (ns)		

Les valeurs avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes, ns= non significatif

Le Tableau 5-5 montre qu'à l'échelle des écorégions, la fréquence des incendies a été évaluée à 4 443 feux, 9 536 feux et 5 177 feux dans les zones forestière, préforestière et soudanaise, respectivement. Les dommages associés à ces incendies ont été estimés à 10 488,41 km², 33 211,96 km² et 28 279,33 km² pour les zones forestière, préforestière et soudanaise, respectivement.

Les résultats du test de Kruskal-Wallis montrent qu'il n'existe pas de différence significative entre le nombre de feux détectés et les surfaces brûlées en fonction des écorégions du BVN à 95 %. En effet, la p-value du test de ce test est supérieure à 0,05 pour le nombre de feux ($\chi^2 = 1,3461$) et les surfaces brûlées ($\chi^2 = 0,94734$).

5.2.2. Répartition spatiale des feux de végétation

5.2.2.1. Fréquence des feux

L'occurrence des feux au niveau du BVN a permis de calculer la fréquence des feux au sein des sous-préfectures de la zone d'étude (Figure 5-10).

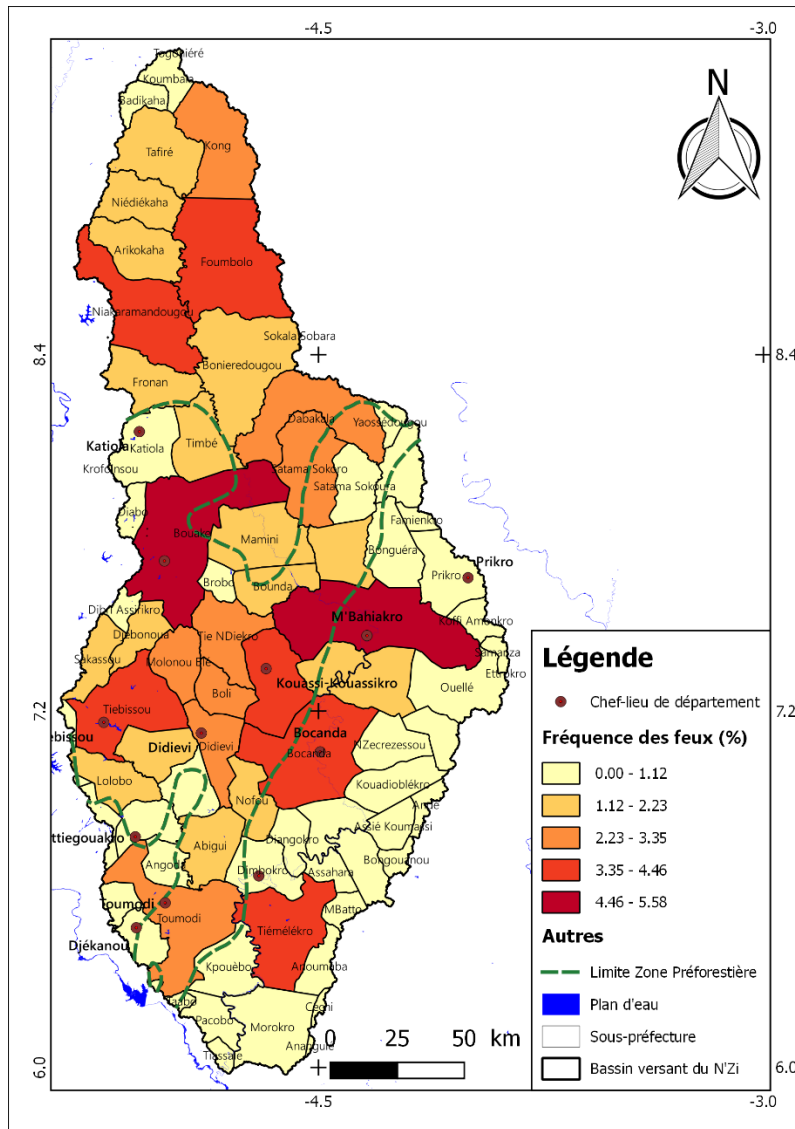


Figure 5-10 : Fréquence des feux par sous-préfecture

Cette carte montre que les sous-préfectures de M’Bahiakro et de Bouaké ont enregistré les fréquences de feux les plus élevés, précédés par les sous-préfectures comme Bocanda, Kouassi-Kouassikro, Tiebissou, Niakaramandougou, Fombolo, etc. Les sous-préfectures qui ont enregistré les plus faibles fréquences de feu sont les sous-préfectures au sud-est de la zone d’étude.

5.2.2.2. Densité des feux

Les points de feux actifs ont permis de produire une carte de densité spatiale des feux. Cette carte, produite à une résolution spatiale de 300 m, a permis d’évaluer l’intensité du feu et les zones les plus touchées par les feux dans le bassin versant étudié de 2001 à 2016 (Figure 5-11). Chaque pixel représente le nombre moyen d’incendies qui ont éclôs dans la zone.

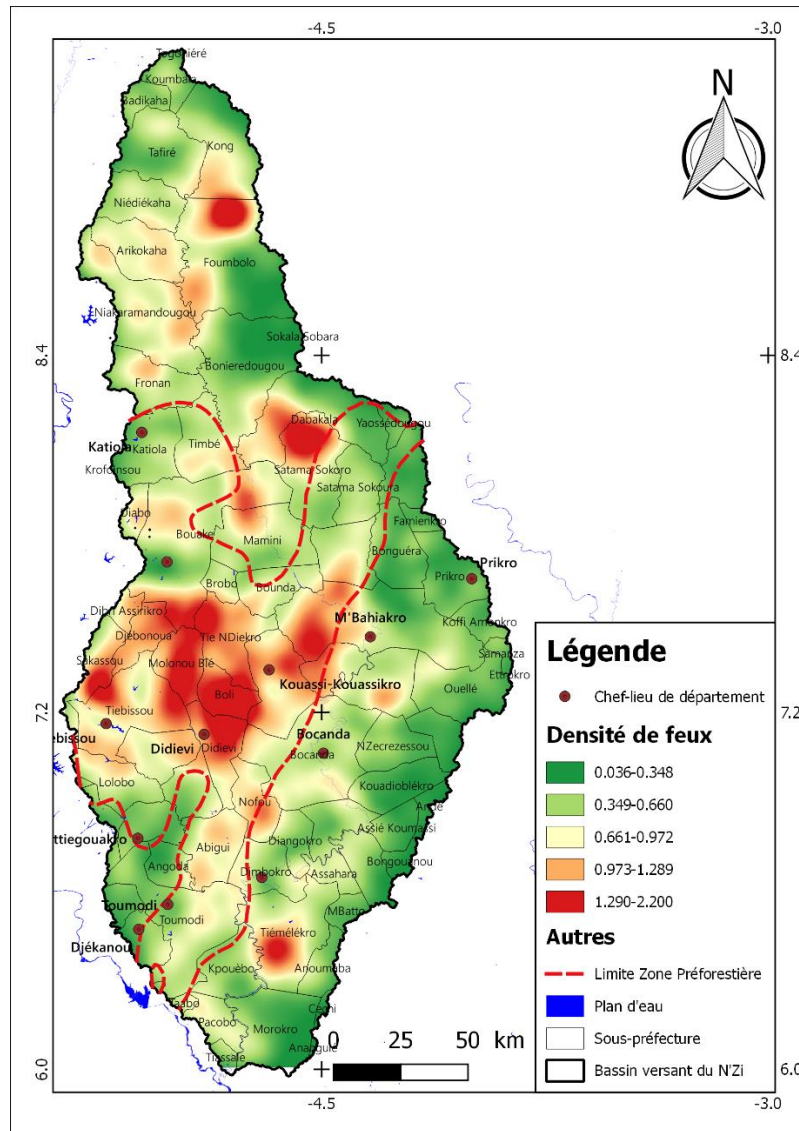


Figure 5-11 : Carte de densité de feux de 2001 à 2016 du BVN

Les parties Sud et Est de la zone d'étude ont connu une intensité faible de feux par 0,09 km², tandis que la sphère centrale de la zone préforestière composée par les départements de Tiebissou, Didievi, Kouassi-Kouassikro et Bouaké apparaît comme un point chaud avec jusqu'à 2 feux par 0,09 km² (soit 22,2 feux/km²). Par contre, les régions du nord de la zone d'étude présentent une activité moyenne des feux.

Les cartes de densité de feux et de proportion brûlée par sous-préfecture se trouvent en Annexe 11.

5.2.3. Analyse des tendances

5.2.3.1. Anomalies des foyers de feu détectés et surfaces brûlées

Les anomalies de foyers de feux et de surfaces brûlées montrent la densité et la sévérité des feux, respectivement. La Figure 5-12 présente les anomalies des foyers de feux.

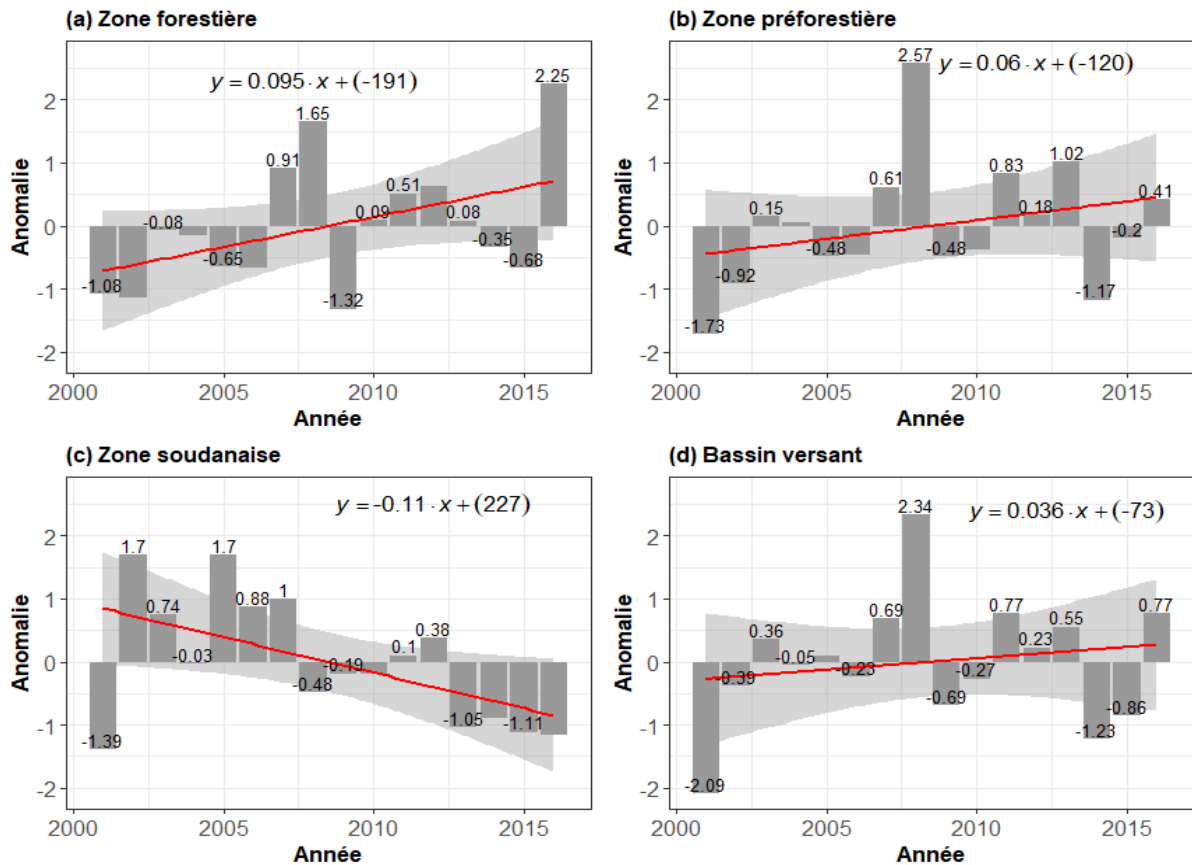


Figure 5-12 : Anomalie annuelle des foyers de feux dans (a) la zone forestière, (b) la zone préforestière, (c) la zone soudanaise et (d) l'ensemble du BVN

La Figure 5-12 montre que les anomalies positives les plus élevées ont été observées dans la zone forestière et l'ensemble du BVN en 2008, avec des anomalies respectives de 2,34 et 2,57, alors que la zone forestière a présenté le pic le plus élevé en 2016 ($A_{NF} = 2,25$) et la zone soudanaise en 2002 et 2005 ($A_{NF} = 1,7$).

Cependant, les zones préforestière ($A_{NF} = -1,73$), soudanaise ($A_{NF} = -1,39$) et l'ensemble du BVN ($A_{NF} = -2,09$) ont observé les pics les plus bas en 2001 à l'exception de la zone forestière qui a présenté le pic le plus bas en 2009 ($A_{NF} = -1,32$).

L'allure des courbes de tendance des anomalies de nombre de feux (en rouge) montrent que les zones forestière, préforestière et l'ensemble du BVN suivent une tendance haussière, alors que la zone soudanaise présente une allure baissière.

Les anomalies des surfaces brûlées en fonction des zones phytogéographiques sont présentées par la Figure 5-13.

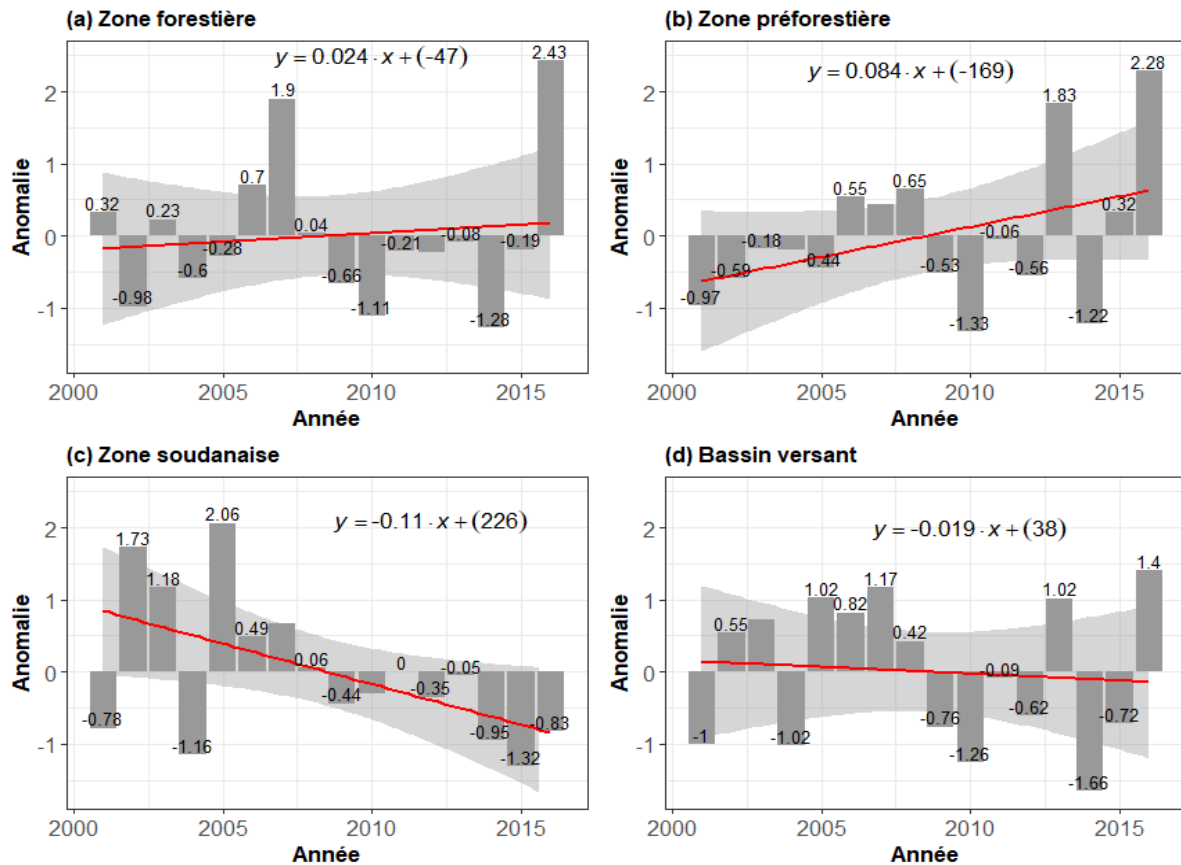


Figure 5-13 : Anomalie annuelle des surfaces brûlées dans (a) la zone forestière, (b) la zone préforestière, (c) la zone soudanaise et (d) l'ensemble du BVN

La Figure 5-13 montre que les pics les plus élevés des anomalies dans les zones forestière et préforestière et l'ensemble du BVN ont été produits en 2016, avec des anomalies respectives de 2,43 et 2,28, 1,14, à l'exception de la zone soudanaise qui a enregistré l'anomalie la plus élevée en 2005 ($A_{SB} = 2,06$). A l'opposé, les pics les plus bas ont été observés dans la forestière, préforestière et l'ensemble du BVN en 2014, excepté la zone soudanaise qui a présenté les anomalies les plus faibles en 2015 ($A_{SB} = -1,32$).

Les courbes de tendance des anomalies de surfaces brûlées (en rouge) montrent que les zones forestière et préforestière suivent une tendance haussière, alors que la zone soudanaise et l'ensemble du BVN observent une tendance à la baisse.

5.2.3.2. Tendances des foyers de feux et surfaces brûlées par écorégion

Les tendances au sein des données pyrologiques ont été analysées à la fois pour l'ensemble du BVN et pour chaque écorégion afin d'avoir des inférences sur l'évolution des feux de végétation au fil des années. Le Tableau 5-6 présente les résultats du test de Kendall saisonnier, la pente de Sen et l'intersection de Conover (IC) pour l'occurrence des feux détectés et les surfaces brûlées dans le bassin versant.

Tableau 5-6 : Tendances du nombre de feux et des surfaces brûlées selon les écorégions

Localisation	Série	IC	Pente de Sen	Test Z	p-value	Significativité
Zone forestière	NF	7	-0,3401	-7,5195	$5,50 \times 10^{-14}$	***
	SB	0	-0,1326	-3,0157	0,002564	**
Zone préforestière	NF	2,625	-0,2523	-5,5667	$2,60 \times 10^{-8}$	***
	SB	0	-0,0482	-1,1055	0,268964	ns
Zone soudanaise	NF	0	-0,1639	-3,697	0,000218	***
	SB	0	-0,0086	-0,1992	0,842119	ns
Ensemble du bassin	NF	13,4	-0,2631	-5,6107	$2,01 \times 10^{-8}$	***
	SB	0	-0,0807	-1,796	0,0725	ns

IC = Intersection de Conover ; ns = non significatif ($p > 0,05$); ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$.

Les résultats montrent qu'il existe une tendance négative significative pour l'ensemble du BVN au niveau de l'occurrence des feux (NF). Toutes les écorégions ont montré une tendance baissière très significative pour le test saisonnier de Kendall ($p < 0,001$).

Considérant l'ensemble du BVN, la tendance mensuelle des surfaces brûlées (SB) n'a pas montré de signification d'un point de vue statistique. En analysant la tendance les SB de chaque écorégion, il est évident que la zone préforestière et la zone soudanaise n'ont montré aucune tendance significative pour les deux tests, alors que le test de Kendall saisonnier était significatif pour la zone forestière avec $p < 0,05$. Dans ces écorégions, les SB décrivent une tendance décroissante.

Au niveau du nombre de feux, les estimateurs d'IC sont positifs pour l'ensemble des zones phytogéographiques excepté la zone soudanaise où une IC nulle a été identifiée. Par contre, les IC au niveau des surfaces brûlées sont toutes nulles dans toutes les écorégions. Ces valeurs nulles d'IC impliquent que les tendances, représentées par des droites affines, passent par l'origine des axes au sein de toutes les écorégions.

5.3. IMPACT DE LA VARIABILITE CLIMATIQUE SUR LA DYNAMIQUE DES FEUX

Cette section présente l'influence des conditions climatiques sur la dynamique des feux de végétation. Elle s'est faite à l'aide d'analyses multivariées (corrélation de Spearman, intercorrélation, test de Kruskal-Wallis, régression GAM, etc.).

5.3.1. Corrélation entre les variables pyrologiques et les variables climatiques

5.3.1.1. Corrélation de Spearman entre les variables pyrologiques et climatiques

La matrice de corrélation donne une première idée des associations existantes entre les variables pyrologiques et les variables climatiques en fonction de la zone phytogéographique. La corrélation entre les indices climatiques, les indices de danger et les variables pyrologiques ont été calculés à l'aide de données mensuelles. A la Figure 5-14, les corrélations positives significatives sont affichées en bleu, les corrélations négatives significatives en rouge et les corrélations non significatives sont en blanc ($p > 0,05$). La matrice de corrélation donne une première idée des associations existantes entre les différentes variables climatiques et pyrologiques en fonction des écorégions. Ces paramètres sont relativement bien corrélés entre eux (Figure 5-14).

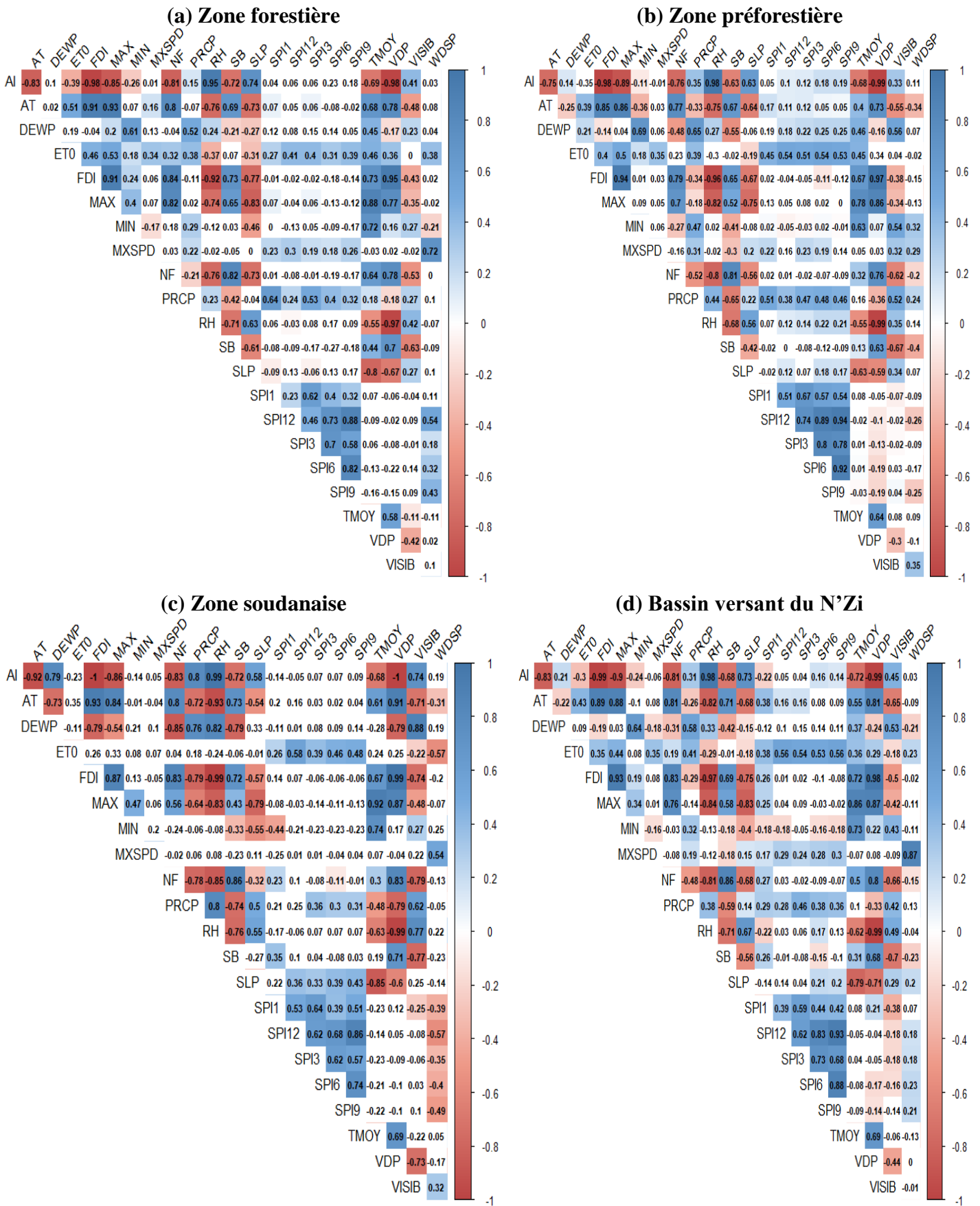
Dans la zone forestière, les variables statistiquement non significatives ($p > 0,05$) sont MIN, MXSPD, WDSP, DEWP, SPI1, SPI3, SPI6, SPI9 et SPI12 pour le nombre de feux (NF) et, MIN, MXSPD, WDSP, ET0, SPI1, SPI3, SPI6, SPI9, SPI12 pour les surfaces brûlées (SB) (Figure 5-14). Les autres variables sont hautement significatives ($p < 0,001$). La variable la plus corrélée pour NF et SB est l'indice de danger de feu (FDI), corrélée positivement à l'activité des feux de végétation.

Dans la zone préforestière, presque toutes les variables climatiques sont significatives avec $p < 0,05$ sauf ET0, MXSPD, SPI1-12 pour NF et ET0, SPI1-12 pour SB. La variable la plus corrélée est RH pour NF et SB, proportionnellement inverses à celles-ci (Figure 5-14b).

Dans la zone soudanaise, les variables climatiques non significatives identifiées sont MIN, MXSPD, WDSP, ET0, SPI3, SPI9, SPI12 pour NF et MXSPD, WDSP, SLP, TMOY, ET0, SPI3, SPI6, SPI9, SPI12 pour SB (Figure 5-14c). NF et SB ont montré une meilleure corrélation avec RH ($\rho = -0,85$) et DEWP ($\rho = -0,79$).

Sur l'ensemble du BVN, toutes les variables climatiques sont significatives ($p < 0,05$), sauf ET0, SPI3, SPI9, SPI12 pour SB et MIN, MXSPD, SPI3, SPI6, SPI9 et SPI12 pour NF (Figure 5-14d). La variable la plus corrélée pour SB et NF est FDI, positivement corrélé avec NF et SB, suivi de RH, négativement corrélée avec NF et SB.

En outre, toutes les écorégions et l'ensemble du BVN présentent une corrélation négative proportionnelle avec les précipitations (PRCP) et une corrélation positive avec la température maximale (MAX).



5.3.1.2. Corrélation croisée de l'impact du climat sur la dynamique des feux de végétation

Les analyses exploratoires ont permis de mettre en exergue une forte corrélation entre certaines variables climatiques et les variables pyrologiques. Cependant, la corrélation ne conduit pas nécessairement à une causalité. Pour étudier quels sont les facteurs qui impactent la dynamique de feux, une intercorrélations a été utilisée pour les séries chronologiques. Par conséquent, les fonctions de corrélations croisées (CCF) ont été calculées entre les séries de données avec différents décalages (-20 à +20 mois).

5.3.1.2.1. Occurrence des feux et variables climatiques

La CCF entre les variables pyrologiques et les variables climatiques par écorégion est présentée par le Tableau 5-7.

Tableau 5-7 : Résumé des fonctions de corrélations croisées significatives identifiées entre le nombre de feux et les variables pyrologiques en fonction des écorégions

Variable climatique	Zone forestière		Zone préforestière		Zone soudanaise		Ensemble du BVN	
	CCF _{max} *	lag (mois)	CCF _{max} *	lag (mois)	CCF _{max} *	lag (mois)	CCF _{max} *	lag (mois)
AI	-0,722	0	-0,626	1	0,453	-17	-0,639	1
AT	0,672	0	0,587	0	-0,353	-15	0,692	0
DEWP	-0,531	0	-0,833	0	-0,402	-11	-0,656	0
ET0	0,437	1	0,314	-10	-0,280	-15	0,418	2
FDI	0,725	0	0,632	1	-0,466	-17	0,648	1
MAX	0,562	0	0,582	1	-0,474	-17	-0,637	-17
MIN	0,335	2	-0,427	0	0,513	-9	-0,473	0
MXSPD	0,196	6	-0,332	10	-0,348	-14	-0,190	-13
PRCP	-0,380	-1	-0,410	0	0,339	-18	-0,494	0
RH	-0,764	0	-0,728	0	0,417	-17	-0,672	0
SLP	0,546	6	0,529	6	-0,448	-9	0,605	-6
SPI1	0,175	12	-	-	0,407	1	0,317	12
SPI3	0,192	14	-0,149	-13	-0,196	12	-0,218	-13
SPI6	0,172	14	-	-	0,169	5	-0,166	-12
SPI9	-	-	-	-	-	-	-	-
SPI12	-	-	-	-	-	-	-	-
TMOY	0,545	1	0,560	2	-0,444	-16	0,644	2
VDP	0,730	0	0,644	1	0,440	-10	0,638	1
VISIB	-0,613	-1	-0,779	0	-0,505	-11	-0,777	0
WDSP	0,332	6	-0,352	-13	0,353	-16	-0,204	-1

PRCP : Précipitations, TMOY : Température moyenne, MAX : Température maximale, MIN : Température minimale, AT : Amplitude thermique, ET0 : Evapotranspiration de référence, WDSP : Vitesse moyenne du vent, MXSPD : Vitesse maximale du vent, RH : Humidité relative moyenne, VDP : Déficit de pression de vapeur, SLP : Pression réduite au niveau de la mer, DEWP : Point de rosée, VISIB : Visibilité moyenne, SPI1,3,6,9 et 12 : Anomalie pluviométrique à 1 mois, 3 mois, 6 mois, 9 mois et 12 mois, AI : Indice d'Angstrom, FDI : Indice de danger de feu de Lowveld, CCF_{max}* : Valeur maximale significative ($p < 0,05$) de la fonction de corrélation croisée

Le Tableau 5-7 montre que la plupart des variables climatiques ont une influence significative sur l'occurrence des feux de végétation à différents délais.

Dans la zone forestière, on note que la CCF a atteint son maximum au lag 0 pour quelques facteurs dont AI, AT, DEWP, FDI, MAX, RH et VDP. Les résultats suggèrent que ces facteurs augmentent et diminuent simultanément, tandis que DEWP, AI et RH évoluent de manière opposée par rapport à l'occurrence des feux. Aussi, la CCF a atteint un pic au délai $h = -1$ pour VISIB et PRCP, ce qui montre que la visibilité et les précipitations enregistrées au mois $t - 1$ sont associées au nombre de feux détectés au mois t . En revanche, les variables MXSPD, SLP et WDSP ont atteint un pic au lag 6. Ces résultats indiquent que ces facteurs influencent l'occurrence des feux environ 6 mois après leur apparition.

Dans la zone préforestière, les covariantes RH, VISIB, PRCP, MIN, MXSPD et DEWP présentent des corrélations croisées fortes et négatives au lag 0 tandis qu'AT montre une corrélation forte et positive à ce même délai. Ces observations suggèrent que les variables climatiques sus-citées mesurées au mois t sont associées à l'apparition de feux de végétation dans cette écorégion. Aussi, les covariables VDP, MAX, FDI exposent une corrélation forte et positive au lag 1 tandis qu'AI présente une corrélation forte et négative à ce même lag.

Au niveau de la zone soudanaise, les variables présentes des corrélations croisées relativement faibles et des décalages majoritairement négatifs (≥ -9 mois). Cela signifie que les variables climatiques conduisent l'apparition des foyers de feu dans cette écorégion.

Au niveau de l'ensemble du BVN, les variables VISIB, RH, PRCP, MIN et DEWP ont présenté des corrélations croisées fortes et négatives au lag $h = 0$ tandis qu'AT expose une corrélation forte et positive. Ces observations suggèrent que les valeurs de VISIB, RH, PRCP, MIN, DEWP et AT enregistrés au mois t impactent directement l'apparition de feux de végétation. Quant aux variables AI, FDI et VDP, elles présentent des corrélations fortes au lag 1 impliquant une influence de ces variables enregistrées au mois $t-1$ à l'apparition des feux de végétation au mois t .

De façon générale, les indices de sécheresse n'impactent pas significativement l'occurrence des feux de végétation dans le bassin étudié ainsi que ses différentes écorégions.

5.3.1.2.2. Surfaces brûlées et variables climatiques

L'impact des variables climatiques sur l'importance des dégâts liés aux feux de végétation (surfaces brûlées) par écorégion a été évalué par la fonction de corrélation croisée, présentée par le Tableau 5-8.

Tableau 5-8 : Résumé des fonctions de corrélations croisées significatives identifiées entre les surfaces brûlées et les variables pyrologiques en fonction des écorégions

Variable climatique	Zone forestière		Zone préforestière		Zone soudanaise		Ensemble du BVN	
	CCF _{max} *	lag (mois)	CCF _{max} *	lag (mois)	CCF _{max} *	lag (mois)	CCF _{max} *	lag (mois)
AI	-0,548	0	-0,597	1	-0,401	-10	-0,611	-11
AT	0,543	0	0,544	0	-0,362	-16	0,595	1
DEWP	-0,592	0	-0,681	0	-0,404	-11	-0,582	-11
ET0	0,395	-10	0,350	-10	-0,215	-15	0,390	15
FDI	0,547	1	0,620	-11	0,391	-10	0,610	-11
MAX	-0,493	7	-0,570	-5	-0,436	-15	-0,594	-5
MIN	-0,421	0	-0,474	0	0,439	-9	-0,458	0
MXSPD	0,155	8	-0,273	11	-0,275	-14	-0,174	-13
PRCP	-0,395	0	-0,426	0	0,294	-18	-0,479	0
RH	-0,639	0	-0,638	-11	-0,394	-11	-0,655	-11
SLP	0,511	-17	0,499	-5	-0,410	-9	0,574	-17
SPI1	-	-	-	-	0,404	-11	0,269	-11
SPI3	-0,147	0	-	-	-0,176	13	-0,176	-13
SPI6	-	-	-	-	-	-	-0,160	1
SPI9	-	-	-	-	-	-	-	-
SPI12	-	-	-	-	-	-	-	-
TMOY	-0,491	7	0,526	-10	0,240	3	0,554	-10
VDP	0,532	1	0,614	1	0,429	-10	0,615	-11
VISIB	-0,668	0	-0,724	-12	-0,486	-11	-0,685	0
WDSP	0,271	7	-0,370	-13	0,289	-9	-0,199	0

PRCP : Précipitations, TMOY : Température moyenne, MAX : Température maximale, MIN : Température minimale, AT : Amplitude thermique, ET0 : Evapotranspiration de référence, WDSP : Vitesse moyenne du vent, MXSPD : Vitesse maximale du vent, RH : Humidité relative moyenne, VDP : Déficit de pression de vapeur, SLP : Pression réduite au niveau de la mer, DEWP : Point de rosée, VISIB : Visibilité moyenne, SPI1,3,6,9 et 12 : Anomalie pluviométrique à 1 mois, 3 mois, 6 mois, 9 mois et 12 mois, AI : Indice d'Angstrom, FDI : Indice de danger de feu de Lowveld, CCF_{max} : Valeur maximale significative ($p < 0,05$) de la fonction de corrélation croisée*

L'analyse de ce tableau montre que les paramètres climatiques sont significativement corrélés avec les surfaces brûlées à différents délais. Ainsi, dans la zone forestière, les covariantes AI, DEWP, MIN, PRCP, RH et VISIB ont présenté une corrélation croisée négative relativement élevée au lag 0, tandis qu'AT a enregistré une corrélation forte et positive au même lag. Ces observations impliquent que les valeurs des variables environnementales sus-citées enregistrées au mois t impactent significativement l'importance des surfaces brûlées dans cette écorégion. Les variables FDI et AI ont présenté une valeur de CCF_{max} élevée au lag 1. Les autres variables ont présenté des valeurs de CCF_{max} faibles et décalages élevés majoritairement positifs.

Au niveau de la zone préforestière, les covariantes DEWP, MIN et PRCP sont en corrélation négative avec les surfaces brûlées au lag 0, tandis qu'AT montre une corrélation positive au lag

0. Au lag 1, VDP présentait une corrélation positive tandis qu'AI montrait une corrélation négative. Les autres variables étaient corrélées de manière significative (avec un décalage important), mais avec un faible coefficient CCF à l'exception de VISIB, RH, MAX et FDI.

Dans la zone soudanaise, l'ensemble des variables climatiques corrént de manière significative (avec un décalage important), mais avec un faible coefficient CCF.

En définitive, sur l'ensemble du BVN, seulement trois variables (VISIB, PRCP et MIN) ont exposé des corrélations fortes avec les surfaces brûlées en l'absence de décalage (lag 0). Les autres variables corrént de manière significative (avec un décalage important) et avec un fort coefficient CCF excepté WDSP, SPI3, SPI1 et MXSPD.

Les indices de sécheresse n'ont pas influencé significativement les surfaces brûlées dans le bassin étudié ainsi que dans ses différentes écorégions.

5.3.2. Classification Hiérarchique

5.3.2.1. Evolution mensuelle

La classification hiérarchique (HCPC) organise les observations en les regroupant de façon hiérarchique en différentes classes ou sous-groupes. Le regroupement des données mensuelles a été fait à l'aide d'un dendrogramme présenté par la Figure 5-15.

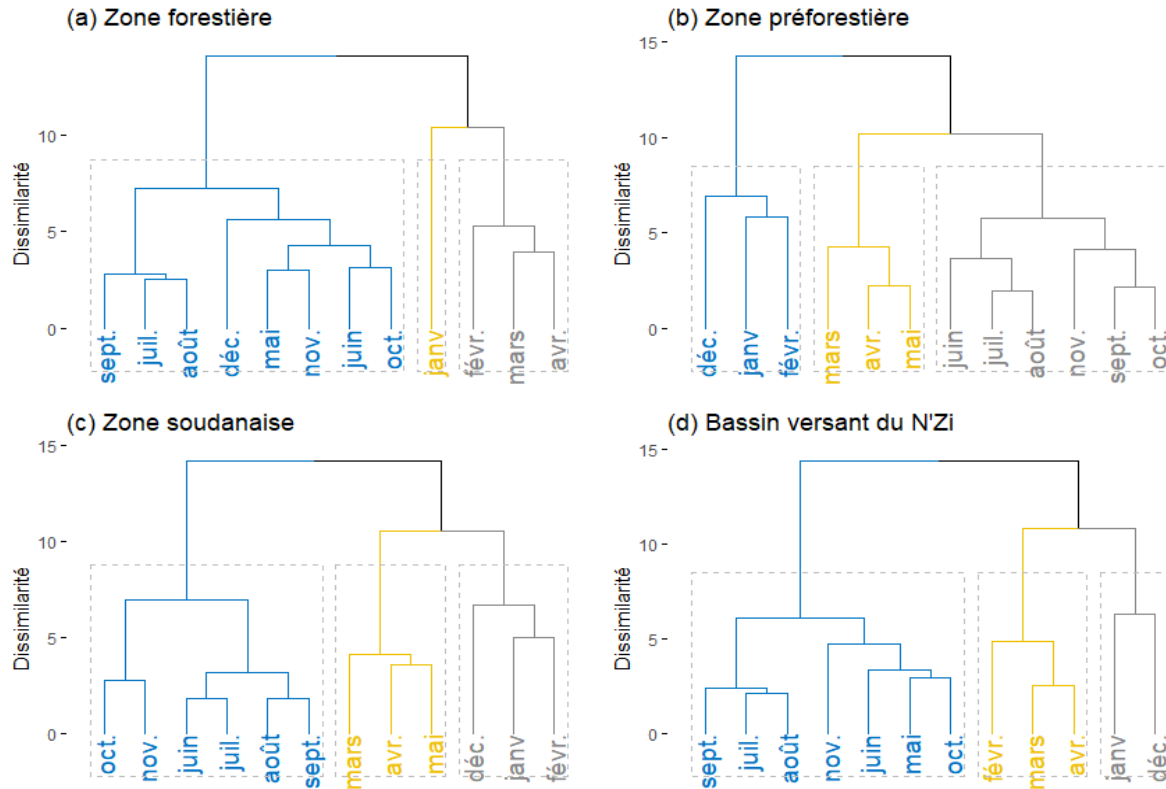


Figure 5-15 : Dendrogramme des données pyrologiques et climatiques mensuelles dans (a) la zone forestière, (b) la zone préforestière, (c) la zone soudanaise et (d) l'ensemble du BVN

La HCPC faite sur les individus révèle 3 classes au niveau des zones forestière, préforestière, soudanaise et l'ensemble du BVN.

La classe 1 est composée des individus février, mars et avril au niveau de la zone forestière, des individus décembre janvier et février au niveau de la zone préforestière et la zone soudanaise et des individus tels que janvier et décembre dans l'ensemble du BVN. En revanche, la classe 2 se compose des individus tels que janvier au niveau de la zone forestière, des individus tels que mars, avril et mai au niveau des zones préforestière et soudanaise et des individus comme février, mars et avril au niveau de l'ensemble du BVN. Finalement, la troisième classe comprend les mois mai, juin, juillet, août, septembre, octobre, novembre et décembre au niveau de la zone forestière, les mois juin, juillet, août, septembre, octobre et novembre au niveau des zones préforestière et soudanaise, et les mois mai, juin, juillet, août, septembre, octobre et novembre au niveau de l'ensemble du BVN.

En somme, au sein de la classe 1, on rencontre les mois où les foyers de feu et les dégâts liés au feu sont très importants.

5.3.2.2. Evolution annuelle

Le regroupement des données annuelles a été fait à l'aide d'un dendrogramme présenté par la Figure 5-16.

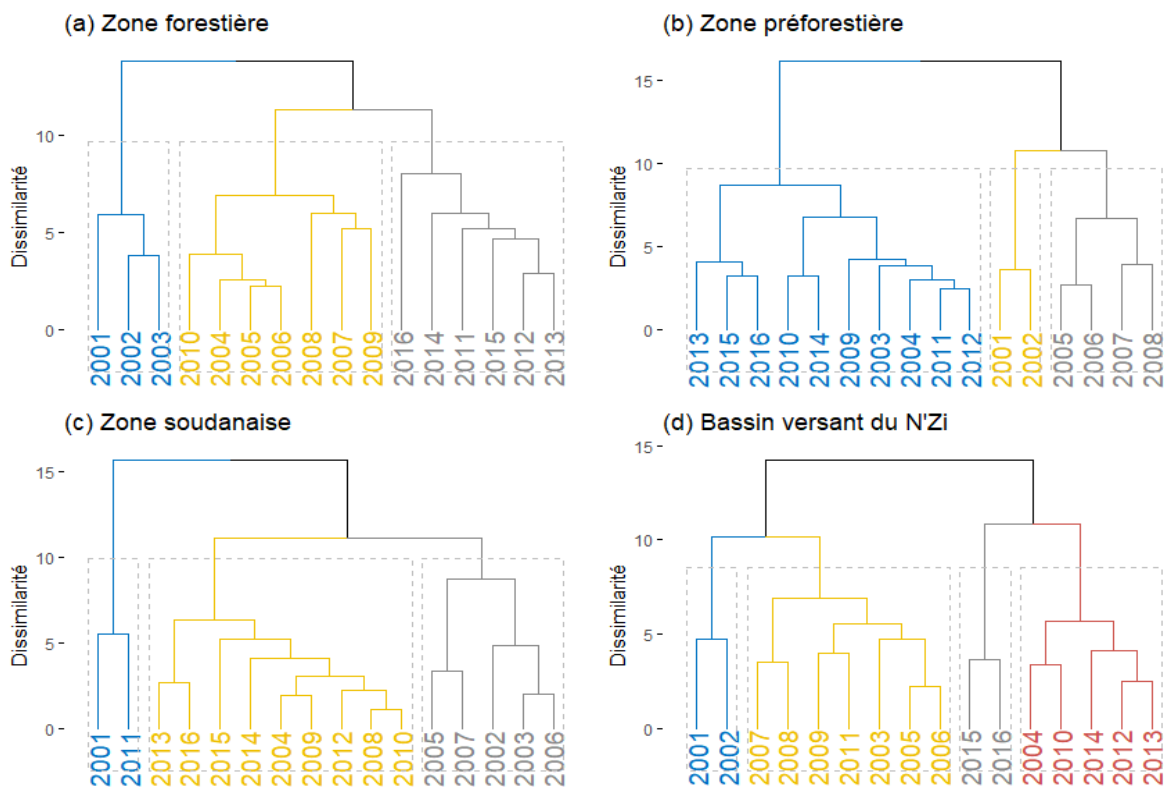


Figure 5-16 : Dendrogramme des données pyrologiques et climatiques annuelles dans (a) la zone forestière, (b) la zone préforestière, (c) la zone soudanaise et (d) l'ensemble du BVN

L'analyse de la HCPC faite sur les individus des données annuelles révèle 3 classes au niveau des zones forestière, préforestière et soudanaise, hormis l'ensemble du BVN où 4 classes ont été identifiées.

La classe 1 est composée des individus tels que 2001, 2002 et 2003 au niveau de la zone forestière, des individus 2001 et 2002 au niveau de la zone préforestière et l'ensemble du BVN et des individus 2001 et 2011 au niveau de la zone soudanaise. En revanche, la classe 2 se compose des individus tels que 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009 et 2010 au niveau de la zone forestière, tandis qu'elle comporte les individus tels que 2003, 2004, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015 et 2016 au niveau de la zone préforestière. Cette classe comporte les années 2008, 2009, 2010, 2012, 2013, 2014, 2015 et 2016 au niveau de la zone soudanaise alors qu'elle comprend les individus 2003, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009 et 2011 au niveau de l'ensemble du BVN.

La troisième classe comprend les années 2011, 2012, 2013, 2014, 2015 et 2016 au niveau de la zone forestière, les années 2005, 2006, 2007 et 2008 au niveau de la zone préforestière, les années 2002, 2003, 2006 et 2007 au niveau de la zone soudanaise, et les années 2015 et 2015 au niveau de l'ensemble du BVN. La classe 4, quant à elle, se compose des années 2004, 2010, 2012, 2013 et 2014.

5.3.3. Modèles GAM entre les variables pyrologiques et les variables climatiques

5.3.3.1. Occurrence des feux et variables climatiques

La régression GAM a été utilisée pour étudier les principaux facteurs météorologiques et climatiques affectant l'activité du feu dans le bassin versant. Le Tableau 5-9 présente les résultats des GAM du nombre mensuel de feux de végétation (NF) en fonction des trois écorégions du BVN.

Tableau 5-9 : Modèles GAM pour le nombre de feux détectés par écorégion

Paramètre	Localisation							
	Zone forestière		Zone préforestière		Zone soudanaise		Bassin versant du N’Zi	
Famille	Gaussien		Gaussien		Gaussien		Gaussien	
Fonction de lien	Identité		Identité		Identité		Identité	
R ² ajusté	0,814		0,874		0,995		0,772	
Déviante expliquée (%)	84,7		89,7		99,8		80,1	
Coefficient GCV	315,64		2181,7		10,249		9491,8	
AIC	1336,409		2004,422		201,9355		2277,71	
Covariables	edf	p-value	edf	p-value	edf	p-value	edf	p-value
TMOY	-	-	3,936	***	-	-	-	-
MIN	-	-	4,894	*	9,000	***	-	-
AT	-	-	4,394	***	-	-	1,780	***
WDSP	-	-	-	-	-	-	5,587	**
VDP	7,771	***	-	-	-	-	-	-
DEWP	-	-	8,740	***	-	-	6,459	***
VISIB	-	-	8,464	***	7,913	***	-	-
SPI1	-	-	-	-	5,087	*	3,889	*
SPI3	-	-	-	-	-	-	2,018	***
SPI6	4,124	**	-	-	-	-	4,044	***
SPI9	5,048	**	-	-	-	-	-	-
SPI12	2,710	*	-	-	-	-	-	-
FDI	8,015	***	4,018	**	8,873	***	-	-

*edf = degré de liberté effectif, * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001*

TMOY : Température moyenne, MIN : Température minimale, AT : Amplitude thermique, WDS : Vitesse moyenne du vent, VDP : Déficit de pression de vapeur, DEWP : Point de rosée, VISIB : Visibilité moyenne, SPI1,3,6,9 et 12 : Anomalie pluviométrique à 1 mois, 3 mois, 6 mois, 9 mois et 12 mois, FDI : Indice de danger de feu de Lowveld

Le Tableau 5-9 montre les principaux prédicteurs significatifs de la régression GAM de l’occurrence des feux en fonction des écorégions. Les covariables pertinentes diffèrent selon les écorégions. La non-linéarité des modèles est évaluée à l’aide de l’edf dont les valeurs les plus élevées indiquent des fonctions complexes.

Au niveau de la zone forestière, les covariables significatives pour la modélisation du nombre de feux sont VDP, SPI6, SPI9, SPI12 et FDI. La déviante expliquée par cette régression est évaluée de 84,7 %. Pour cette écorégion, SPI6 (edf = 4,124), SPI9 (edf = 5,048) et SPI12 (edf = 2,710) présentent des relations non linéaires relativement simples, tandis que VDP (edf = 7,771) et FDI (edf = 8,015) montrent des relations non linéaires relativement complexes.

Au niveau de la zone préforestière, les facteurs prédictifs significatifs du nombre de feux de végétation se composent de TMOY, MIN, AT, DEWP, VISIB et FDI. La déviante expliquée par le modèle est de 89,7 %. Dans cette zone, les prédicteurs MIN (edf = 4,894), TMOY (edf =

3,936), AT (edf = 4,394) et FDI (edf = 4,018) présentent des relations non linéaires relativement simples avec le nombre de feux de végétation, tandis que DEW (edf = 8,740) et VISIB (edf = 8,464) montrent des relations non linéaires relativement complexes.

Dans la zone soudanaise, la déviance expliquée par le modèle s'évalue à 99,8 %. Dans ce domaine, les covariables clés se composent de MIN (edf = 9), VISIB (edf = 7,913), SPI1 (edf = 5,087) et FDI (edf = 8,873). Dans cette zone, toutes les covariables significatives présentent des relations non linéaires relativement complexes.

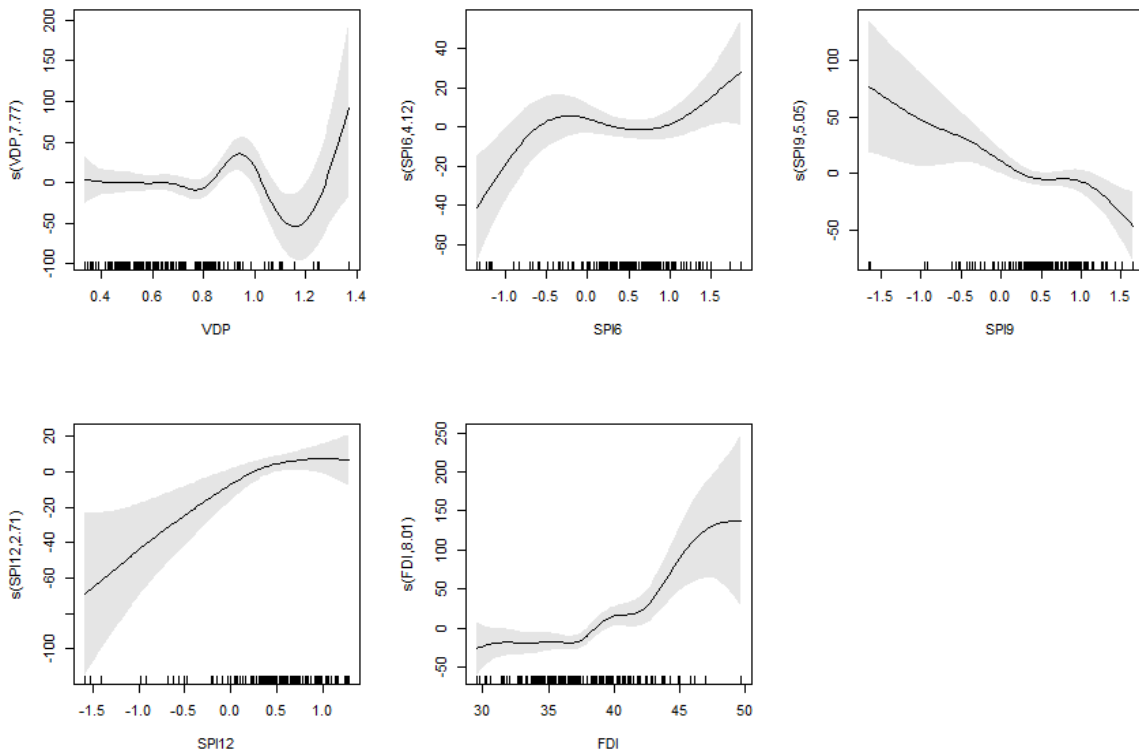
Au niveau de l'ensemble du BVN, les principaux prédicteurs du modèle GAM sont WDSP, AT, DEWP, SPI1, SPI3 et SPI6 pour le nombre de feux. Toutes les covariables incluses dans le modèle GAM ont pu expliquer environ 80 % des foyers de feu. Dans cette région, toutes les covariables significatives ont présenté des relations non linéaires relativement simples.

L'allure des relations fonctionnelles des prédicteurs du nombre de feux dans chaque écorégion est illustrée par la Figure 5-17. Cette figure, présentant les relations fonctionnelles, indique que le nombre de feux de végétation présente des réponses non linéaires aux covariables.

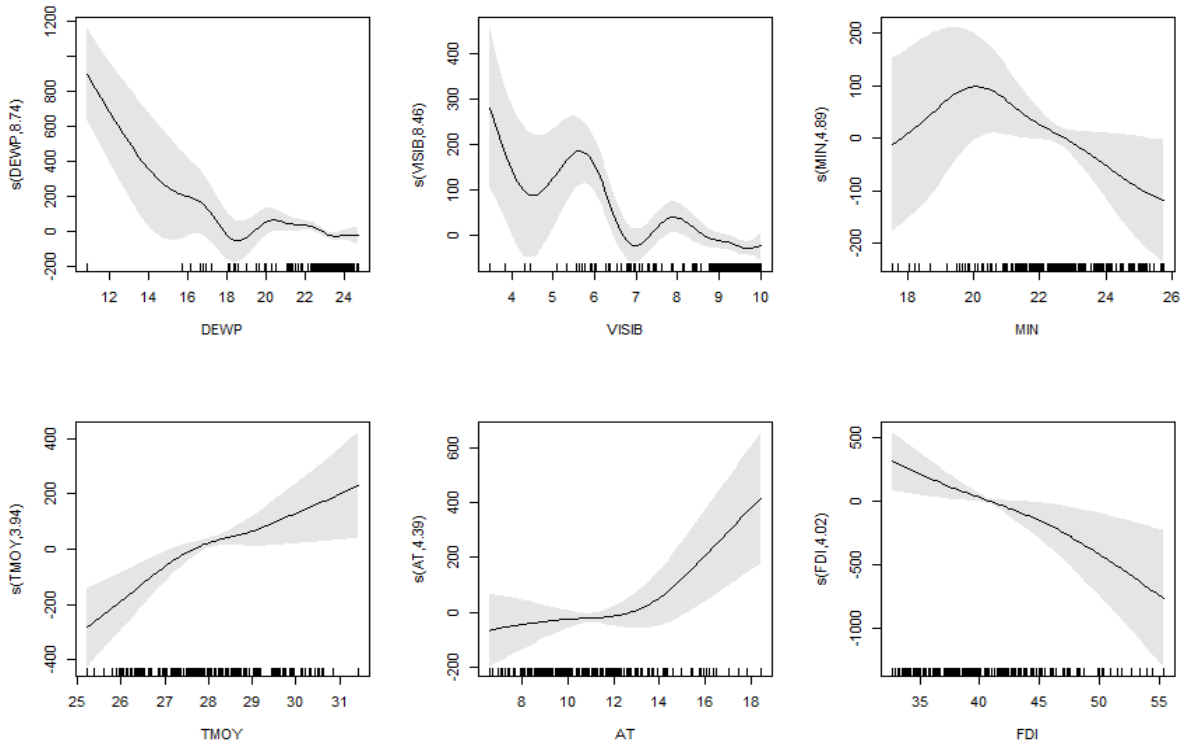
Au niveau de la zone forestière (Figure 5-17a), les variables significatives présentent une allure non linéaire simple (SPI6, SPI9 et SPI12) ou complexe (VDP et FDI). Les variables VDP, SPI6, SPI12 et FDI suivent une tendance croissante alors que SPI9 présente une tendance à la baisse.

Au niveau de la zone préforestière (Figure 5-17b), les prédicteurs suivent une allure non linéaire simple (MIN, TMOY, AT et FDI) ou complexe (DEWP et VISIB). Les variables TMOY et AT suivent une tendance croissante pendant que les variables DEWP, VISIB, MIN et FDI présentent une tendance décroissante.

(a) Zone forestière



(b) Zone préforestière



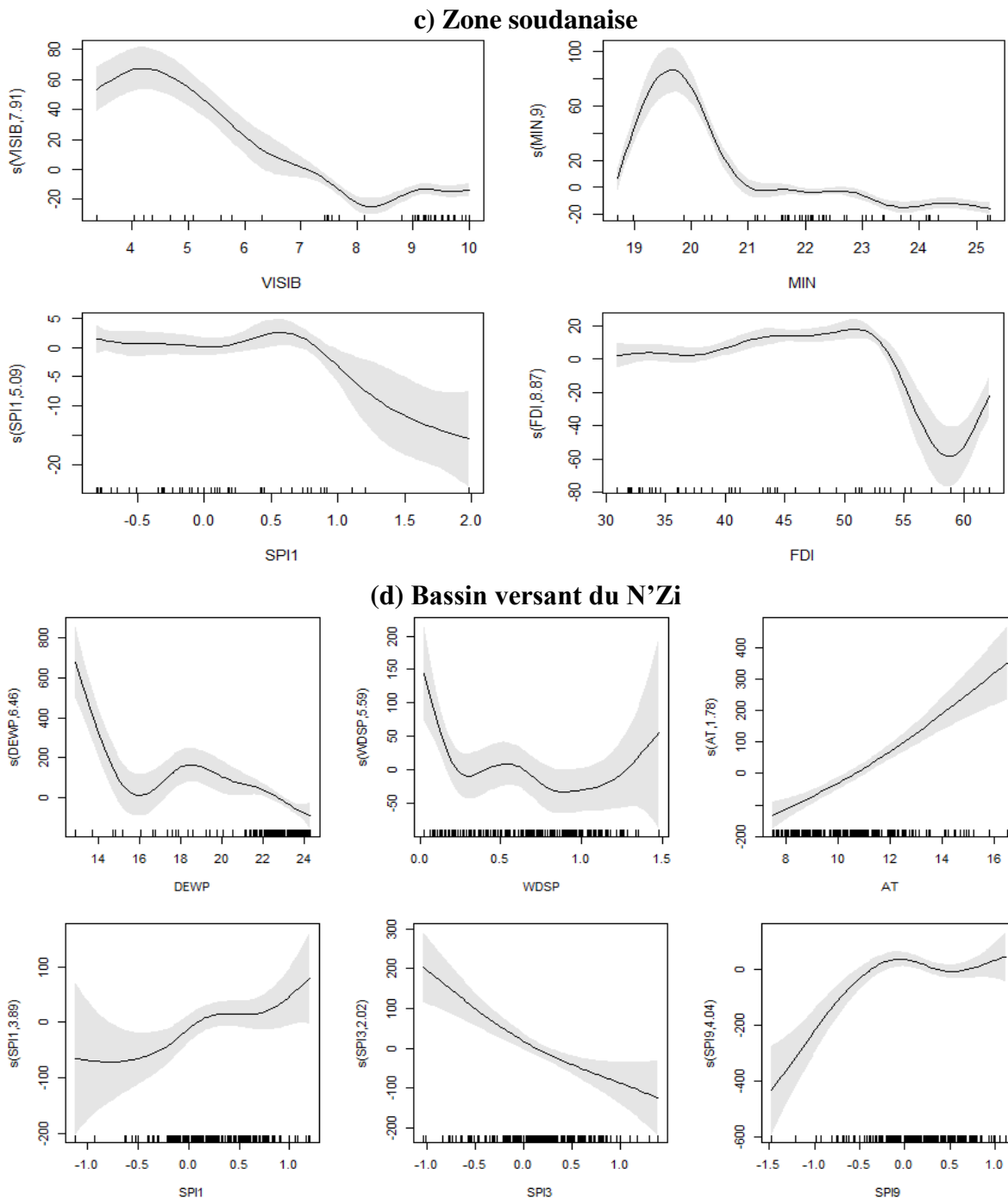


Figure 5-17 : Courbes de lissage des covariables modélisant le nombre de feux dans (a) la zone forestière, (b) la zone préforestière, (c) la zone soudanaise et (d) l'ensemble du BVN

Au niveau de la zone soudanaise (Figure 5-17c), les variables significatives VISIB, MIN et FDI présentent une allure non linéaire complexe alors que le prédicteur SPI1 suit une allure relativement simple. Ces variables suivent une tendance décroissante.

Dans l'ensemble du BVN (Figure 5-17d), les prédicteurs AT, SPI1, SPI3 et SPI9 présentent une allure relativement simple alors que les variables DEWP et WDSP suivent une allure non

linéaire complexe. Les variables DEWP, WDSP et SPI3 présentent une tendance à la baisse, alors que les prédictors AT, SPI1 et SPI9 suivent une tendance haussière.

De toutes les covariables significatives, la fonction lisse se subdivise en une, deux ou plusieurs régions rugueuses en fonction de leur tendance. Une région d'influence positive pourrait être suivie d'une région d'influence négative et vice versa. Par exemple, la fonction lisse de SPI6 dans la zone forestière (Figure 5-17a) pourrait être classée en une seule zone d'influence positive. Ce résultat montre que SPI6 a de fortes incidences positives sur le nombre de feux dans cette écorégion. Comparé à SPI6, VDP a montré une fonction plus complexe qui a changé plusieurs fois de directions (Figure 5-17a). VDP a réduit le nombre de feux de 0,3 à 0,8 (région 1) et de 0,9 à 1,2 (région 3), mais a augmenté le nombre de feux de 0,8 à 0,9 (région 2) et de 1,2 à 1,4 (région 4). Cependant, seul un petit nombre d'observations a été trouvé dans les régions 3 et 4 et leurs intervalles de confiance sont relativement larges ; ce qui suggère que l'influence de VDP sur l'activité des feux pourrait être faiblement significative dans ces régions.

5.3.3.2. Surfaces brûlées et variables climatiques

A l'instar des foyers de feu détectés, les surfaces brûlées par écorégion ont été croisées aux principaux facteurs climatiques pour évaluer l'impact de ces facteurs sur les dégâts liés aux feux de végétation. Le Tableau 5-10 présente les résultats des GAM des superficies mensuelles brûlées (SB) en fonction des trois écorégions du BVN.

Tableau 5-10 : Modèles GAM pour les surfaces brûlées par écorégion

Paramètre	Localisation							
	Zone forestière		Zone préforestière		Zone soudanaise		Bassin versant du N'Zi	
Famille	Gaussien		Gaussien		Gaussien		Gaussien	
Fonction de lien	Identité		Identité		Identité		Identité	
R ² ajusté	0,771		0,869		0,981		0,784	
Déviance expliquée (%)	84,2		89,3		99,7		81,3	
Coefficient GCV	4,73×10 ⁷		2261,7		4,5052×10 ⁷		9088	
AIC	3344,81		2011,501		782,5832		2268,917	
Covariables	edf	p-value	edf	p-value	edf	p-value	edf	p-value
TMOY	7,236	**	3,719	***	-	-	-	-
MIN	2,112	**	5,447	**	-	-	-	-
AT	-	-	4,335	**	8,851	**	2,098	**
ET0	2,101	**	-	-	-	-	-	-
MXSPD	-	-	-	-	3,932	**	-	-
DEWP	7,517	*	8,883	***	-	-	7,175	***
VISIB	8,678	***	8,500	***	9,000	***	1,208	***
SPI3	8,945	***	-	-	-	-	-	-
SPI9	7,289	**	-	-	-	-	-	-
FDI	6,692	*	4,139	*	7,043	*	-	-

*edf = degré de liberté effectif, * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001*

TMOY : Température moyenne, MIN : Température minimale, AT : Amplitude thermique, ET0 : Evapotranspiration de référence, MXSPD : Vitesse maximale du vent, DEWP : Point de rosée, VISIB : Visibilité moyenne, SPI3 : Anomalie pluviométrique à 3 mois, SPI9 : Anomalie pluviométrique à 9 mois, FDI : Indice de danger de feu de Lowveld

Le Tableau 5-10 présente les principaux prédicteurs significatifs de la régression GAM des surfaces brûlées en fonction des écorégions.

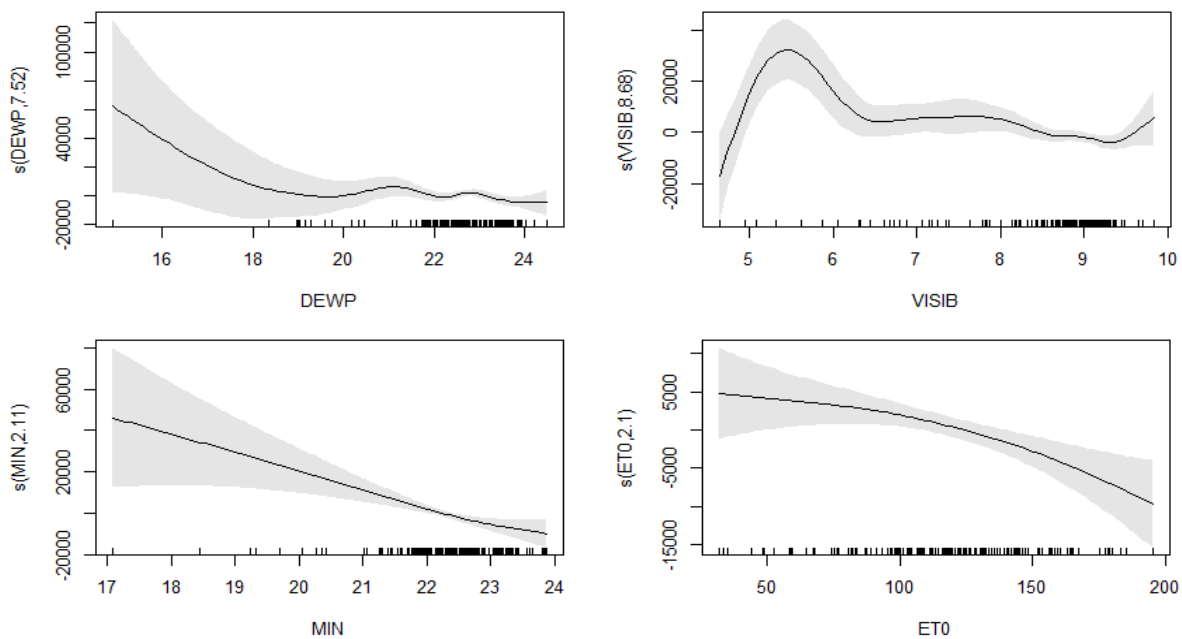
Au niveau de la zone forestière, les différents prédicteurs des surfaces brûlées sont composés de TMOY, MIN, ET0, DEWP, VISIB, SPI3, SPI9 et FDI. La déviance expliquée par le modèle est de 84,2 %. Pour cette écorégion, MIN (edf = 2,112) et ET0 (edf = 2,101) présentent des relations non linéaires relativement simples, tandis que les relations TMOY (edf = 7,236), DEWP (edf = 7,517), VISIB (edf = 8,678), SPI3 (edf = 8,945), SPI9 (edf = 7,289) et FDI (edf = 6,692) suivent des relations non linéaires relativement complexes.

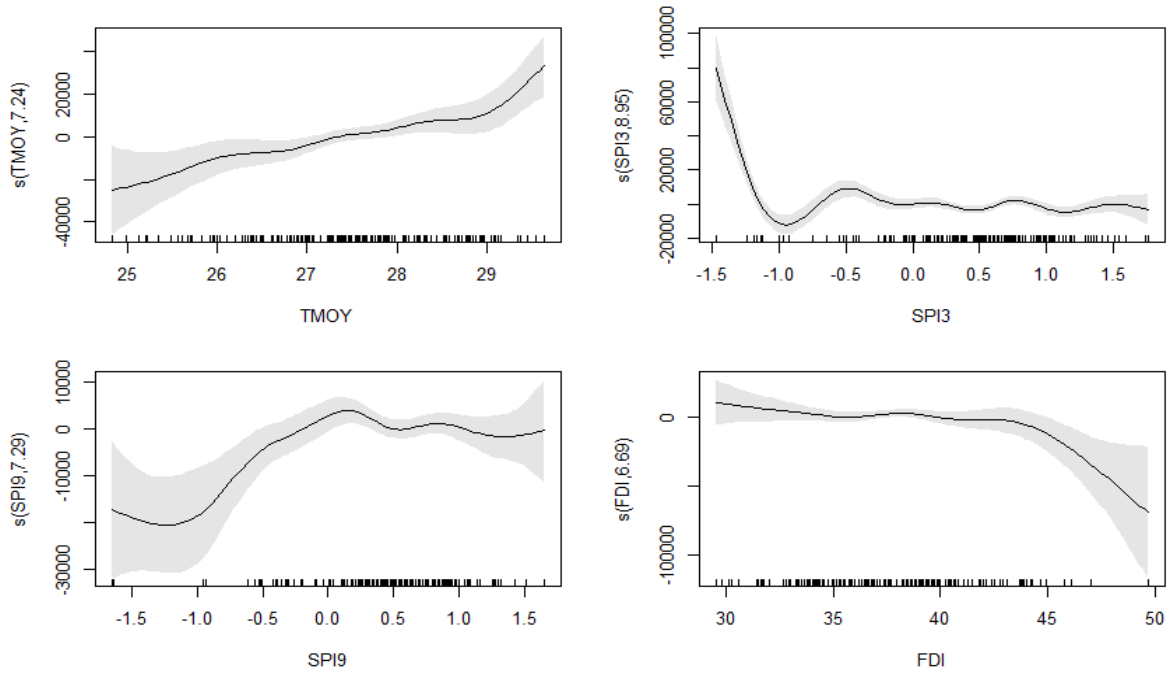
Pour la zone préforestière, les facteurs prédictifs des surfaces brûlées se composent de TMOY, MIN, AT, DEWP, VISIB et FDI. Le modèle explique 89,3 % de la déviance et le coefficient GCV est de 2261,7. Dans cette zone, MIN (edf = 5,447), TMOY (edf = 3,719), AT (edf = 4,335) et FDI (edf = 4,139) présentent des relations non linéaires relativement simples, tandis que DEWP (edf = 8,883) et VISIB (edf = 8,500) proposent des relations non linéaires relativement complexes.

Dans la zone soudanaise, la déviance expliquée par les modèles est de 99,7 % avec un coefficient GCV très élevé. Dans ce domaine, les covariables significatives se composent d'AT, MXSPD, VISIB et FDI. Dans cette zone, toutes ces covariables significatives présentent des relations non linéaires relativement complexes sauf VISIB (edf = 3,932) montre une allure non linéaire relativement simple.

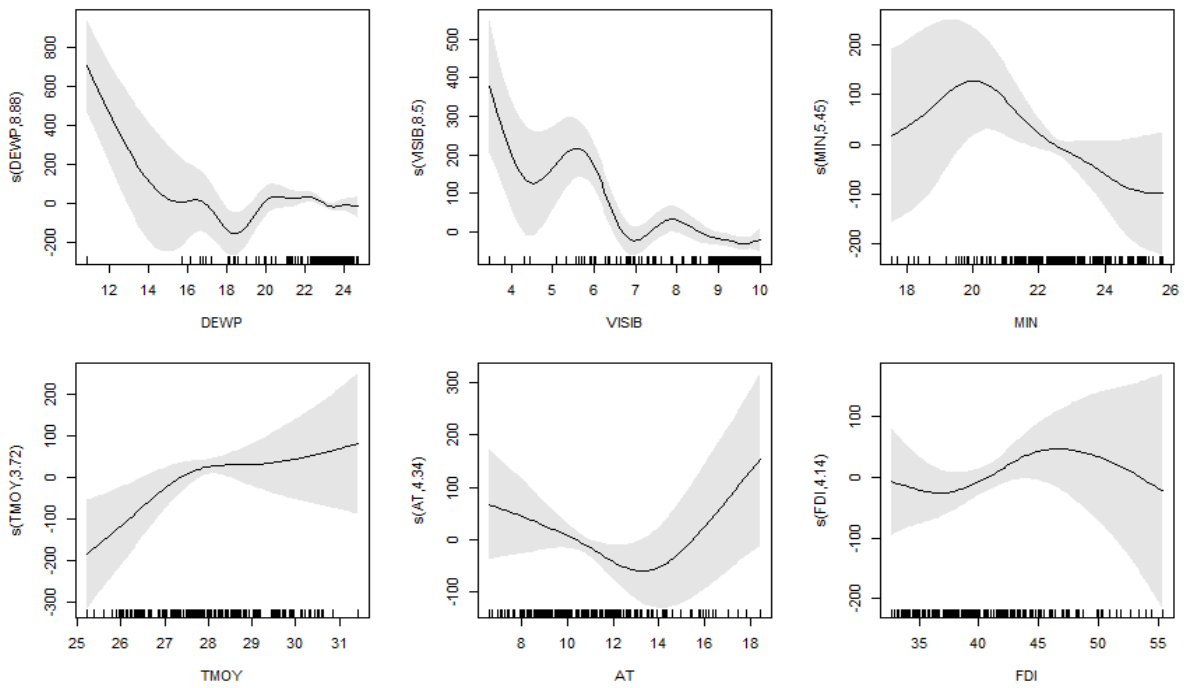
Au niveau de l'ensemble du BVN, les principaux prédicteurs du modèle GAM des surfaces brûlées sont AT, DEWP, VISIB. Les covariables incluses dans le modèle GAM ont pu expliquer environ 81 % de la déviance. Dans cette région, les covariables significatives AT (edf = 2,098) et VISIB (edf = 1,208) présentent des relations non linéaires relativement simples contrairement à DEWP (edf = 7,175) qui dessine une allure non linéaire relativement complexe. La Figure 5-18 montre les courbes de lissage des superficies mensuelles brûlées (SB) en fonction des trois écorégions du BVN.

(a) Zone forestière





(b) Zone préforestière



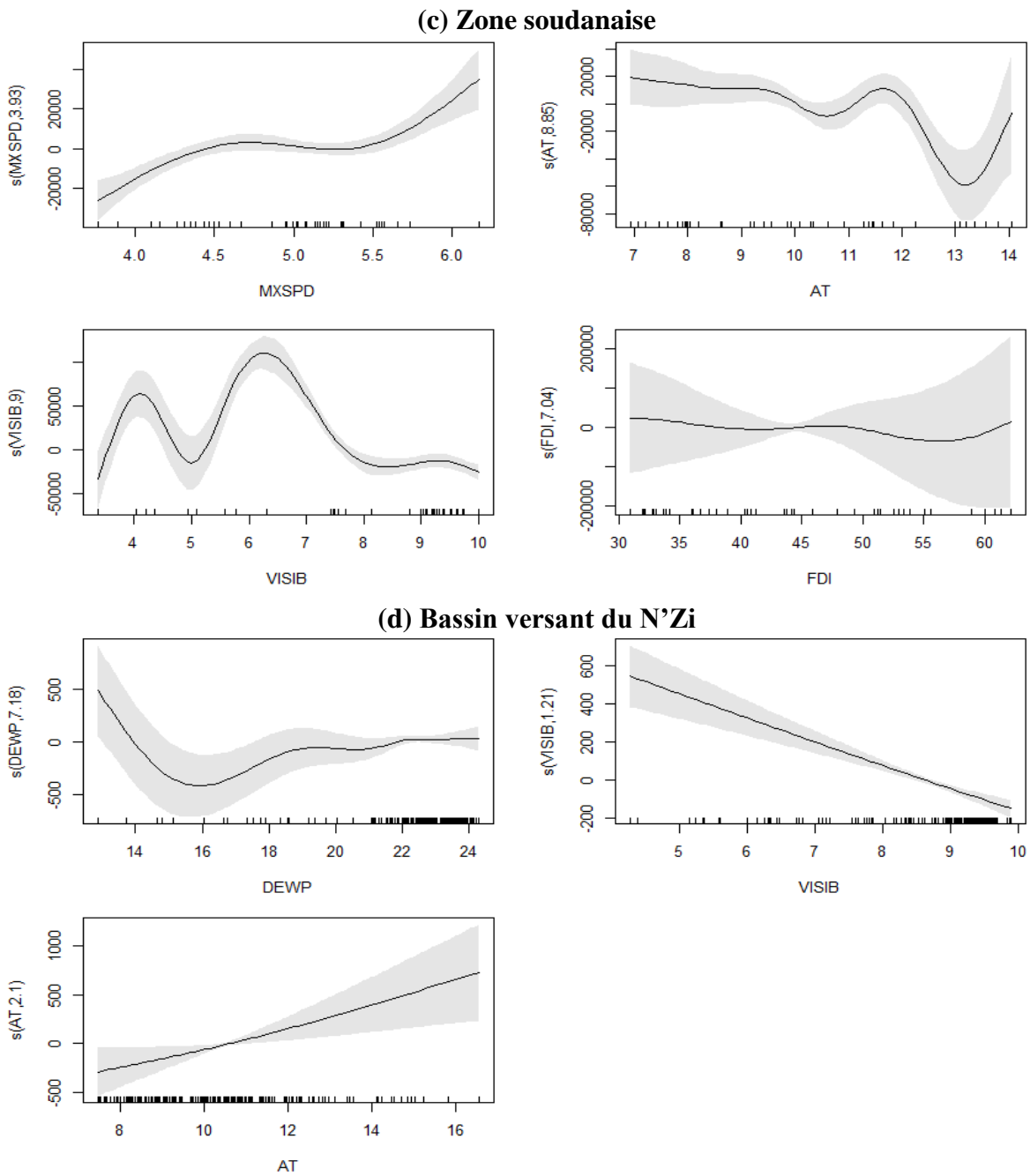


Figure 5-18 : Courbes de lissage des covariables modélisant les surfaces brûlées dans (a) la zone forestière, (b) la zone préforestière, (c) la zone soudanaise et (d) l'ensemble du BVN

La Figure 5-18 indique que les surfaces brûlées présentent des réponses non linéaires aux covariables à l'instar de l'occurrence des feux de végétation.

Au niveau de la zone forestière (Figure 5-18a), les surfaces brûlées sont négativement corrélées à DEWP, MIN, ET0, SPI3 et FDI tandis les variables TMOY et SPI9 sont positivement corrélées aux surfaces brûlées.

Au niveau de la zone préforestière (Figure 5-18b), les prédictors TMOY, AT et FDI sont positivement corrélés aux surfaces, tandis que les variables DEWP, VISIB, MIN présentent une corrélation négative aux surfaces brûlées.

Au niveau de la zone soudanaise (Figure 5-18c), les covariables significatives composées de VISIB, AT et FDI sont négativement corrélées aux surfaces brûlées alors que le prédictor MXSPD présente une corrélation positive aux surfaces brûlées.

Au niveau de l'ensemble du BVN (Figure 5-18d), les surfaces brûlées sont négativement corrélées à VISIB et DEWP tandis qu'elles étaient positivement corrélées à AT.

Les covariables significatives peuvent être décomposées en fonction de leur allure. Ainsi, les fonctions de lissage de MIN et ET0, au niveau de la zone forestière (Figure 5-18a), peuvent être classées en une seule zone d'influence négative. Ce résultat suggère que MIN et ET0 présentent de fortes incidences négatives sur les surfaces brûlées dans cette région. Comparé à MIN et ET0, VISIB montre une fonction plus complexe qui a changé plusieurs fois de directions (Figure 5-18a). La fonction de lissage de VISIB indique les surfaces brûlées augmentent rapidement entre 4,7 et 5,4 km (région 1) pour diminuer par la suite de 5,4 à 6,3 km. Pour des valeurs de VISIB comprises entre 6,3 et 8 km (région 3), les surfaces brûlées ont connu une légère augmentation, suivie d'une diminution constante de 8 à 9,5 km (région 4). Finalement, les surfaces brûlées ont augmenté pour des valeurs de VISIB supérieures à 9,5 km (région 5). Cependant, seul un petit nombre d'observations a été trouvé dans les régions 1, 2, 3 et 5 et leurs intervalles de confiance sont relativement larges, ce qui suggère que l'influence de VISIB sur les surfaces brûlées dans ces régions pourrait ne pas être très significative.

5.4. IMPACT DES PARAMETRES ENVIRONNEMENTAUX SUR LA DYNAMIQUE DES FEUX

Cette section étudie l'impact des paramètres biophysiques et anthropogéniques sur l'occurrence des feux de végétation dans le bassin versant étudié. Cette étude s'est faite à l'aide des tests de Kruskal-Wallis et Mann-Whitney.

5.4.1. Evolution des feux en fonction de la végétation

5.4.1.1. Type d'occupation du sol

La distribution des feux actifs en fonction de l'occupation et l'utilisation des terres est présentée par le Tableau 5-11.

Tableau 5-11 : Evolution des feux en fonction du type d'occupation du sol

Type d'occupation du sol	Nombre de feux		
	Total	Proportion (%)	Moyenne \pm SE
Forêt claire	571	2,98	35,69 \pm 17,13 ^e
Forêt dégradée	756	3,95	47,25 \pm 23,74 ^d
Forêt galerie	525	2,74	32,81 \pm 11,8 ^e
Forêt marécageuse	7	0,04	1,4 \pm 0,55 ⁱ
Reboisement	222	1,16	13,88 \pm 4,38 ^f
Savane arborée	3 020	15,77	188,75 \pm 74,25 ^b
Formation arbustive/Fourrés	4 644	24,24	290,25 \pm 78,98 ^a
Aménagement agricole	6 728	35,12	420,5 \pm 152,08 ^a
Aménagement agricole hydromorphe	51	0,27	3,4 \pm 0,99 ^h
Anacarde	439	2,29	27,44 \pm 9,17 ^e
Café-cacao	1 873	9,78	117,06 \pm 61,61 ^c
Hévéa	29	0,15	2,23 \pm 1,24 ⁱ
Palmeraie	3	0,02	1,5 \pm 0,71 ⁱ
Plan d'eau	3	0,02	3 \pm 0 ^{hi}
Cours d'eau	26	0,14	2,36 \pm 1,29 ⁱ
Zone marécageuse	17	0,09	1,7 \pm 0,82 ⁱ
Habitat humain	78	0,41	5,2 \pm 2,76 ^h
Infrastructure	12	0,06	1,5 \pm 0,76 ⁱ
Sol nu	7	0,04	1,17 \pm 0,41 ⁱ
Affleurement rocheux	145	0,76	9,06 \pm 4,86 ^g

Test de Kruskal-Wallis : $\chi^2 = 229,29$; p-value $< 2,2 \times 10^{-16}$, significativité : ***

Les valeurs avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes

Source des classes : BNETD et SEP-REDD+ [230]

L'analyse du Tableau 5-11 montre que les feux de végétation se propagent généralement dans les aménagements agricoles (35,12 %), les formations arbustives et fourrés (24,24 %), les savanes arborées (15,77 %) et les plantations de café-cacao (9,78 %)

Les résultats du test Kruskal-Wallis montrent que les types d'occupation du sol ont une influence hautement significative sur l'évolution des feux ($\chi^2 = 229,29$; p-value $< 2,2 \times 10^{-16}$). Ces résultats ont ensuite été suivis du test de Mann-Whitney permettant de mettre en évidence les types d'occupation du sol ayant l'effet le plus significatif sur l'éclosion des feux de végétation. Ce test révèle que les types d'occupation du sol qui ont le plus influencé l'éclosion des feux sont les aménagements agricoles (35,12 %) et les formations arbustives et fourrés (24,24 %). Ces deux classes de végétation forment un groupe homogène et différent des autres types de formations végétales.

L'influence de l'occurrence des feux en fonction des grands ensembles d'occupation du sol est présentée par le Tableau 5-12.

Tableau 5-12 : Evolution des feux en fonction des catégories des terres du GIEC

Catégories des terres	Nombre de feux		
	Total	Proportion (%)	Moyenne ± SE
Terres forestières	2 081	10,86	130,06 ± 43,02 ^b
Terres graminéennes	7 664	40,01	479 ± 147,85 ^a
Terres cultivées	9 123	47,62	570,19 ± 203,23 ^a
Etablissements humains	90	0,47	6 ± 3,38 ^d
Autres terres	152	0,79	9,5 ± 4,83 ^c

Test de Kruskal-Wallis : $\chi^2 = 80,017$, p-value = $8,325 \times 10^{-16}$, significativité : ***

Les valeurs avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes

Source des catégories : GIEC [249]

Le Tableau 5-12 montre que les feux de végétation occurred principalement dans les formations savanicoles (40,01 %), les formations agricoles (47,62 %) et les formations forestières (10,86 %).

Les résultats du test de Kruskal-Wallis indiquent que le nombre de feux diffère en fonction des macro-classes d'occupation du sol ($\chi^2 = 48,841$; p-value = $8,325 \times 10^{-16}$). Selon le test U de Mann-Whitney, les foyers de feu sont détectables majoritairement dans les formations savanicoles. Les foyers de feux détectés dans ces formations savanicoles diffèrent significativement des autres types de terres (terres agricoles, terres forestières, zones artificielles et autres terres). L'occurrence des feux ne diffère pas entre les zones artificielles et les autres terres au seuil de 5 %.

5.4.1.2. Densité de la canopée

L'effet de la densité de la canopée sur l'occurrence des feux de végétation est présenté par le Tableau 5-13. La densité de la canopée a été regroupée selon la catégorisation de la FAO [240].

Tableau 5-13 : Evolution des feux en fonction de la densité de la canopée

Classe	Densité de canopée		Nombre de feux	
	Valeur (%)	Total	Proportion (%)	Moyenne ± SE
Très ouverte	0-10	94	0,49	2,47 ± 1,72 ^c
Ouverte	10-40	16 347	85,34	143,39 ± 212,42 ^a
Modérément dense	40-70	2 711	14,15	28,24 ± 34,39 ^b
Très dense	70-100	4	0,02	1 ± 0 ^c

Test de Kruskal-Wallis : $\chi^2 = 56,7$, p-value = $2,979 \times 10^{-12}$, significativité : ***

Les valeurs avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes

Source des classes : FAO [240]

Le Tableau 5-13 montre que les départs de feux de végétation se réalisent particulièrement dans les zones à canopée ouverte (85,34 %) et modérément dense (14,15 %). Le test de Kruskal-Wallis montre que la densité de la canopée a un effet manifeste sur l'occurrence des feux de

végétation ($\chi^2 = 56,7$; $p = 2,979 \times 10^{-12}$). Le test de Mann-Whitney regroupe les densités de canopée en 3 groupes et indique que ces feux de végétation se déclarent majoritairement dans les zones à canopée ouverte (10–40 %). Ces zones à canopée ouverte diffèrent des autres types de canopée (très ouverte, modérément dense et très dense). Les zones à canopée très denses (70 – 100 %) sont les moins impactées par les feux de végétation.

5.4.1.3. Indice de végétation

L'effet de l'état physiologique ou l'activité photosynthétique du couvert végétal provenant des données de NDVI sur la détection des feux actifs est présenté par le Tableau 5-14.

Tableau 5-14 : Evolution des feux en fonction de l'indice de végétation

Classe	NDVI	Total	Nombre de feux	
	Valeur		Proportion (%)	Moyenne \pm SE
Nuage et Eau	< 0	1	0,01	1 \pm 0 ^{ab}
Faible	0,1 – 0,3	139	0,73	6,04 \pm 6,43 ^b
Moyen	0,3 – 0,5	11 295	58,96	146,69 \pm 184,94 ^a
Elevé	0,5 – 0,7	7 029	36,69	67,59 \pm 93,94 ^a
Très élevé	0,7 – 1	692	3,61	10,33 \pm 13,24 ^b

Test de Kruskal-Wallis : $\chi^2 = 57,41$, p-value = $1,015 \times 10^{-11}$, significativité : ***

Les valeurs avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes

Source des classes : Tucker [243]

L'analyse du Tableau 5-14 souligne que les feux de végétation sont détectés dans les zones où le NDVI est moyen (58,96 %), élevé (36,69 %) et très élevé (3,61 %). L'état physiologique a un effet significatif sur l'éclosion des feux de végétation dans le bassin versant étudié ($\chi^2 = 57,41$, p-value = $1,015 \times 10^{-11}$). Le test de Mann-Whitney indique que les feux de végétation se déclarent majoritairement dans les zones à NDVI moyen (58,96 %) et élevé (36,69 %). Ces deux classes forment un groupe homogène et diffèrent respectivement des zones à NDVI faible et très élevé au seuil de 5 %.

5.4.2. Evolution des feux en fonction du terrain

5.4.2.1. Altitude

L'influence de l'altitude sur la détection des foyers de feu dans le BVN est présentée au Tableau 5-15.

Tableau 5-15 : Evolution des feux en fonction de l'altitude

Classe	Altitude		Nombre de feux	
	Valeur (m)	Total	Proportion (%)	Moyenne \pm SE
Faible altitude	0-100	1 195	6,24	14,57 \pm 14,35 ^c
Moyenne altitude	100-300	15 241	79,56	134,88 \pm 193,59 ^a
Forte altitude	> 300	2 720	14,20	35,79 \pm 47,15 ^b

Test de Kruskal-Wallis : $\chi^2 = 25,903$; p-value = $2,372 \times 10^{-6}$, significativité : ***
Les valeurs avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes
 Source des classes : Stolle *et al.* [245]

Les résultats du test de Kruskal-Wallis met en évidence un effet significatif de l'altitude sur l'éclosion des feux dans le bassin versant étudié ($\chi^2 = 25,903$; p-value = $2,372 \times 10^{-6}$). Les feux de végétation se déclarent majoritairement dans les zones de moyennes altitudes avec 79,56 % des cas. Cette classe diffère des zones à forte altitude (14,2 %) et faible altitude (6,24 %) au seuil de 5 % selon le test U de Mann-Whitney.

5.4.2.2. Pente

L'impact de la pente sur l'occurrence des feux dans le BVN est présenté au Tableau 5-16.

Tableau 5-16 : Evolution des feux en fonction de la pente

Classe	Pente		Nombre de feux	
	Valeur (%)	Total	Proportion (%)	Moyenne \pm SE
Pente très faible	0-5	10 069	52,56	91,54 \pm 127,12 ^a
Pente faible	5-10	7 325	38,24	73,25 \pm 89,25 ^a
Pente modérée	10-15	1 325	6,92	15,77 \pm 15,05 ^b
Pente forte	15-30	384	2,00	5,26 \pm 4,92 ^c
Pente très forte	30-45	47	0,25	1,68 \pm 0,94 ^d
Pente extrême	45-70	6	0,03	1,2 \pm 0,45 ^d

Test de Kruskal-Wallis : $\chi^2 = 109,06$; p-value < $2,2 \times 10^{-16}$, significativité : ***
Les valeurs avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes
 Source des classes : Garah *et al.* [246]

Les foyers de feux sont détectés particulièrement dans les zones à pente très faible (52,56 %), faible (38,24 %), modérée (6,92 %) (Tableau 5-16). Le test de Kruskal-Wallis montre que la pente a un effet significatif sur l'éclosion des feux de végétation dans le bassin versant étudié ($\chi^2 = 109,06$; p-value < $2,2 \times 10^{-16}$). Les feux de végétation occurrent majoritairement dans les zones à pente très faible (52,56 %) et faible (38,24 %). Ces deux classes forment un groupe homogène et diffèrent des zones à pente modérée, forte, très forte et extrême au seuil de 5 % selon le test U de Mann-Whitney. Ce test regroupe les pentes en 4 groupes qui diffèrent significativement. Le groupe 1 contient les zones à pente très faible et faible, le groupe 2, les

zones à pente modérée, le groupe 3 les pentes fortes et le groupe 4, les pentes très forte et extrême.

5.4.2.3. Orientation du terrain

L'effet de l'orientation de la pente descendante sur le nombre de feux de végétation dans le BVN est présenté par le Tableau 5-17. L'inclinaison des pentes est donnée par la rose des vents.

Tableau 5-17 : Evolution des feux en fonction de l'orientation du terrain

Classe	Aspect		Nombre de feux	
	Valeur (°)	Total	Proportion (%)	Moyenne ± SE
Plat	-1	66	0,34	2 ± 1,5 ^b
Nord	0-22,5	2 436	12,72	27,07 ± 30,28 ^a
Nord-Est	22,5-67,5	2 284	11,92	26,25 ± 29,37 ^a
Est	67,5-112,5	2 386	12,46	28,07 ± 30,45 ^a
Sud-Est	112,5-157,5	2 427	12,67	26,97 ± 31,16 ^a
Sud	157,5-202,5	2 587	13,50	27,52 ± 33,28 ^a
Sud-Ouest	202,5-247,5	2 328	12,15	26,16 ± 30,4 ^a
Ouest	247,5-292,5	2 312	12,07	25,69 ± 28,29 ^a
Nord-Ouest	292,5-337,5	2 330	12,16	26,48 ± 30,04 ^a

Test de Kruskal-Wallis : $\chi^2 = 48,072$; p-value = $9,57 \times 10^{-8}$, significativité : ***

Les valeurs avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes

L'analyse de ce tableau montre que les feux de végétation sont presque également repartis en fonction de l'orientation du terrain à l'exception des zones plates qui ont enregistré seulement 66 feux. Les résultats du test de Kruskal-Wallis indiquent que la direction de la pente ascendante a un effet significatif sur l'éclosion des feux de végétation au sein du BVN ($\chi^2 = 48,072$; p-value = $9,57 \times 10^{-8}$). Le test de Mann-Whitney regroupe l'aspect en 2 groupes au seuil de 5 %. Les 8 principaux points cardinaux (Nord, Nord-Est, Est, Sud-Est, Sud, Sud-Ouest, Ouest et Nord-Ouest) forment un groupe homogène et diffèrent significativement des zones plates.

5.4.2.4. Type de sols

La distribution des foyers de feu en fonction du type de sols est présentée par le Tableau 5-18. Les feux de végétation se déclarent dans les acrisols plinthiques (12,38 %) les plinthosols pétriques (29,42 %), les plinthosols pisoplinthiques (40,67 %), les cambisols eutriques (6,78 %) et les cambisols ferraliques (5,12 %) (Tableau 5-18). Les résultats du test Kruskal-Wallis montrent que le type de sols a une influence hautement significative sur l'apparition des feux ($\chi^2 = 108,15$; p-value < $2,2 \times 10^{-16}$). Ces résultats ont ensuite été suivis du test de Mann-Whitney pour voir quel type de sols avait l'effet le plus significatif. Ce test regroupe les types de sols en 4 groupes et révèle que les types de sols qui ont le plus influencé l'éclosion des feux sont les

plinthosols pisoplinthiques (40,67 % des foyers de feu) et pétriques (29,42 %). Ces deux classes forment un groupe homogène et différent des autres types de sols au seuil de 5 % selon le test U de Mann-Whitney.

Tableau 5-18 : Evolution des feux en fonction des types de sols

Type de sols	Nombre de feux		
	Total	Proportion (%)	Moyenne \pm SE
Acrisols hapliques	111	0,58	2,52 \pm 2,27 ^d
Acrisols plinthiques	2 371	12,38	30,4 \pm 45,15 ^b
Alisols hapliques	422	2,20	8,98 \pm 10,67 ^c
Cambisols eutriques	1 298	6,78	20,28 \pm 19,05 ^b
Cambisols ferralliques	981	5,12	14,86 \pm 15,89 ^{bc}
Lixisols hapliques	546	2,85	9,93 \pm 9,75 ^c
Plinthosols pétriques	5 636	29,42	59,96 \pm 80,55 ^a
Plinthosols pisoplinthiques	7 791	40,67	74,91 \pm 98,31 ^a

Test de Kruskal-Wallis : $\chi^2 = 108,15$; p-value $< 2,2 \times 10^{-16}$, significativité : ***

Les valeurs avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes

Source des classes : Jones *et al.* [227]

Les types de sols ont été regroupés selon leur groupe pour évaluer l'effet des feux de végétation en fonction de ces groupes. Le Tableau 5-19 présente la distribution des foyers de feux en fonction des groupes de sols.

Tableau 5-19 : Evolution des feux en fonction des groupes de sols

Groupe de sols	Nombre de feux		
	Total	Proportion (%)	Moyenne \pm SE
Acrisols	2 482	12,96	20,34 \pm 38,46 ^c
Alisols	422	2,20	8,98 \pm 10,67 ^c
Cambisols	2 279	11,90	17,53 \pm 17,66 ^b
Lixisols	546	2,85	9,93 \pm 9,75 ^c
Plinthosols	13 427	70,09	67,81 \pm 90,4 ^a

Test de Kruskal-Wallis : $\chi^2 = 70,06$; p-value = $2,195 \times 10^{-14}$, significativité : ***

Les valeurs avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes

L'analyse de ce tableau indique que les feux de végétation se propagent essentiellement dans les plinthosols (70,09 %), les acrisols (12,96 %) et les cambisols (11,9 %). Le test de Kruskal Wallis révèle une hétérogénéité au niveau des 5 groupes de sols au seuil de 5 % ($\chi^2 = 70,06$; p-value = $2,195 \times 10^{-14}$). A la lumière des résultats du test U de Mann-Whitney, les foyers de feux se détectent majoritairement dans les plinthosols. Ce groupe de sols diffère significativement des autres groupes au seuil de 5 %. Les alisols (2,2 %) et lixisols (2,85 %) forment un groupe homogène au seuil de 5 %.

5.4.3. Evolution des feux en fonction des facteurs anthropogéniques

5.4.3.1. Accessibilité aux villes

L'influence de l'accessibilité aux villes (temps mis pour accéder au centre urbain le plus proche) sur la dynamique des feux a été évaluée d'un test Kruskal-Wallis (Tableau 5-20).

Tableau 5-20 : Evolution des feux en fonction de l'accessibilité aux villes

Classe	Accessibilité		Nombre de feux	
	Valeur (h)	Total	Proportion (%)	Moyenne \pm SE
Très facile	0–1	1 894	9,89	24,28 \pm 28,12 ^b
Facile	1–3	9 378	48,96	90,17 \pm 121,86 ^a
Difficile	3–10	7 438	38,83	70,84 \pm 90,23 ^a
Extrêmement difficile	10–24	446	2,33	7,82 \pm 9,28 ^c

Test de Kruskal-Wallis : $\chi^2 = 46,39255$; p-value = $4,679789 \times 10^{-10}$, significativité : ***

Les valeurs avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes

Source des classes : Nelson [251]

Les résultats de ce test montrent que l'accessibilité a une influence hautement significative sur les foyers de feu détectés ($\chi^2 = 46,39255$; p-value = $4,679789 \times 10^{-10}$). Le test de Mann-Whitney révèle que les types d'accessibilité qui ont le plus d'influence sur la dynamique des feux sont les accessibilités faciles (1-3 heures), occupant 48,98 % de cas, et les accessibilités difficiles (38,83 %). Ces accessibilités forment un groupe homogène et diffèrent significativement des accessibilités très facile (9,89 %) et extrêmement difficile (2,33 %) au seuil 5 %.

5.4.3.2. Distance des localités

L'influence de la proximité des localités sur l'éclosion des feux a été évaluée par le test de Kruskal-Wallis dont les résultats sont présentés par le Tableau 5-21.

Tableau 5-21 : Evolution des feux en fonction de la proximité aux localités

Classe	Proximité des localités		Nombre de feux	
	Valeur (km)	Total	Proportion (%)	Moyenne \pm SE
Très proche	0-1	2 174	11,35	25,28 \pm 31,22 ^b
Proche	1-5	13 514	70,55	121,75 \pm 168,77 ^a
Eloignée	5-10	2 549	13,31	29,99 \pm 40,44 ^b
Très éloignée	10-100	919	4,80	16,71 \pm 23,71 ^b

Test de Kruskal-Wallis : $\chi^2 = 30,36$; p-value = $1,159 \times 10^{-6}$, significativité : ***

Les valeurs avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes

Source des classes : Stolle *et al.* [245]

Le Tableau 5-21 montre les feux de végétation se déclarent dans les zones très proches (11,35 %), proches (70,55 %) et éloignées (13,31 %) des localités. Le test de Kruskal-Wallis

montre qu'il y a un effet significatif de la proximité des localités sur l'éclosion des feux ($\chi^2 = 30,36$; $p\text{-value} = 1,159 \times 10^{-6}$). Selon le test U de Mann-Whitney, les feux de végétation occurred majoritairement dans les zones proches (5-10 km) des localités (70,55 %). Les localités très proches, éloignées et très éloignées forment un groupe homogène et diffèrent des localités proches au seuil 5 %.

5.4.3.3. Distance du réseau routier et ferroviaire

L'impact de la proximité des routes et des voies ferrées sur l'occurrence des feux dans le bassin versant est présenté par le Tableau 5-22.

Tableau 5-22 : Evolution des feux en fonction de la distance au réseau routier

Proximité du réseau routier		Nombre de feux		
Classe	Valeur (km)	Total	Proportion (%)	Moyenne \pm SE
Très proche	0-1	5 445	28,42	57,93 \pm 77,1 ^a
Proche	1-5	9 867	51,51	88,1 \pm 121,88 ^a
Eloignée	5-10	2 325	12,14	25,83 \pm 29,76 ^b
Très éloignée	> 10	1 519	7,93	22,34 \pm 33,66 ^b

Test de Kruskal-Wallis : $\chi^2 = 17,501$; $p\text{-value} = 0,0005573$, significativité : ****

Les valeurs avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes

Source des classes : Stolle *et al.* [245]

L'analyse de ce tableau indique que le nombre de feux dénombré diffère en fonction de la proximité aux routes et voies ferrées ($\chi^2 = 17,501$; $p\text{-value} = 0,0005573$). Les départs de feu se sont réalisés dans les zones proches du réseau routier et ferroviaire (51,51 %). Le test U de Mann-Whitney regroupe les classes de proximité du réseau routier et ferroviaire en deux groupes. Les classes très proche et proche constituent un groupe homogène et diffèrent des classes éloignée et très éloignée au seuil de 5 %.

5.4.3.4. Densité de population

L'influence de la densité de population sur l'éclosion des feux est présentée par le Tableau 5-23.

Tableau 5-23 : Evolution des feux en fonction de la densité de population

Densité de population		Nombre de feux		
Classe	Valeur (hab./km ²)	Total	Proportion (%)	Moyenne \pm SE
Faible	0-25	8 177	42,69	81,77 \pm 114,42 ^a
Moyenne	25-75	9 177	47,91	87,4 \pm 121,31 ^a
Forte	> 75	1 802	9,41	24,03 \pm 26,72 ^b

Test de Kruskal-Wallis : $\chi^2 = 11,031$; $p\text{-value} = 0,004024$, significativité : **

Les valeurs avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes

Source des classes : Biswas *et al.* [239]

Le nombre de feux dénombré diffère en fonction de la densité de population ($\chi^2 = 11,031$; p-value = 0,004024). Les foyers de feu sont détectables majoritairement dans les zones à faible et moyenne densité de population. Ces deux classes forment un groupe homogène et diffèrent des zones fortement peuplées au seuil de 5 % selon le test U de Mann-Whitney.

5.5. MODELISATION ET PREVISION DE LA DYNAMIQUE DES FEUX

La présente section est consacrée à la modélisation et la prévision de l'activité des feux de végétation dans le bassin versant étudié à l'aide de la méthode de Box et Jenkins. Les différentes étapes de celle-ci peuvent se résumer comme suit.

5.5.1. Etude de la stationnarité

La stationnarité des séries est une hypothèse fondamentale dans la modélisation de type ARIMA/SARIMA. La stationnarité des séries pyrologiques a été examinée par les tests ADF et KPSS (Tableau 5-24).

Tableau 5-24 : Résumé des tests ADF et KPSS des séries pyrologiques

Localisation	Série	Test ADF		Test de KPSS	
		t-test	p-value	Statistique	Valeur critique 1 %
Zone forestière	NF	-2,7895717	0,2031184	0,0304	0,739
Zone préforestière	SB	-3,3899705	0,0559403	0,0173	0,739
Zone soudanaise	NF	-2,9570930	0,1474417	0,0138	0,739
Ensemble du BVN	SB	-3,2914537	0,0709726	0,0132	0,739
	NF	-2,9223064	0,1580014	0,0393	0,739
	SB	-3,2350660	0,0809677	0,0316	0,739
	NF	-2,4435438	0,3559694	0,0190	0,739
	SB	-3,3644165	0,0595628	0,0287	0,739

Le Tableau 5-24 montre que la statistique de test KPSS est beaucoup plus petite que la valeur critique de 1 %, ce qui indique que l'hypothèse de stationnarité est acceptée. En plus de ce test, la p-value du test ADF est supérieure à 5 % pour l'ensemble des écorégions du BVN, montrant la présence d'une racine unitaire. Ces deux résultats suggèrent que les variables pyrologiques étudiées sont toutes stationnaires.

5.5.2. Analyse des dépendances

Les autocorrélations des séries pyrologiques (occurrence des feux et surface brûlée) ont été présentées par les corrélogrammes d'autocorrélation (ACF) et d'autocorrélation partielle (PACF). La Figure 5-19 montre les résultats de l'ACF et de la PACF des séries temporelles de foyers de feux et de surfaces brûlées.

La variation des fonctions d'autocorrélation a confirmé l'évolution suspectée de la fonction d'autocorrélation dans tous les sites d'étude au regard des différents pics. Des corrélations fortes sont principalement observées par des décalages de périodes annuelles entières. Il est évident qu'une période dominante de 6 mois est présente dans toutes les écorégions.

Pour cette raison, une saisonnalité est suspectée, car les autocorrélations au voisinage des décalages d'ordre $k = 6, 12, 18$ ou 24 dépassent fortement l'intervalle de confiance à 95 %. Le pic important au délai 6 dans l'ACF suggère une composante de moyenne mobile non saisonnière d'ordre 1 et une composante autorégressive d'ordre 1. Les graphes présentent une saisonnalité de 12 mois pour les deux séries étudiées.

L'autocorrélation partielle a été calculée pour déterminer la périodicité. Le pic important aux délais 1 et 2 dans la PACF suggère une composante de moyenne mobile saisonnière d'ordre 1.

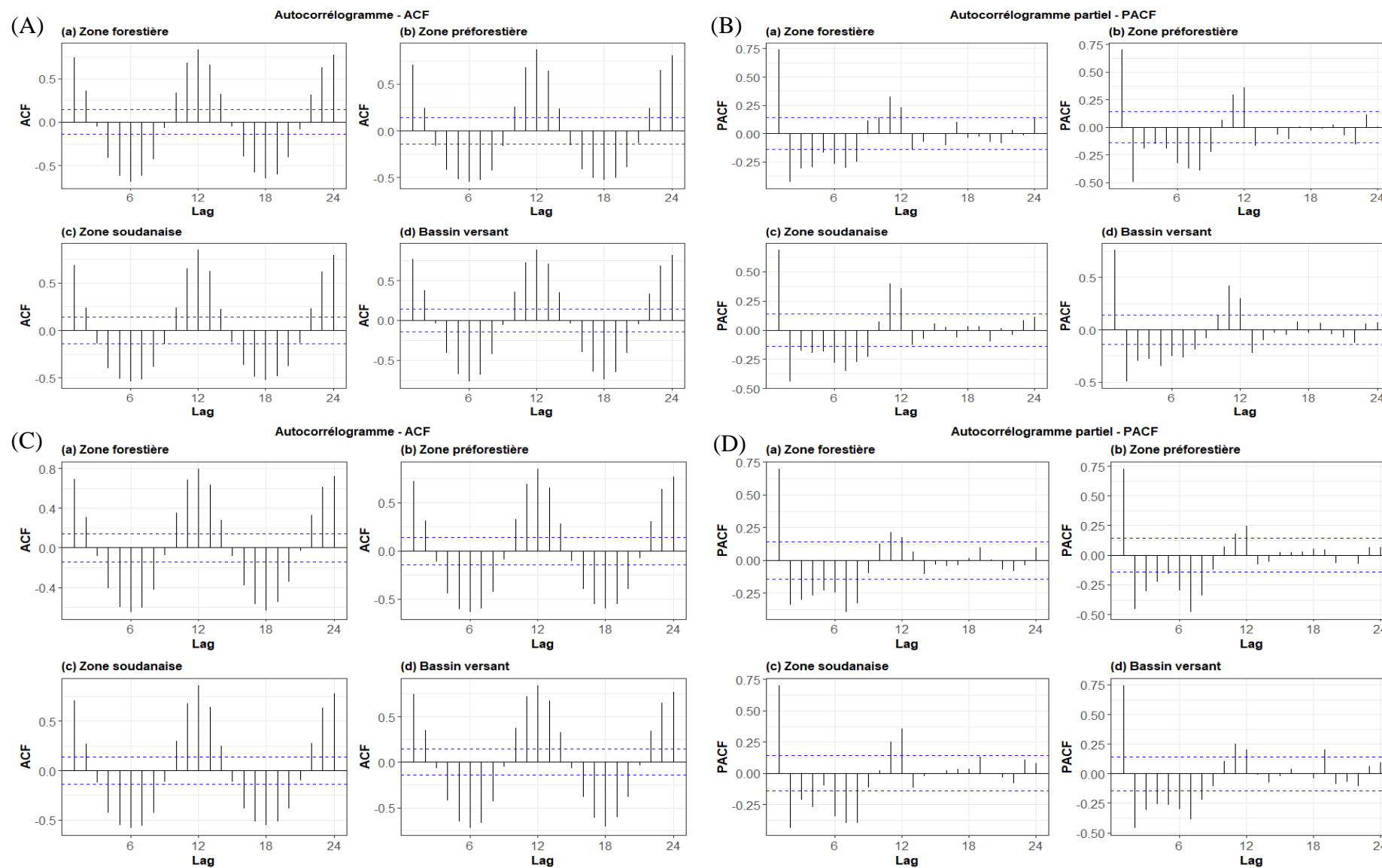


Figure 5-19 : Fonctions d'autocorrélation et d'autocorrélation partielle du nombre de feu (A, B) et des surfaces brûlées (C, D) par écorégion

5.5.3. Modélisation de la dynamique des feux de végétation

Les séries temporelles pyrologiques ont été modélisées à l'aide de modèles SARIMA issus d'algorithmes automatisés. Les meilleurs modèles sont sélectionnés sur la base de l'AICc le plus faible. Le résumé de la modélisation SARIMA des séries temporelles pyrologiques $\log(NF+1)$ et $\log(SB+1)$ dans les trois écorégions du bassin versant se trouvent dans le Tableau 5-25.

Tableau 5-25 : Résumé des modèles SARIMA des séries temporelles $\log(NF+1)$ et $\log(SB+1)$

Zone	Série	Ordre						S	Coefficient					AICc
		p	d	q	P	D	Q		AR ₁	SAR ₁	SAR ₂	MA ₁	SMA ₁	
Zone forestière	NF	1	0	1	0	1	1	12	0,6248 ***	–	–	-0,3271 ns	-0,8716 ***	385,69
	SB	0	0	0	2	1	1	12	–	-0,254 ns	-0,3337 *	–	-0,4946 *	747,44
Zone pré-forestière	NF	0	0	0	2	1	1	12	–	0,0036 ns	-0,2504 *	–	-0,8737 ***	730,92
	SB	1	0	0	2	1	0	12	0,1135 ns	-0,5715 ***	-0,5358 ***	–	–	694,71
Zone soudanaise	NF	0	0	1	2	1	0	12	–	-0,5581 ***	-0,1797 *	0,2183 **	–	407,56
	SB	0	0	1	2	1	0	12	–	-0,4984 ***	-0,4515 ***	0,1523 ns	–	684,03
Bassin versant	NF	0	0	1	0	1	1	12	–	–	–	0,1778 **	-0,8722 *	404,94
	SB	0	0	1	2	1	1	12	–	-0,4245 **	-0,4809 ***	0,113 ns	-0,3559 *	705,67

ns = non significatif ; * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$

Les variables pyrologiques n'ont pas présenté un ordre autorégressif non saisonnier excepté NF dans la zone forestière et SB dans la zone préforestière. Le nombre de processus AR saisonnier est évalué à 2 excepté NF dans la zone forestière et dans l'ensemble du BVN qui n'ont présenté aucun processus autorégressif saisonnier.

Le nombre maximal de processus à MA saisonnière et non saisonnière est de 1. La période identifiée pour les phénomènes étudiés est de 12 mois. L'ensemble des coefficients des modèles SARIMA ont été significatifs au seuil de 5 % à l'exception des coefficients MA₁ de SB dans la zone soudanaise et l'ensemble du BVN, de MA₁ de NF dans la zone forestière, de AR₁ de SB dans la zone préforestière, de SAR₁ de SB et NF dans la zone forestière et préforestière, respectivement.

5.5.4. Validation des modèles

Afin d'utiliser les résultats de la modélisation SARIMA pour la prévision des phénomènes étudiés, la validité des modèles a été testée à l'aide du test de Ljung-Box et l'analyse des résidus. Le Tableau 5-26 présente le résumé du test de Ljung-Box et les erreurs RMSE et MAE.

Tableau 5-26 : Analyse des résidus des séries pyrologiques par écorégion

Localisation	Série	Test de Ljung-Box			Erreurs	
		Modèle	Q*	p-value	RMSE	MAE
Zone forestière	NF	ARIMA(1,0,1)(0,1,1)[12]	19,82782	0,5321897	0,637494	0,4176823
	SB	ARIMA(0,0,0)(2,1,1)[12]	24,3558	0,2761402	1,690892	0,9353723
Zone préforestière	NF	ARIMA(0,0,0)(2,1,1)[12]	21,64852	0,4200006	0,5947548	0,3780547
	SB	ARIMA(1,0,0)(2,1,0)[12]	10,73463	0,9677086	1,534365	0,8072463
Zone soudanaise	NF	ARIMA(0,0,1)(2,1,0)[12]	16,43085	0,744976	0,702765	0,3987521
	SB	ARIMA(0,0,1)(2,1,1)[12]	18,10979	0,5801758	1,556561	0,8687491
Ensemble du bassin	NF	ARIMA(0,0,1)(0,1,1)[12]	20,48283	0,5528651	0,6765407	0,4529863
	SB	ARIMA(0,0,1)(2,1,1)[12]	18,10979	0,5801758	1,556561	0,8687491

Les résultats du test de Ljung-Box (ou test de portemanteau) ne sont pas significatifs (les p valeurs sont supérieurs à 5 %) (Tableau 5-26). Nous pouvons donc en conclure que les résidus ne se distinguent pas d'une série de bruit blanc.

Les résidus des modèles SARIMA de l'occurrence des feux et des surfaces brûlées sont présentés par les Figures 5-24 et 5-25.

Les graphiques ACF des résidus de l'ensemble des modèles SARIMA pour les variables pyrologiques étudiées montrent que toutes les autocorrélations se situent dans les limites du seuil, ce qui indique que les résidus se comportent comme un bruit blanc. Aussi, on note que les résidus des modèles SARIMA de l'occurrence des feux (Figure 5-20) et des surfaces brûlées (Figure 5-21) ont une variance constante et suivent une distribution normale comme le démontrent l'histogramme et le graphe des résidus. Le MAE et le RMSE restent proches de zéro ; ce qui présage une bonne qualité des modèles. En plus de ces tests, une comparaison visuelle des observations et des données ajustées par les modèles a été faite. Cette comparaison nous permet de constater que toutes les données historiques sont reproduites de manière très fidèle par les modèles, ce qui nous donne un degré de confiance élevé aux modèles.

Les graphes de comparaison des valeurs observées et simulées montrent que les pics saisonniers ont été régulièrement reproduits par les modèles à l'exception de quelques pics. Par conséquent, les modèles peuvent être utilisés pour effectuer des prévisions sur un horizon précis.

Les séries observées et simulées par les modèles SARIMA au sein des différentes écorégions pour l'occurrence des feux et des surfaces brûlées sont en Annexe 11 et 12.

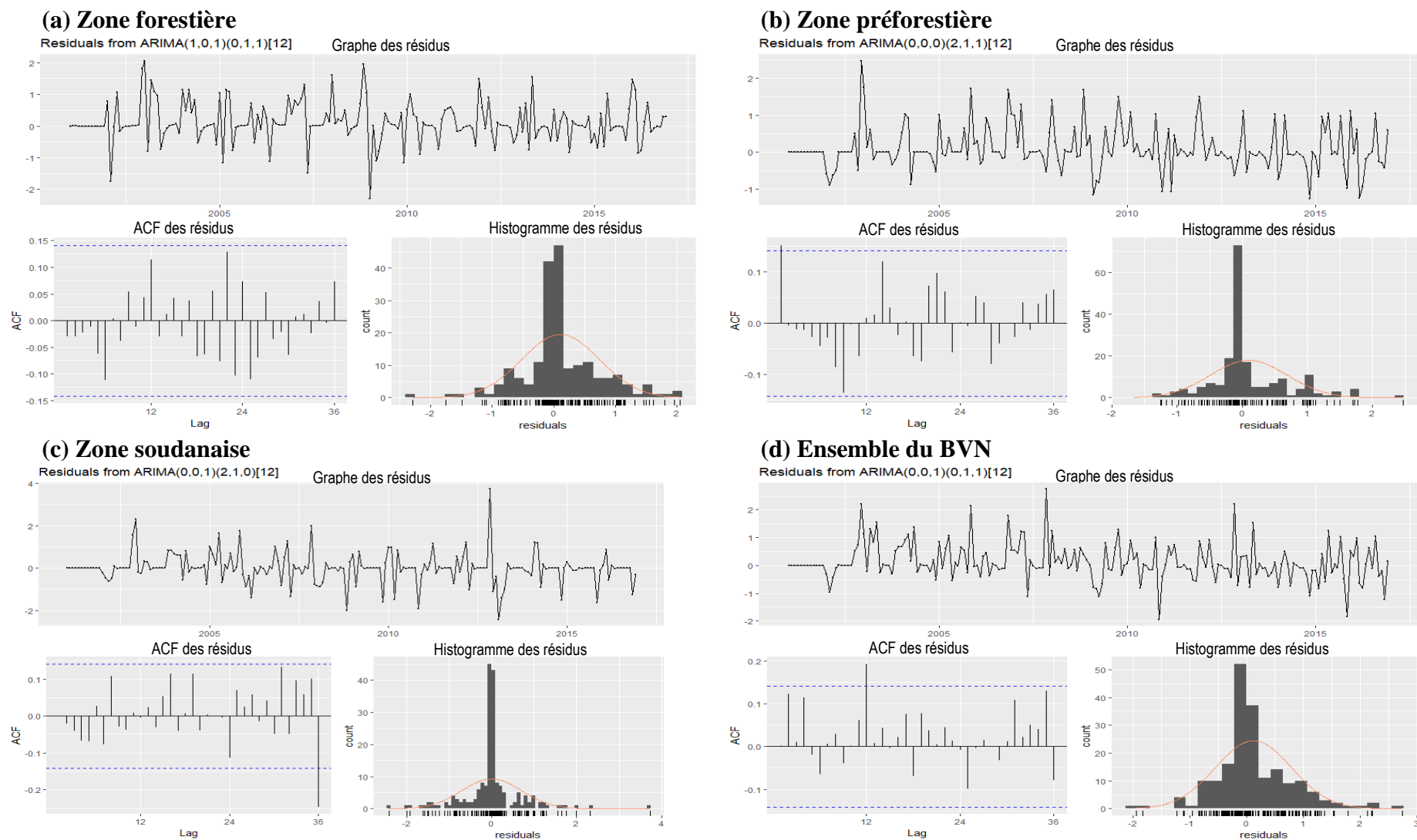


Figure 5-20 : Résidus des modélisations de l'occurrence des feux par SARIMA dans (a) la zone forestière, (b) la zone préforestière, (c) la zone soudanaise et (d) l'ensemble du BVN

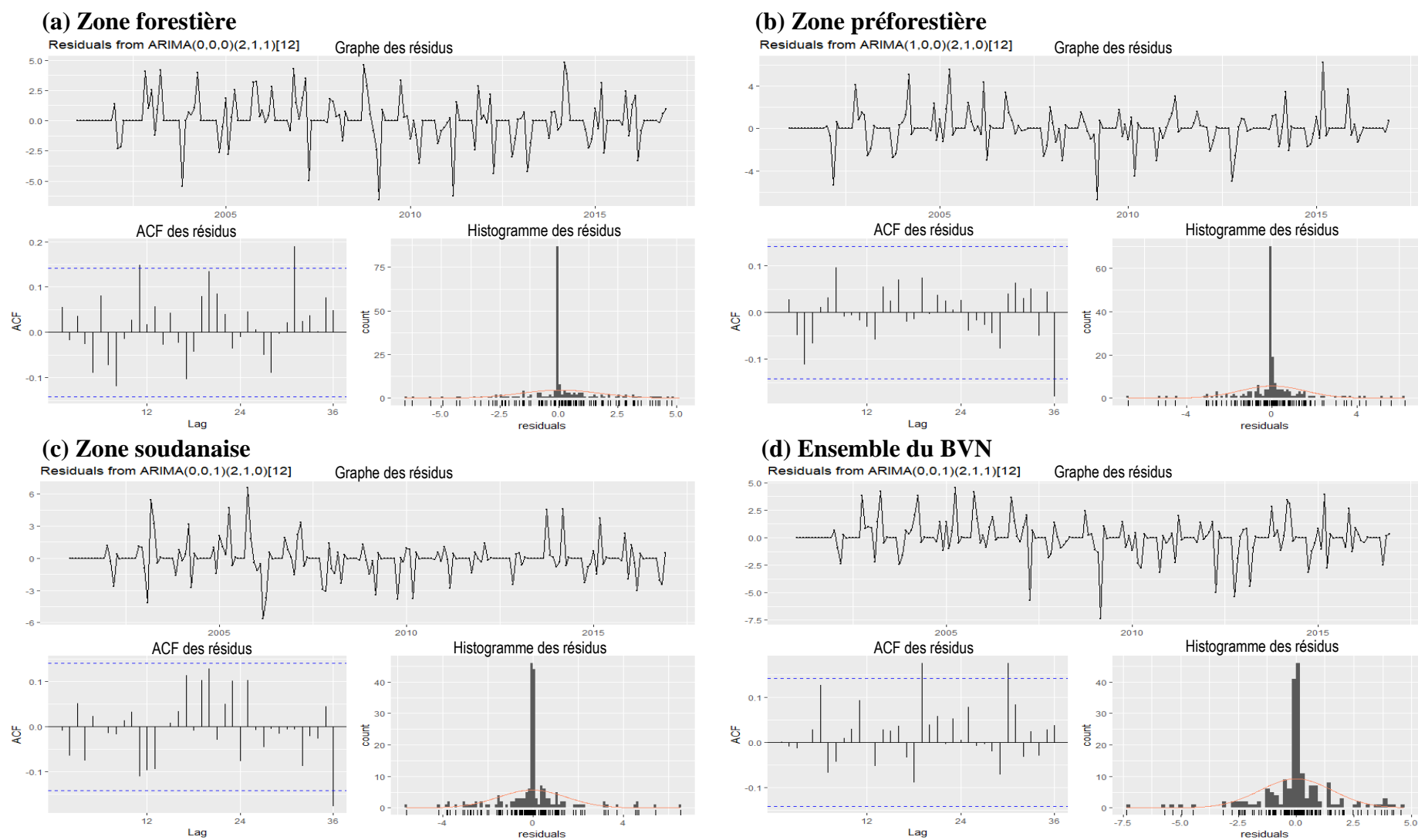


Figure 5-21 : Résidus des modélisations des surfaces brûlées par SARIMA dans (a) la zone forestière, (b) la zone préforestière, (c) la zone soudanaise et (d) l'ensemble du BVN

5.5.5. Prédiction de la dynamique des feux de végétation

Les modèles SARIMA validés à l'aide de la méthode de Box et Jenkins ont été utilisés pour la prévision mensuelle du nombre de feux de végétation et des surfaces brûlées sur un horizon de 4 ans. La Figure 5-22 présente les résultats des prévisions du nombre de feux de végétation à intervalle de 95 % de 2017 à 2020.

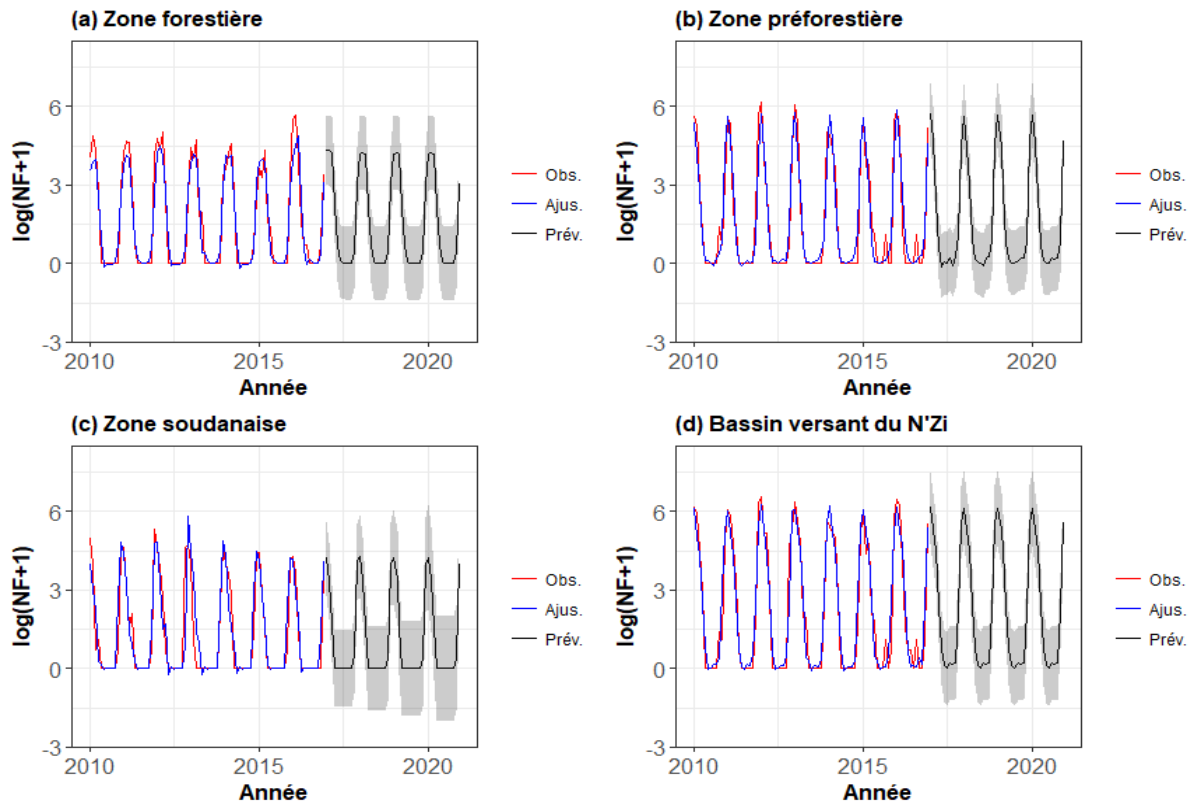


Figure 5-22 : Prédiction SARIMA de l'occurrence des feux dans (a) la zone forestière, (b) la zone préforestière, (c) la zone soudanaise et (d) l'ensemble du BVN

La Figure 5-22 montre que les valeurs de foyers de feux simulées suivent les tendances passées des logarithmes des variables pyrologiques dans l'ensemble des écorégions. Les pics prédits sont relativement constants d'une zone à une autre. Au niveau de la zone forestière, les pics les plus hauts sont proches de 4 dans les zones forestière et soudanaise tandis qu'ils dépassent largement 5 au niveau de la zone préforestière et l'ensemble du BVN. Les pics les plus bas sont tous proches de 0 dans l'ensemble des écorégions. Les intervalles de confiance sont restés constants sauf dans la zone soudanaise où l'on note une croissance de l'intervalle de prévision. Les prévisions des valeurs logarithmiques du nombre de feux [$\log(\text{NF}+1)$] dans les différentes écorégions du BVN à l'aide des modèles ARIMA de 2017 à 2020 sont présentées en Annexes 14 à 17. Au niveau de l'ensemble du BVN, ces prévisions sont estimées à 6,15 (soit 467 feux)

pour le mois de janvier 2017 et 5,3 (soit 200 feux) pour le mois de février 2017. Pour l'année 2017, les prévisions de foyers de feux sont évaluées à 1042 feux sur l'ensemble du BVN.

Au niveau des surfaces brûlées, les résultats des prévisions à intervalle de 95 % dans les différentes écorégions du BVN sont présentés par la Figure 5-23.

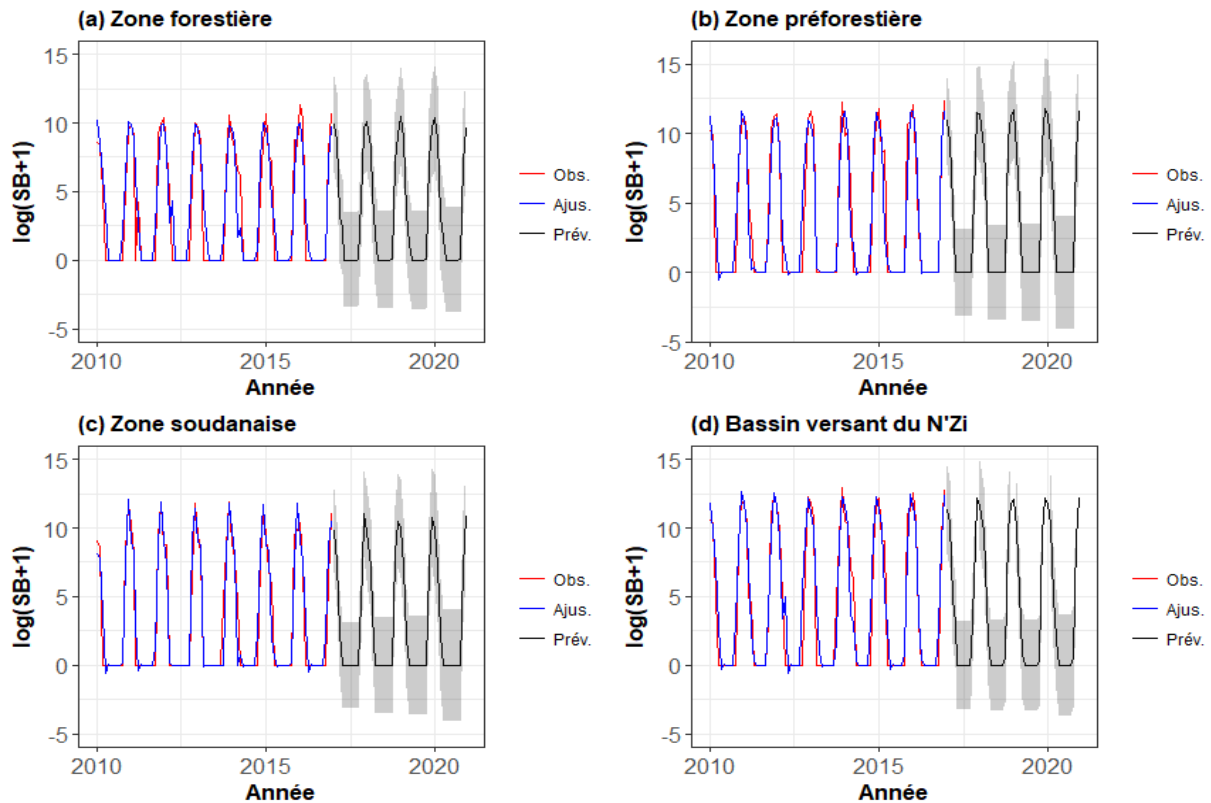


Figure 5-23 : Prédiction SARIMA des surfaces brûlées dans (a) la zone forestière, (b) la zone préforestière, (c) la zone soudanaise et (d) l'ensemble du BVN

La Figure 5-22 montre que les valeurs logarithmiques des surfaces brûlées suivent parfaitement l'allure générale des valeurs antérieures sur l'ensemble des écorégions du BVN. Au niveau de la zone forestière, les pics les plus hauts sont proches de 10 dans les zones forestière et soudanaise, tandis qu'ils dépassent largement 11 au niveau de la zone préforestière et l'ensemble du BVN. Les valeurs prédites les plus basses sont toutes proches de 0 dans l'ensemble des écorégions. Cependant, il faut noter que l'intervalle de prévision croît légèrement au niveau de la zone soudanaise et de la zone forestière. Ces intervalles de prévision sont faibles pendant la saison sèche (décembre à février).

Les prévisions des valeurs logarithmiques des surfaces brûlées [$\log(SB+1)$] dans les différentes écorégions du BVN sont présentées en Annexes 14 à 17. Au niveau de l'ensemble du BVN, ces prévisions sont estimées à 11,34 km² (soit 84 197,3 km²) et 10,33 km² (soit 30 907,9 km²) pour les mois de janvier et février 2017, respectivement. Pour l'année 2017, les prévisions de surfaces brûlées s'estiment à 325 137,31 km² sur l'ensemble du BVN.

5.6. PERCEPTIONS ET STRATEGIES D'ADAPTATION DES POPULATIONS LOCALES

Cette section présente des perceptions des agriculteurs de la variabilité climatique et pyrologique dans le bassin étudié.

5.6.1. Description de l'échantillon enquêté

L'enquête a permis de collecter des données sur 259 agriculteurs de trois localités situées dans les trois zones phytogéographiques de la zone d'étude. Les caractéristiques sociales des répondants sont résumées dans le Tableau 5-27.

Tableau 5-27 : Caractéristiques sociales de la population enquêtée par localité

Localité	Pacobo		Abigui		Arikokaha		Ensemble		Test de χ^2 (p-value)
	Effectif	%	Effectif	%	Effectif	%	Effectif	%	
Total	86	33,20	85	32,82	88	33,98	259	100	-
Sexe									
Féminin	7	8,14	27	31,76	13	14,77	47	18,15	0,000195
Masculin	79	91,86	58	68,24	75	85,23	212	81,85	
Age									
18-30 ans	11	12,79	0	0	14	16,09	25	9,77	0,0004627
30-60 ans	67	77,91	63	75,9	54	62,07	184	71,88	
60-90 ans	8	9,3	20	24,1	19	21,84	47	18,36	
Statut originel									
Allochtone	17	19,77	2	2,35	2	2,27	21	8,11	2,316×10 ⁻⁷
Allogène	7	8,14	1	1,18	0	0	8	3,09	
Autochtone	62	72,09	82	96,47	86	97,73	230	88,8	
Statut matrimonial									
Célibataire	10	11,63	2	2,35	17	19,32	29	11,2	1,938×10 ⁻⁵
Marié	71	82,56	83	97,65	60	68,18	214	82,63	
Divorcé	4	4,65	0	0	3	3,41	7	2,7	
Veuf	1	1,16	0	0	8	9,09	9	3,47	
Niveau d'étude									
Aucun	51	60	38	43,18	24	27,91	113	43,63	0,0002409
Primaire	22	25,88	37	42,05	33	38,37	92	35,52	
Secondaire	12	14,12	12	13,64	25	29,07	49	18,92	
Universitaire	0	0	1	1,14	4	4,65	5	1,93	
Religion pratiquée									
Aucune	9	10,47	50	58,82	15	17,05	74	28,57	9,987×10 ⁻¹⁴
Animiste	0	0	5	5,88	2	2,27	7	2,7	
Chrétien	61	70,93	24	28,24	52	59,09	137	52,9	
Musulman	9	10,47	3	3,53	18	20,45	30	11,58	
Autres	7	8,14	3	3,53	1	1,14	11	4,25	

Source : Enquête

Sur les 259 agriculteurs enquêtés, 33,2 % proviennent de la localité Pacobo dans la zone forestière, 32,82 % de celle d'Abigui dans la zone préforestière et 33,98 % de la localité d'Arikokaha dans la zone soudanaise. En effet, il résulte des personnes enquêtées une équipollence dans chaque localité. Par ailleurs, cette équivalence proportionnelle met en exergue que les hommes sont les plus enquêtés à hauteur de 81,85 % par rapport aux femmes (18,15 %). De plus, les personnes enquêtées ont une tranche d'âge comprise entre 22 et 84 ans avec une moyenne de 48 ans. Par conséquent, la population enquêtée est majoritairement adulte (71,88 %) et autochtone (88,8 %). La majorité des personnes interrogées sont mariées (82,63 %). Ces agriculteurs sont essentiellement non scolarisés (43,63 %) ou ont que le niveau élémentaire (35,52 %). Enfin, les agriculteurs enquêtés sont chrétiens (52,9 %), musulmans (11,58 %) ou ne pratiquent pas de religion (28,57 %).

On note une différence significative entre les caractéristiques sociales des agriculteurs en fonction des localités enquêtées.

5.6.2. Perceptions des agriculteurs

5.6.2.1. Variabilité climatique

Les perceptions des agriculteurs de l'évolution des paramètres climatiques dans la zone d'étude sont présentées dans le Tableau 5-28.

Les résultats montrent que le début de la saison pluvieuse dans ces localités connaît un retard des plus accentués (90,8 % des réponses). De plus, 98,84 % des agriculteurs pensent que sa durée est réduite par rapport aux années antérieures. Cette observation a entraîné une diminution du nombre de jours pluvieux selon 98,46 % des agriculteurs. En outre, 99,61 % de la population enquêtée trouve que le début de la saison sèche est précoce. Avec une durée plus longue de la saison sèche (98,84 % des réponses), les personnes enquêtées sont unanimes sur l'augmentation de l'intensité de la chaleur et des poches de sécheresse.

Le test de χ^2 montre qu'il existe une différence significative entre les perceptions des agriculteurs du début et la durée de la saison pluvieuse et l'évolution de la quantité de pluies tombées en fonction des localités. Cependant, les perceptions sur l'évolution du nombre de jours pluvieux, le début de la saison sèche, l'intensité de la chaleur et l'existence de poches de sécheresse ne diffèrent pas en fonction des zones phytogéographiques.

Tableau 5-28 : Perceptions de l'évolution des paramètres climatiques

Localité	Abigui		Arikokaha		Pacobo		Ensemble		Test de χ^2 (p-value)
	Effectif	%	Effectif	%	Effectif	%	Effectif	%	
Début de la saison pluvieuse									
Précoce	0	0	0	0	5	5,81	5	1,93	0,005928
Tardif	85	100	88	100	81	94,19	254	98,07	
Total	85	100	88	100	86	100	259	100	
Durée de la saison pluvieuse									
Plus courte	85	100	88	100	83	96,51	256	98,84	0,04723
Plus longue	0	0	0	0	3	3,49	3	1,16	
Total	85	100	88	100	86	100	259	100	
Evolution du nombre de jours pluvieux									
Augmenté	0	0	0	0	1	1,16	1	0,39	0,246
Diminué	85	100	85	96,59	85	98,84	255	98,46	
Ne sait pas	0	0	1	1,14	0	0	1	0,39	
Stable	0	0	2	2,27	0	0	2	0,77	
Total	85	100	88	100	86	100	259	100	
Evolution de la quantité de pluies tombées									
Augmenté	0	0	0	0	3	3,49	3	1,16	5,365×10 ⁻⁷
Diminué	84	98,82	70	79,55	83	96,51	237	91,51	
Ne sait pas	0	0	6	6,82	0	0	6	2,32	
Stable	1	1,18	12	13,64	0	0	13	5,02	
Total	85	100	88	100	86	100	259	100	
Début de la saison sèche									
Précoce	84	98,82	88	100	86	100	258	99,61	0,3579
Tardif	1	1,18	0	0	0	0	1	0,39	
Total	85	100	88	100	86	100	259	100	
Durée de la saison sèche									
Plus courte	1	1,18	0	0	1	1,16	2	0,77	0,5953
Plus longue	84	98,82	88	100	85	98,84	257	99,23	
Total	85	100	88	100	86	100	259	100	
Intensité de la chaleur									
Augmenté	85	100	88	100	86	100	259	100	0,9733
Diminué	0	0	0	0	0	0	0	0	
Total	85	100	88	100	86	100	259	100	
Existence de poches de sécheresse									
Augmenté	85	100	88	100	84	97,67	259	99,23	0,1317
Diminué	0	0	0	0	2	2,33	0	0,77	
Total	85	100	88	100	86	100	259	100	

Source : Enquête

L'accélération des changements climatiques est occasionnée par plusieurs facteurs qui entraînent l'augmentation de la concentration de GES dans l'atmosphère. Les perceptions des causes de l'évolution du climat sont présentées par le Tableau 5-29.

Tableau 5-29 : Perceptions des causes de l'évolution du climat

Causes évoquées	Proportion (%)			
	Abigui	Arikokaha	Pacobo	Ensemble
Déboisement abusif des forêts	92,94	63,64	74,42	76,83
Variations naturelles du climat	98,82	37,5	17,44	50,97
Feux de brousse	34,12	17,05	43,02	31,27
Non-respect des normes sociales	0	1,14	32,56	11,2
Volonté divine	0	2,27	27,91	10,04
Augmentation des surfaces cultivées	7,06	3,41	12,79	7,72
Non-respect des divinités	0	2,27	6,98	3,09
Transhumance	0	9,09	0	3,09
Ne sait pas	0	15,91	1,16	5,79
Autres	0	5,68	8,14	4,63

Source : Enquête

Le Tableau 5-29 souligne que les principales causes de l'évolution du climat observée ces dernières décennies sont le déboisement abusif des forêts (76,83 %), les variations naturelles du climat (50,93 %) et les feux de brousse (31,27 %). Un faible pourcentage d'agriculteurs attribue les causes de péjoration du climat au non-respect des normes et croyances locales. De plus, 10,04 % des agriculteurs pensent que le changement climatique observé est une volonté divine.

5.6.2.2. Dynamique des feux de végétation

Les perceptions des agriculteurs de l'évolution des feux de végétation dans la zone d'étude sont présentées dans le Tableau 5-30. Les résultats montrent que les agriculteurs ont expérimenté dans leur grande majorité (92,66 %) des feux de brousse dans le bassin étudié durant ces 15 dernières années. Le nombre de ces incendies a augmenté au cours des 15 dernières années selon 78,75 % des agriculteurs enquêtés. Cependant, 15,42 % de la population pensent que ce phénomène a reculé dans la zone d'étude. Ces enquêtés notant une diminution des feux se trouvent principalement dans la localité d'Arikokaha, dans la zone soudanaise.

Relativement à l'intensité des feux, la grande partie des agriculteurs (63,33 %) pense les feux de brousse sont récurrents et violents dans le BVN. Par contre, 32,92 % des interviewés pensent que les feux sont rares et violents.

Au niveau de la fréquence des feux de végétation, 60,42 % des agriculteurs enquêtés pensent que les feux de brousse ocurrent une fois par an dans les localités enquêtées. Toutefois, certains agriculteurs affirment que les feux ocurrent deux fois par an (19,58 %) ou trois fois par an (1,25 %). Par contre, d'autres agriculteurs (18,75 %) n'ont pas pu évaluer la fréquence des feux dans les localités enquêtées.

Tableau 5-30 : Perceptions de l'évolution des feux de végétation

Localité	Abigui		Arikokaha		Pacobo		Ensemble	
	Effectif	%	Effectif	%	Effectif	%	Effectif	%
Présence ou activité de feux de brousse								
Non	0	0	10	11,36	9	10,47	19	7,34
Oui	85	100	78	88,64	77	89,53	240	92,66
Total	85	100	88	100	86	100	259	100
Evolution du nombre de feux de brousse								
Augmenté	84	98,82	29	37,18	76	98,7	189	78,75
Diminué	1	1,18	35	44,87	1	1,3	37	15,42
Ne sait pas	0	0	5	6,41	0	0	5	2,08
Stable	0	0	9	11,54	0	0	9	3,75
Total	85	100	78	100	77	100	240	100
Récurrence et intensité des feux de brousse								
Ne sait pas	0	0	2	2,56	0	0	2	0,83
Pas de changement	1	1,18	1	1,28	0	0	2	0,83
Rare et faible	0	0	1	1,28	0	0	1	0,42
Rare et violent	1	1,18	2	2,56	76	98,7	79	32,92
Récurrent et faible	3	3,53	1	1,28	0	0	4	1,67
Récurrent et violent	80	94,12	71	91,03	1	1,3	152	63,33
Total	85	100	78	100	77	100	240	100
Fréquence des feux de brousse								
Ne sait pas	0	0	6	7,69	39	50,65	45	18,75
Une fois par an	82	96,47	63	80,77	0	0	145	60,42
Deux fois par an	2	2,35	9	11,54	36	46,75	47	19,58
Trois fois par an	1	1,18	0	0	2	2,6	3	1,25
Total	85	100	78	100	77	100	240	100

Source : Enquête

Les causes assignées par les agriculteurs à ces feux de brousse sont diverses et principalement d'origine anthropique (Tableau 5-31).

Tableau 5-31 : Perceptions des causes des feux de brousse

Causes des feux de brousse	Proportion (%)			
	Abigui	Arikokaha	Pacobo	Ensemble
Chasse	90,59	17,95	87,01	65,83
Préparation des parcelles agricoles	84,71	2,56	59,74	50
Réalisation des pare-feu	67,06	55,13	15,58	46,67
Sabotage ou revanche	1,18	51,28	40,26	30
Fabrication de charbon de bois	48,24	5,13	11,69	22,5
Cuisson au champ	42,35	0	3,9	16,25
Jet des mégots incandescents (fumeurs)	0	1,28	31,17	10,42
Extraction du vin de palme	2,35	0	28,57	10
Brûlis des résidus des récoltes	1,18	1,28	7,79	3,33
Renouvellement de pâturage	0	5,13	0	1,67
Ne sait pas	0	5,13	0	1,67
Autres	0	37,18	5,19	13,75

Les résultats montrent que les principales causes des feux de brousse sont la chasse (65,83 %), la préparation des parcelles agricoles (50 %), la réalisation des pare-feu (46,67 %), les actes de sabotage ou de revanche (30 %), la fabrication de charbon de bois (22,5 %), la cuisson au champ (16,25 %), le jet des mégots incandescents (10,42 %) et l'extraction du vin de palme (10 %). Ces deux dernières causes sont majoritairement observées à Pacobo, dans la zone forestière.

5.6.3. Impacts de la variabilité climatique et des feux de végétation

5.6.3.1. Impact du changement et de la variabilité climatiques

5.6.3.1.1. Impacts sur les cultures

Les impacts des changements climatiques sur les cultures sont présentés par le Tableau 5-32.

Tableau 5-32 : Impacts du changement climatique sur les cultures

Impacts	Proportion (%)			
	Abigui	Arikokaha	Pacobo	Ensemble
Mort des jeunes plants	95,29	94,32	88,37	92,66
Mauvaise croissance des cultures	89,41	37,5	52,33	59,46
Pertes à la récolte	2,35	3,41	55,81	20,46
Mort des pieds de cultures	3,53	2,27	33,72	13,13
Roussissement des cultures	0	0	32,56	10,81
Immaturation des cultures	8,24	12,5	9,3	10,04
Pourrissement des épis et fruits	0	1,14	10,47	3,86
Perte / destruction des semis et des cultures	1,18	0	9,3	3,47
Bouleversement du calendrier agricole	1,18	0	9,3	3,47
Mauvaise qualité des produits récoltés	1,18	3,41	3,49	2,7
Casse / destruction des tiges et feuilles	0	0	4,65	1,54
Attaque des insectes (chenilles, termites ...)	0	0	4,65	1,54
Apparition de certaines maladies	0	1,14	2,33	1,16
Verse des cultures	0	0	1,16	0,39
Pertes au stockage	0	0	1,16	0,39
Autres	0	0	3,49	1,16

Source : Enquête

Nos résultats montrent que les principaux impacts du changement climatique sur les cultures sont la mort des jeunes plants (92,66 %), la mauvaise croissance des cultures (59,46 %), les pertes à la récolte (20,46 %), la mort de certains pieds de cultures (13,13 %), le roussissement des cultures (10,81 %), et l'immaturation des cultures (10,04 %). Ces observations impactent négativement le rendement des cultures et la sécurité alimentaire.

5.6.3.1.2. Impacts sur les hommes et les aménagements humains

Les impacts du changement climatique sur les hommes et les aménagements humains sont consignés dans le Tableau 5-33.

Tableau 5-33 : Impacts du changement climatique sur les hommes et leurs aménagements

Impacts évoqués	Proportion (%)			
	Abigui	Arikokaha	Pacobo	Ensemble
Diminution du revenu du ménage	94,12	0	98,84	63,71
Décoiffement des toitures des habitations	21,18	25	95,35	47,10
Raréfaction des points d'eau	1,18	48,86	67,44	39,38
Apparition de nouvelles maladies	32,94	54,55	4,65	30,89
Eloignement des sources d'approvisionnement en eau	2,35	12,5	60,47	25,10
Mauvaise qualité des eaux	0	6,82	59,30	22,01
Recrudescence de certaines maladies	14,12	7,95	26,74	16,22
Ne sait pas	1,18	7,95	1,16	3,47
Augmentation du revenu du ménage*	2,35	6,82	0	3,09
Démolissage des murs des maisons	1,18	1,14	5,81	2,70
Autres	0	6,82	0	2,32

* effet bénéfique

L'analyse de ce tableau montre les impacts majeurs du changement climatique sur les hommes et les aménagements humains sont principalement la diminution du revenu du ménage (63,71 %), le décoiffement des toitures (47,1 %), la raréfaction des points d'approvisionnement en eau (39,38 %), l'apparition de nouvelles maladies (30,89 %), l'éloignement des sources d'approvisionnement en eau (25,1 %), la mauvaise qualité des eaux (22,01 %) et la recrudescence de certaines maladies (16,22 %). Cependant, un faible nombre d'enquêtés (3,09 %) ont noté une augmentation du revenu des ménages.

5.6.3.2. Impacts des feux de végétation

Dans le BVN, 64,58 % des interlocuteurs déclarent avoir été affecté au niveau agricole par les feux de brousse durant les 15 dernières années. Les impacts des feux de végétation sur les cultures sont multiples (Tableau 5-34).

Tableau 5-34 : Impacts des feux de végétation sur les cultures

Impacts évoqués	Proportion (%)			
	Abigui	Arikokaha	Pacobo	Ensemble
Mort immédiate des cultures	84,71	47,73	95,35	75,68
Retard de croissance des cultures	81,18	71,59	73,26	75,29
Destruction des récoltes	52,94	17,05	95,35	54,83
Ne sait pas	0	26,14	0	8,88
Autres	0	3,41	2,33	1,93

Nos résultats montrent que les impacts majeurs des feux de végétation sur les cultures sont la mort immédiate des cultures (75,68 %), le retard de croissance des cultures (75,29 %) et la destruction des récoltes (54,83 %).

Seulement, 2,5 % de la population a déclaré avoir été affecté par les feux de brousse au niveau des aménagements et habitations. Les dégâts subis sont la destruction de biens matériels (habitations et autres biens matériels) et les pertes en vie humaine.

Face aux impacts du changement climatique et des feux de végétation, les agriculteurs suggèrent avoir des rencontres de sensibilisation incluant les autorités ou communautés villageoises (83,01 %) et des campagnes de sensibilisation avec l'administration forestière (77,61 %).

5.6.4. Stratégies d'adaptation des agriculteurs

5.6.4.1. Stratégies face aux impacts du changement climatique

5.6.4.1.1. Stratégies face aux impacts sur les cultures

Dans le contexte du changement climatique, les agriculteurs adoptent des stratégies d'adaptation en fonction des différents impacts climatiques perçus sur les cultures (Tableau 5-35).

Les différentes stratégies d'adaptation adoptées pour faire face à la mort des jeunes plants sont la reprise du semis et du planting (96,94 %), l'arrachage des plants (6,56 %) et la pratique de l'association de cultures (4,25 %). En effet, en juxtaposant plusieurs espèces de plantes, certaines cultures peuvent être bénéfiques à d'autres en fournissant divers services (ombrage, fertilisation, contrôle des nuisibles, etc.). De plus, cette pratique permet de minimiser le risque d'une mauvaise récolte, situation désastreuse en cas de culture d'une seule espèce.

Les populations interrogées qui ont observé un roussissement des cultures telles que les céréales (riz, maïs, etc.) et les légumes (tomates, etc.) témoignent ne rien faire pour répondre à ces impacts négatifs (95,3 % à Abigui, 88,6 % à Arikokaha et 90,7 % à Pacobo). Elles déclarent par contre utiliser des produits phytosanitaires (57,9 %) ou se confier à Dieu (42,5 %) pour lutter contre la perte de récolte.

De plus, la mauvaise croissance des cultures conduit inévitablement à la reprise du semis ou du planting selon 48,65 % des interviewés. Pour l'immaturation des cultures, 44 % des répondants déclarent ne mener aucune action. D'autres, par contre, récoltent très tôt dès le début du processus de mûrissement des cultures (19,7 %) ou pratiquent l'association de cultures (19,3 %).

Parmi les répondants ayant constaté le pourrissement des épis et des fruits, 56,8 % (dont 52,9 % à Abigui, 64,8 % à Arikokaha et 52,3 % à Pacobo) disent ne rien faire.

Pour lutter contre les pertes enregistrées lors du stockage des productions, la majorité des répondants (64,9 %) affirment modifier les pratiques de conservation des produits agricoles

(utilisation de greniers, claies, etc.) ou ne mener aucune action pour faire face à cette contrainte (32,8 %).

Tableau 5-35 : Stratégies d'adaptation développées face aux impacts climatiques sur les cultures

Impacts perçus	Stratégies adoptées	Proportion (%)			
		Abigui	Arikokaha	Pacobo	Ensemble
Mort des jeunes plants	Reprendre le semis et le planting	97,65	95,45	97,67	96,94
	Déterrer les plants morts	1,18	0	18,6	6,56
	Pratiquer l'association de cultures	7,06	5,68	0	4,25
Mauvaise croissance des cultures	Reprendre le semis et le planting	91,76	47,73	6,98	48,65
	Ne rien faire	0	14,77	75,58	30,12
	Pratiquer l'association de cultures	9,41	26,14	0	11,97
	Application d'engrais chimique	0	3,41	15,12	6,18
Perte à la récolte	Utiliser les produits phytosanitaires	63,53	26,14	84,88	57,92
	Se remettre à Dieu / Prière	52,94	73,86	0	42,47
	Ne rien faire	14,12	20,45	89,53	41,31
Roussissement des cultures	Ne rien faire	95,29	88,64	90,7	91,51
	Ne rien faire	5,88	31,82	94,19	44,02
Immaturation des cultures	Récolter dès le début du mûrissement	56,47	0	3,49	19,69
	Pratiquer l'association de cultures	17,65	39,77	0	19,31
	Modifier les pratiques de conservation des produits agricoles	98,82	89,77	5,81	64,86
Perte au stockage	Ne rien faire	0	4,55	94,19	32,82
	Ne rien faire	52,94	64,77	52,33	56,76
Pourrissement des épis et fruits	Récolter des fruits détruits	4,71	11,36	27,91	14,67
	Détruire les cultures malades	21,18	12,5	0	11,2

5.6.4.1.2. Stratégies face aux impacts sur les hommes et les aménagements humains

Dans le BVN, les populations ont développé des stratégies pour s'adapter aux effets du changement climatique sur les hommes et leur habitat (Tableau 5-36).

Tableau 5-36 : Stratégies d'adaptation développées face aux impacts du changement climatique sur les hommes et leur habitat

Impacts perçus	Stratégies adoptées	Proportion (%)			
		Abigui	Arikokaha	Pacobo	Ensemble
Décoiffement des toitures des habitations	Renforcer les matériaux de construction et les supports des bâtiments	16,47	18,18	98,84	44,4
Démolissage des murs des habitations	Renforcer les matériaux de construction et les supports des bâtiments	19,63	21,8	90,31	43,91
	Réaliser des drains	12,37	16,32	45,63	24,77
Apparition de nouvelles maladies	Se rendre à l'hôpital	22,35	19,32	0	13,9
	Se soigner à l'indigénat	11,76	7,95	0	6,56
Recrudescence de certaines maladies	Se rendre à l'hôpital	29,21	15,69	23,12	22,67
	Se soigner à l'indigénat	13,68	9,32	12,47	11,82
Raréfaction et éloignement des points d'eau	Aller chercher l'eau ailleurs à moto ou à vélo dans des récipients	0	19,32	0	6,56
	Recueillir de l'eau tôt le matin à la pompe ou au marigot	0	23,86	0	8,11
	Réaliser des aménagements pour rétention de l'eau	0	2,27	0	0,77
Diminution du revenu	Ne rien faire	52,94	28,41	0	27,03
	Autres	15,29	7,95	1,16	8,11
Mauvaise qualité des eaux	Ne rien faire	56,3	19,67	16,42	30,79

Les agriculteurs développent des stratégies pour faire face aux aléas climatiques. Les personnes interviewées affirment renforcer les matériaux de construction et les supports des bâtiments pour lutter contre les vents violents et les pluies torrentielles qui occasionnent le décoiffement des maisons (44,4 %) ou le démolissage des murs des maisons (43,91 %). De plus, 24,77 % des agriculteurs réalisent des drains pour éviter le démolissage des murs ou la dégradation des fondations des maisons. Certains enquêtés affirment se rendre régulièrement à l'hôpital ou se soigner à l'indigénat pour faire face à l'apparition et à la recrudescence de maladies (fièvre typhoïde, paludisme, diarrhée, etc.). Contre la pénurie d'eau, les répondants d'Arikokaha affirment recueillir de l'eau tôt le matin à la pompe ou au marigot (23,9 %) ou collecter l'eau ailleurs à moto ou à vélo dans des récipients (19,3 %). De plus, 8,1 % des répondants déclarent mettre en place des aménagements pour la rétention de l'eau.

Les agriculteurs avouent ne rien faire relativement à la diminution des revenus du ménage (27,03 %) et à la mauvaise qualité des eaux (30,79 %) observées dans la zone d'étude.

5.6.4.2. Stratégies face aux impacts des feux de végétation

Les populations locales mènent des actions pour atténuer, prévenir ou réduire l'impact des feux de végétation qui ocurrent dans leur environnement. Le Tableau 5-37 présente les stratégies de prévention développées par les agriculteurs face aux feux de brousse.

Tableau 5-37 : Stratégies de prévention développées face aux feux de brousse

Mesures de prévention des feux	Proportion (%)			
	Abigui	Arikokaha	Pacobo	Ensemble
Création de pare-feu autour des nouvelles défriches avant le brûlage	97,65	90,91	37,21	75,29
Création et entretien de pare-feu autour des champs avant la période sèche	98,82	88,64	12,79	66,8
La chasse au feu en saison sèche est interdite	2,35	0	29,07	10,42
Annonce d'alerte et sensibilisation en décembre-janvier	4,71	2,27	18,6	8,49
Délimitation des forêts et des jachères pendant la saison sèche	5,88	18,18	0	8,11
Sensibilisation par le griot	0	0	22,09	7,34
Aucune action	0	0	27,91	9,27
Ne sait pas	0	4,55	1,16	1,93
Autres	0	7,95	10,46	6,14

Le Tableau 5-37 montre que la majorité des agriculteurs (75,3 %) affirment créer des pare-feu autour des nouvelles défriches avant le brûlage pour éviter la non-maîtrise du feu agricole qui pourrait entraîner un feu de brousse. D'autres déclarent créer et entretenir les pare-feu autour des champs avant la période sèche (66,8 %), tandis que 10,4 % des répondants interdisent la chasse à l'aide du feu pendant la saison sèche dans leur localité. Aussi, certains interviewés pensent que les mesures permettant de prévenir les feux et leur propagation sont la délimitation des forêts et jachères pendant la saison sèche (8,1 %), la sensibilisation et l'annonce d'alerte pendant la période sèche (8,5 %) ou la sensibilisation par les griots (7,3 %).

CHAPITRE 6 : DISCUSSION

6.1. VARIABILITE ET TENDANCES CLIMATIQUES DANS LE BASSIN VERSANT DU N’ZI

L'étude des paramètres climatiques a montré que la zone d'étude est soumise à une variabilité climatique pendant la période d'étude. Cependant, l'intensité de la variation n'a pas été uniforme sur l'ensemble du BVN compte tenu de l'influence des climats locaux (climat de type équatorial au Sud, climat subtropical au Nord et un climat de type équatorial de transition dans le centre du bassin).

Les températures ont clairement augmenté pendant la période d'étude. Sur l'ensemble du BVN, les températures moyennes ont augmenté d'environ 0,36 °C sur la période 1990-2016 (soit 0,01 °C/an). Cette hausse pourrait s'expliquer par les changements globaux en cours depuis la fin du 19^e siècle [11]. Les résultats des tendances de la température moyenne identifiées restent inférieurs à ceux observés sur toute la Côte d'Ivoire par Yao *et al.* [296] qui ont noté la hausse de la température moyenne nationale de 1,6 °C sur la période 1961-2010 (soit 0,03 °C/an). Cependant, cette valeur reste en conformité avec la hausse moyenne de 0,85 °C sur la période 1885-2012 (soit 0,01 °C/an) observée par le GIEC au niveau global [11] ou de 0,18 °C/décennie sur la période 1979-2010 (soit 0,02 °C/an) enregistrée au niveau ouest africain [297]. Ces hausses de température sont particulièrement accentuées au cours des années réputées années El Niño comme 1973, 1983, 1998 et 2016, reconnues au niveau global comme les plus fortes [298–301]. Ces augmentations thermométriques impactent négativement l'agriculture et entraînent la survenue de catastrophes environnementales comme les feux de brousse.

L'humidité relative a augmenté dans les zones forestière, soudanaise et l'ensemble du BVN tandis qu'elle a enregistré une baisse au niveau de la zone préforestière. Ces résultats pourraient s'expliquer par la hausse des précipitations identifiée dans ces régions. Ces résultats corroborent les travaux de Yao *et al.* [296] qui ont noté la hausse de l'humidité relative de 1960 à 2010 dans la zone forestière et soudanaise et une baisse de l'humidité relative dans la zone préforestière. Kouassi *et al.* [302] ont mis en évidence une baisse régulière de l'humidité relative depuis l'année 1973 au niveau du BVN.

En ce qui concerne les précipitations, nos résultats ont montré une tendance à la hausse avec une anomalie négative au niveau des zones forestière, soudanaise et l'ensemble du BVN. Des résultats similaires ont été trouvés en Afrique de l'Ouest par Nicholson *et al.* [303–305]. Cependant, plusieurs études pluviométriques au niveau de la Côte d'Ivoire et dans le BVN ont révélé une tendance négative à la fin du 20^e et au début du 21^e siècle [45,46,68,87,302,306,307].

L'année 1998 a été identifiée comme l'année la plus chaude au sein du BVN. Des observations antérieures ont montré que 1998 a été l'année la plus chaude du 20^e siècle et ayant connu la plus forte ENSO entraînant une augmentation de la température moyenne de l'air de 0,5 à 1 °C durant la saison sèche de 1997-1998 en Afrique [308–310].

Les conditions climatiques extrêmes pourraient être un facteur essentiel de l'occurrence des feux de brousse de plus en plus fréquents à l'échelle nationale.

6.2. DYNAMIQUE RETROSPECTIVE DES FEUX DE VEGETATION

Les satellites utilisés dans cette étude observent la zone d'étude 4 fois par jour (01h30, 10h30, 13h30 et 22h30). Il est donc important de garder à l'esprit que le nombre de feux actifs détectés dans cette étude n'est que le résultat des observations effectuées lors de ces quatre passages supérieurs et ne prend en compte que les incendies détectables par le satellite. De plus, les différents passages supérieurs des satellites peuvent provoquer un double comptage des incendies actifs. En effet, un seul feu de forêt peut se propager dans le paysage et brûler pendant plusieurs heures ou jours et être détecté par les deux satellites lors de leur passage [53]. Le manque de surfaces brûlées pendant des mois des saisons de feu pourrait s'expliquer par la faible résolution des images satellitaires dont le pixel est estimé à environ 23,5 ha. Les surfaces brûlées dont la superficie est inférieure à cette valeur ne sont pas capturées par le satellite. En effet, la résolution spatiale de la zone brûlée MODIS MCD64A1 est estimée à 500 m. Cette faible résolution peut surestimer ou sous-estimer l'étendue de la superficie brûlée. Les erreurs d'omission dues aux feux de végétation surviennent lorsque l'extension spatiale est insuffisante ou très fragmentée pour faire l'objet d'une discrimination en tant que feux de végétation [55] ou ceux cachés par la couverture nuageuse [311].

Nos résultats soulignent une tendance baissière de l'occurrence des feux ainsi que les surfaces brûlées. Plusieurs études similaires ont observé en Afrique subsaharienne des tendances à la baisse du nombre de feux et des surfaces brûlées au cours des dernières décennies [312–314]. Andela *et al.* [315] ont montré une tendance à la baisse significative du nombre de feux, de la taille des incendies et des zones brûlées en Afrique entre 2003 et 2015 en utilisant des produits MODIS. La décroissance de l'activité des feux pourrait être le résultat des efforts conséquents d'atténuation du changement climatique dans la région (administration forestière, société civile, etc.).

Notre étude a également montré que la zone préforestière était la plus touchée en termes de nombre de feux de végétation et de surfaces brûlées. Ce constat pourrait s'expliquer par l'écologie du paysage (zone de transition écologique composée d'un mélange de savanes et

forêts – écotone), l'utilisation des terres et les pratiques de chasse à base de feu adoptées dans cette zone. Des constats similaires ont été faits par Etienne [234] et Bruzon [146] qui ont observé l'utilisation de feux de brousse pour la chasse au début ou à la fin de la saison sèche. En outre, la composition de la végétation dans cette zone peut avoir une importance dans la dynamique du feu. Le type de végétation est un facteur qui influence grandement la propagation du feu en affectant la charge de combustible et la combustion [126,316]. L'analyse du régime des feux montre que la fréquence et l'intensité des incendies sont liées principalement à la continuité de la couche herbacée et à la phytomasse. La densité de feu est maximale pendant les mois les plus chauds (décembre-janvier) dans les savanes guinéennes. En effet, l'activité des feux se développe pendant la saison sèche où les facteurs climatiques favorisent l'inflammabilité de la végétation et la propagation des feux (présence de l'harmattan, etc.) [317]. La saison des feux dépend de l'humidité de la végétation, les feux tardifs et très tardifs brûlent plus intensément (faible teneur en humidité de la végétation) et ont tendance à causer plus de dégâts que les feux précoces. Ces constats sont en phase avec les observations de N'Dri et al. [41], Nielsen & Rasmussen [316] et Govender *et al.* [318]. Le faible nombre de feux de brousse après mars est dû au fait que la végétation se régénère avec les premières pluies et que l'évapotranspiration est à ce moment commence à décroître [319]. Ces feux sont majoritairement des feux à vocation agricole [139].

En raison de l'impact élevé de l'agriculture dans le sud de la zone étudiée (zone forestière), la superficie brûlée annuellement est relativement limitée par rapport aux autres écorégions. Dans cette zone, plusieurs cultures de rente, dont le cacao, le café et l'hévéa sont pratiquées et les paysans sont conscients de l'impact du feu en saison sèche sur ces cultures. De plus, la végétation est constituée de forêts denses et de forêts galeries peu pyrophytes [231]. Le raccourcissement de la période de jachère, le défrichage de la végétation et l'extension des champs augmentent les discontinuités du paysage qui limite la propagation des incendies et la superficie des zones brûlées [172].

L'analyse du régime intra-annuelle des feux a montré que le nombre de foyers de feu a augmenté de 2002 à 2008 dans la zone d'étude. Ces observations pourraient s'expliquer par le fait que la crise sociopolitique qu'a connue la Côte d'Ivoire entre 2002 et 2010 a affaibli l'administration forestière (retrait de financement, manque de surveillance et de gouvernance). Cette situation a entraîné un assouplissement de la sensibilisation et de la politique de lutte contre les feux de brousse au niveau local. Ces observations sont proches de celles de Kull [320] et Tabor *et al.* [321] qui a noté que l'instabilité politique entraînait des pratiques inhabituelles dans l'utilisation des feux (protestations, conflits fonciers, etc.) susceptibles d'augmenter les

dégâts liés aux incendies à Madagascar. En outre, cette situation peut s'expliquer par une pression démographique croissante conduisant à un plus grand nombre d'incendies dû au braconnage et à la conversion des savanes en terres agricoles (colonisation des savanes par l'hévéa et l'anacarde) [318].

Par ailleurs, la décroissance des surfaces brûlées constatée dans la zone d'étude pourrait s'expliquer par le fait que les populations opèrent des feux précoces en début de saison sèche. Cette pratique permet de limiter les possibilités d'extension des feux accidentels lorsque la dessiccation de la végétation sera plus accentuée et aussi de favoriser la repousse de la végétation utile à l'élevage [263]. Aussi, le retour des investisseurs dans le financement des activités de conservation et la mise en œuvre des initiatives telles que le mécanisme REDD+ (Réduction des Emissions des gaz à effet de serre due à la déforestation et à la dégradation des forêts) depuis 2011 pourraient expliquer cette décroissance de l'activité des feux. A Madagascar, Tabor *et al.* [321] montrent une corrélation très forte entre la hausse des investissements en faveur de la conservation ou du reboisement et la réduction significative des incendies.

Nos résultats indiquent qu'un nombre important de feux de végétation ainsi que des zones incendiées de taille importante avec des anomalies pyrologiques positives ont été enregistrés dans les années 2007, 2008 et 2016. Ces observations pourraient être dues au couple de phénomènes climatiques El Niño - La Niña dont les effets ont été parmi les plus extrêmes durant ces périodes [97,301,322]. La récurrence de ces phénomènes climatiques augmente le risque, la propagation et la dangerosité de feux de brousse de plus en plus moins contrôlable à l'échelle mondiale.

6.3. IMPACT DE LA VARIABILITE CLIMATIQUE SUR LA DYNAMIQUE DES FEUX

L'analyse des relations entre le climat et l'activité des feux à l'aide des corrélations de Spearman et CCF a montré que les meilleurs prédicteurs du nombre de feux et des surfaces brûlées sont VISIB, RH, PRCP, AI, DEWP, AT, VDP et FDI. Les covariables VISIB, RH, PRCP, AI, DEWP sont inversement corrélées à l'activité des feux, tandis que les prédicteurs à influence positive demeurent AT, VDP et FDI, impactant tous directement sans retard. Ces conclusions confirment plusieurs travaux antérieurs évaluant l'impact du climat sur les feux de végétation. L'augmentation de la température et du déficit de pression de vapeur combiné à l'absence de précipitation a considérablement accru la charge et l'aridité du combustible (végétation) [323,324]. Amenteras *et al.* [290] ont identifié une influence négative des précipitations sur les

feux en absence de retard. Koutsias *et al.* [325] ont présenté un effet positif des températures (maximale, moyenne et minimale) et une influence négative des précipitations sur l'occurrence des feux et les surfaces brûlées.

De plus, avec une humidité relative plus faible, le feu démarrera et brûlera plus vigoureusement en raison de la faible teneur en humidité de la végétation. Des résultats similaires ont été démontrés par Guiguindibaye *et al.* [319] qui ont observé que les hauteurs des flammes sont inversement corrélées à l'humidité relative en Tanzanie. Dje *et al.* [263] et Holsten *et al.* [326] ont également révélé que l'humidité relative était le meilleur indicateur de l'occurrence des incendies en Côte d'Ivoire et en Allemagne, respectivement. L'humidité relative a impacté fortement l'occurrence des incendies. Les longues journées de faible humidité dans un mois ont tendance à assécher tous les combustibles forestiers. Même quelques jours de faible humidité peuvent augmenter les risques d'incendie [327]. Bien que le FDI et l'indice d'Angström ne soient pas un indicateur de l'activité du feu, ils indiquent la vulnérabilité des zones aux incendies ; ce qui pourrait donner une idée de l'influence du feu sur le microclimat [50,263]. Archibald *et al.* [328] ont montré que les précipitations et la durée de la saison sèche sont des facteurs déterminants des zones brûlées en Afrique australe.

Les résultats montrent que dans la plupart des écorégions, les surfaces brûlées sont inversement associées aux SPI (corrélation négative). Étant donné que les valeurs de SPI négatives correspondent à des conditions sèches, cela suggère que, comme prévu, des conditions plus sèches entraînent des surfaces brûlées plus élevées. Dans un climat changeant, plusieurs voies de réaction au feu peuvent être identifiées en fonction des changements attendus dans les précipitations, la température, la végétation et les activités humaines [329–331].

Cette étude a utilisé les modèles GAM pour raffiner la relation entre l'activité des feux et les variables climatiques. Les effets des variables climatiques, y compris les indices de sécheresse et de danger d'incendie, ont montré des relations non linéaires avec le nombre de feux et les surfaces brûlées. Les effets non linéaires des variables climatiques dans cette étude indiquent que leurs influences sur l'activité des feux ne sont pas constantes, mais varient considérablement en termes de direction et de degré d'influence. Par exemple, les influences sur le nombre de feux dans l'ensemble du BVN diffèrent de celles observées dans les différentes écorégions de ce même bassin. Par conséquent, les influences des variables climatiques sur le nombre de feux ne doivent pas être généralisées aux autres régions du pays ou dans une autre zone d'activité de feu. Plusieurs études ont rapporté les impacts non linéaires des variables climatiques [332–334]. Cependant, nous n'avons pas pu trouver beaucoup d'études sur les effets non linéaires des variables climatiques sensibles sur l'activité du feu en Afrique de l'Ouest. Krawchuk *et al.* [335]

ont examiné l'occurrence mondiale des incendies en relation avec les variables climatiques et ont montré que la température moyenne du mois le plus chaud, les précipitations annuelles et la température moyenne du mois le plus humide sont les variables explicatives les plus importantes [333].

Dans l'ensemble du BVN, nous avons montré que DEWP (edf = 6,459), WDSP (edf = 5,587), SPI6 (edf = 4,044) et SPI (edf = 3,889) suivent des modèles non linéaires plus forts et AT (edf = 1,780) présente un profil non linéaire plus faible expliquant environ 80,1 % du nombre de feux de végétation. Comparativement, nous avons observé que DEWP (edf = 7,175) présente des motifs non linéaires plus forts, alors que AT (edf = 2,098) et VISIB (edf = 1,208) montrent un modèle non linéaire plus faible expliquant 81,3 % des zones brûlées. Ces résultats sont conformes aux conclusions de Ríos-Pena *et al.* [334,336] qui ont rapporté des distributions non linéaires. La déviance expliquée relativement élevée pourrait être améliorée davantage pour la prédiction de l'activité des feux de végétation. L'inclusion de covariables environnementales et biophysiques complémentaires pourrait améliorer les résultats des modèles GAM. Par exemple, l'activité du feu est fortement influencée par le climat, la topographie [337]. De plus, le type de végétation et la densité de la population aggravent mécaniquement le risque et la propagation des incendies [313]. Il est donc important de collecter des informations complémentaires sur ces covariables potentiellement influentes.

Les modèles GAM permettent de modéliser des phénomènes complexes, même en l'absence d'informations sur les fonctions de régression. Cependant, cette flexibilité des modèles GAM présente des limites. En effet, si on n'impose aucune contrainte à l'approximation, il est possible de faire passer une courbe estimée par tous les points de l'échantillon observé, avec une variance résiduelle nulle. Dans ce cas, l'estimation obtenue n'aura aucune valeur prédictive. [338].

6.4. IMPACT DES PARAMETRES ENVIRONNEMENTAUX SUR LA DYNAMIQUE DES FEUX

Dans cette étude, nous avons analysé les interactions existantes entre les variables biophysiques (topographiques, anthropogéniques, végétation, etc.) et l'apparition des foyers de feux. Les analyses univariées montrent une influence significative de l'ensemble des variables biophysiques étudiées sur l'occurrence des feux.

En premier lieu, selon nos résultats, la végétation et sa densité ont une influence significative sur les incendies. Les incendies apparaissent dans les formations forestières décidues à canopée ouverte dont la phénologie de la végétation est moyenne (NDVI compris en 0,3 et 0,5). Ces

effets sont cohérents avec plusieurs études précédentes portant sur divers écosystèmes qui ont montré un impact significatif des formations végétales sur les incendies [239,339–342]. Archibald *et al.* [328] en Afrique australe, qui a montré que la densité de la canopée est l'un des meilleurs prédicteurs des surfaces brûlées. Cependant, l'influence observée des formations végétales sur la configuration spatiale des départs de feu n'est pas la même dans toutes les classes d'occupation du sol. Elle est particulièrement visible dans les zones de forêts naturelles et semi-naturelles qui sont généralement moins incendiées que les zones plus touchées par les activités humaines comme l'agriculture et la chasse. Au niveau de ces zones à risque de feu élevé, les routes représentent le principal vecteur d'énergie d'inflammation. Le type de végétation détermine le type et la charge du combustible.

En second lieu, nos travaux montrent qu'il y a un impact du terrain sur l'apparition des feux dans le bassin étudié. Ces résultats confirment plusieurs recherches antérieures menées sur l'influence de la topographie (pente, altitude, aspect et type de sols) sur l'ignition des feux de végétation [317,343–345]. Les incendies éclosent généralement sur des terres propices à l'agriculture (moyenne altitude et pente faible à moyenne), caractérisée par des sols plus profonds à texture grossière et par une couche continue d'espèces de graminées vivaces et annuelles mélangées [118,345]. Les zones marécageuses et les zones de fortes pentes enregistrent un nombre faible d'ignitions de feu dû à leur inaccessibilité.

En dernier lieu, cette étude montre que les facteurs socio-économiques contribuent probablement à la propension des incendies de végétation dans cette région. Les facteurs anthropiques ont une grande influence sur la fréquence des incendies de végétation [245,346]. L'accessibilité aux villes est un indicateur d'accessibilité aux marchés basée sur le réseau routier. Les zones les plus proches des localités enregistrent un nombre élevé d'incendies comparés aux zones éloignées [239,245]. Aussi, la proximité des routes est une cause majeure de déforestation [347]. Les réseaux routier et ferroviaire peuvent directement augmenter le risque d'inflammation accidentelle en réduisant la fermeture du couvert forestier et augmentant les pressions anthropiques (interface homme-forêt) [245,343]. La densité de population est l'indicateur le plus couramment utilisé en relation avec la survenue d'un incendie causé par l'homme [129]. Cependant, les zones de forte densité de population ont révélé un faible taux d'incendies. Ce constat pourrait s'expliquer par la faible disponibilité de végétation (combustible) nécessaire pour alimenter les incendies. Ce résultat confirme les travaux effectués par Caillaut [348] au Burkina Faso, Dwomoh et Wimberly [313] dans la région de la Haute Guinée en Afrique de l'Ouest et Archibald *et al.* [328] en Afrique australe.

Des études complémentaires incluant d'autres variables ayant une influence sur l'occurrence des feux, la sévérité des feux et les dégâts liés aux feux méritent d'être menées. Les caractéristiques du sol (humidité, pH, etc.), l'occupation du sol issue du traitement de données satellitaires de haute résolution (Sentinel, RapidEye ou Spot), les données économiques et éducationnelles pourraient être étudiées.

6.5. MODELISATION ET PREVISION DE LA DYNAMIQUE DES FEUX

Dans le cadre de cette recherche, les modèles SARIMA adoptés ont permis d'effectuer des prévisions des séries pyrologiques étudiées. La prévision des incendies est un enjeu majeur en raison de la complexité des processus impliqués, des limites des données d'observation, de la concurrence et des effets combinés de plusieurs facteurs. La comparaison des valeurs observées et simulées montre que les modèles SARIMA peuvent être utilisés pour générer des prévisions de l'activité des feux. Les tendances passées au sein des données pyrologiques semblent se poursuivre dans le futur avec une légère augmentation du nombre de feux et des surfaces brûlées d'ici 2020. Ces prévisions sont basées essentiellement sur les valeurs historiques (scénario "*business as usual*") et peuvent se trouver rapidement caduques si des stratégies novatrices de prévention des feux sont adoptées ou si les conditions environnementales meilleures ou pires voient le jour dans la zone d'étude. Ces résultats sont proches de ceux de Boubeta *et al.* [130] et Viganó *et al.* [216] qui ont respectivement utilisé les modèles ARIMA pour la prévision des surfaces brûlées en Espagne et l'occurrence des feux de forêt dans le Pantanal au Brésil. Pour renforcer la confiance et la pertinence de nos résultats, il serait très utile que des analyses similaires soient menées au sein de la zone d'étude ou dans d'autres bassins versants du pays comme le Bandama et la Comoé subissant également les feux de brousse. Ces analyses doivent inclure des régresseurs comme les variables climatiques et biophysiques (modèles SARIMA avec variables exogènes ou SARIMAX). Ces modèles SARIMAX sont similaires à des modèles de régression multivariée, mais permettent de tirer parti de l'autocorrélation qui peut être présente dans les résidus de la régression pour améliorer la précision d'une prévision [279]. Selon Taylor *et al.* [349], les modèles de prévision de l'activité des feux incluent généralement des variables susceptibles d'influer sur le potentiel d'inflammation (type et humidité du combustible, source d'inflammation, etc.) et tiennent compte des variations de conditions topographiques, météorologiques et du combustible (type, humidité, etc.).

Les résultats des prévisions montrent que la prévision à un mois ne dépend que de valeurs observées, tandis que la prévision à deux mois dépend de la prévision à un mois et une valeur observée. La prévision à 3 mois, quant à elle, dépend des prévisions à deux mois et à un mois,

et ainsi de suite. Il apparaît donc que les prévisions à court terme (un ou deux années) sont plus fiables que celles à long terme au regard des biais qui pourraient être rencontrés au sein des valeurs prédites.

Les larges intervalles de prévision identifiés aux différents pics (élevées et faibles) pourraient s'expliquer par la grande variabilité des valeurs enregistrées au sein des variables pyrologiques au cours de ces périodes. La relative constance de ces intervalles de prévision pourrait être due à la non-différenciation des données observées entraînant une convergence de l'écart type de prévisions à long terme et des données historiques [218]. Le nombre, la gravité et la taille des incendies varient considérablement selon les régions et les années, en partie en raison des variations climatiques, des conditions environnementales et des facteurs démographiques et comportementaux [349]. Ces conditions pourraient affecter la précision de la prévision des feux d'une année à l'autre, comme c'est le cas dans notre étude.

Les modèles proposés ne sont pas conçus pour être généralisés à l'échelle nationale ou dans une autre zone d'intérêt. Cette première évaluation de la prévision mensuelle du nombre de feux et des surfaces brûlées à l'échelle du BVN constitue une étude de base pour des analyses futures. Les développements futurs possibles devraient inclure des modèles de détection des départs de feu, des systèmes de prévision du climat plus spécifiques, plus perfectionnés, des données climat-incendie adaptées à la zone et des méthodes empiriques plus sophistiquées avec un meilleur étalonnage des prédicteurs [130,350].

6.6. PERCEPTIONS ET STRATEGIES D'ADAPTATION

L'analyse des données climatiques montre que dans le BVN, des évolutions climatiques très marquées ont été observées durant ces dernières décennies, en particulier l'augmentation de la température et l'occurrence d'épisodes de sécheresse significatives. Les perceptions locales de la variabilité climatique semblent corroborer les observations météorologiques et la littérature scientifique dans la région d'étude.

Les populations locales ont pu identifier un réchauffement des variables climatiques (augmentation de la température, diminution des précipitations et du nombre de jours pluvieux, début tardif de la saison pluvieuse, etc.) dont les principales causes sont le déboisement, l'exploitation forestière, les feux de brousse ou d'origine naturelle. Ces observations concordent à l'analyse des variables climatiques et confirment plusieurs travaux qui ont été menés sur l'évolution du climat dans la zone d'étude [46,49,87,302,307]. Cependant, les perceptions sur l'évolution des précipitations semblent en contradiction avec les données pluviométriques et varient en fonction des localités. Cette contradiction pourrait être due à une grande variabilité

marquée par de « faux départs de saison », la baisse du nombre de jours de pluie et la récurrence des pluies extrêmes [351]. Ces évènements climatiques entraînent une modification de la saison culturale et sont dommageables aux semis et à la croissance de la plante. De plus, cette contradiction pourrait fournir des contextes plus localisés de la variabilité climatique, insuffisamment capturés par les données météorologiques utilisées [352]. Les perceptions de l'évolution de la quantité des pluies des 20 dernières années ne concordent pas à celles des populations des localités environnantes [353–355].

Les impacts perçus des changements climatiques sur les cultures sont multiples, incluant la mort des jeunes plants, la mauvaise croissance des cultures, l'immaturation des cultures, la mort des cultures sur pied, etc. De plus, ils entraînent au niveau des ménages la baisse du revenu, le décoiffement des toitures des maisons et l'apparition de maladies. Ces résultats sont cohérents avec les conclusions de Mertz *et al.* [70,71], Boissière *et al.* [356] et Egeh et Ati [357]. D'autres auteurs ont souligné la récurrence des maladies infectieuses (choléra) et à transmission vectorielle (paludisme, dengue, fièvre jaune, etc.) due à la hausse des températures associée aux fortes précipitations [94,96,97,358–360].

Nos résultats ont montré que les communautés locales perçoivent également des feux de brousse. Les agriculteurs pensent que le nombre de feux de brousse a augmenté dans les localités enquêtées. Ces observations sont en contradiction avec l'analyse des données satellitaires qui ont montré une tendance décroissante durant ces dernières décennies. Cette différence de perception peut se traduire par les contrastes socioculturels, le degré d'exposition et les désastres importants causés. Cependant, il ne faudrait pas occulter le fait que les feux détectés par le satellite comportent non seulement les feux de brousse, mais aussi les feux agricoles. En outre, certains feux n'ont pu être détectés à cause de la période de passage du satellite.

Les causes assignées par les agriculteurs à ces feux de brousse sont diverses et principalement d'origine anthropique dont la chasse et la préparation des parcelles agricoles. Ces résultats confirment les observations de Bruzon [146] et Fournier *et al.* [361] qui ont noté que la chasse et la préparation des terres agricoles sont les principales causes de feux de brousse au Burkina Faso et en Côte d'Ivoire, respectivement. Goldammer et Ronde [2] ont montré que plus de 10 % des feux de végétation tirent leur origine des feux mal maîtrisés lors de la création des pare-feu à l'intérieur et autour des plantations forestières. La mauvaise maîtrise des feux est due au manque de formation adéquate du personnel en charge des travaux forestiers.

Les impacts des feux de végétation, essentiellement d'origine anthropoclimatique, sont désastreux au niveau des cultures, se traduisant par la destruction des cultures, la perte des

récoltes et le ralentissement de la croissance des végétaux tandis qu'au niveau des habitations, ils entraînent les pertes en vie humaine et la destruction des biens matériels. Ces constats sont similaires à ceux de Doerr et Santín [1] et Appiah *et al.* [362] qui ont montré que les feux de brousse ont considérablement endommagé les cultures et tué de nombreux plants d'arbres et de jeunes arbres plantés au début de l'établissement de la plantation.

Ehiakpor *et al.* [355] et Maddison [363] ont noté que la perception des agriculteurs concernant les changements de température et de précipitations était essentielle pour la prise de décision en matière d'adaptation aux impacts potentiels du climat au niveau des exploitations.

Les résultats de la présente étude montrent que les agriculteurs ont des perceptions conformes aux tendances actuelles des changements climatiques et pyrologiques. Ils adoptent des mesures pour faire face et s'adapter à ces changements constatés. Ces stratégies d'adaptation sont toutes liées aux techniques modernes qu'aux savoirs endogènes des populations rurales.

Cependant, certains agriculteurs sont impuissants face aux impacts négatifs du climat et des feux de brousse. Ces observations sont cohérentes avec les conclusions de Jiri *et al.* [364] qui ont relaté que la vulnérabilité des petits exploitants augmenterait continuellement sans adaptation. La faible pratique de stratégies locales peut être due à l'acclimatation des agriculteurs à la variabilité climatique de la zone et aussi au manque de ressources (financières, matériels, main-d'œuvre, etc.).

Face aux feux de brousse, les agriculteurs créent des pare-feu autour des plantations agricoles et des nouveaux défrichements avant brûlage et interdisent l'usage du feu pour la chasse. Les résultats de cette étude confirment bien les résultats présentés dans d'autres études menées sur la gestion des feux [361,362,365].

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette thèse, qui s'inscrit dans la recherche sur la gestion des feux, étudie l'effet des facteurs climatiques et environnementaux sur le régime des feux de végétation en rapport avec la perception paysanne dans le centre de la Côte d'Ivoire au regard de la péjoration climatique observée depuis 1970.

Elle vise la caractérisation de la variabilité climatique observée de 1973 à 2016, la caractérisation du régime des feux de végétation sur la période 2001-2016, l'étude de l'impact des paramètres climatiques et biophysiques sur l'activité des feux, la modélisation prédictive du régime des feux de végétation à partir des modèles SARIMA et la perception des populations locales de la variabilité climatique et la dynamique des feux de végétation dans le bassin versant du N'Zi. Pour atteindre ces objectifs, cette étude a analysé des données climatiques, satellitaires (pyrologiques et environnementales) et socio-économiques (enquête ménage) à travers des approches statistiques, descriptives et prévisionnelles.

Premièrement, l'étude de la caractérisation de la variabilité climatique montre que les variables climatiques (températures, précipitations, vitesses du vent, évapotranspiration de référence) ont présenté une tendance générale haussière significative de 1973 à 2016. Cependant, cette tendance diffère en fonction des écorégions compte tenu de l'influence des climats locaux. Il faut noter que l'humidité de l'air a progressé durant cette même période dans les zones forestière et soudanaise à un taux de +1,64 % et +0,97 %, respectivement tandis qu'elle a régressé dans la zone préforestière à un rythme d'environ -7,36 % durant la période 1973-2016. Les températures moyennes ont évolué positivement à un taux global de +0,36 °C durant la période d'étude. Les zones forestière, préforestière et soudanaise présentent un rythme de progression de +,39 °C, 0,43 °C et +0,06 °C, respectivement. De plus, les précipitations ont régressé de -6,04 mm sur l'ensemble du BVN.

Deuxièmement, la caractérisation du régime des feux de végétation a montré que le nombre de feux et les surfaces brûlées suivent une tendance baissière. Les feux de végétation surviennent au sein du BVN pendant la saison sèche. Le régime des feux de végétation diffère en fonction des écorégions. La zone préforestière était la plus affectée par le feu dans ce bassin. Dans l'ensemble du BVN, le régime des feux diffère en fonction des mois. Les mois de décembre et janvier ont enregistré les pics les plus élevés de surfaces brûlées et de foyers de feux, respectivement. Annuellement, l'année 2008 a enregistré le plus grand nombre de feux (1 949 feux), tandis que l'année 2016 a connu les plus grandes superficies détruites par le feu (6 593,89 km²). Statistiquement, aucune différence significative n'a été démontrée au sein des données pyrologiques annuelles et écorégionales.

Troisièmement, l'analyse de l'impact des variables climatiques sur le régime des feux montre que les conditions météorologiques, associées aux indices de sécheresse et de danger de feux, influencent fortement le régime des feux de végétation dans la zone. Les meilleurs prédicteurs ayant une influence négative sur l'activité des feux sont VISB, RH, PRCP, AI et DEWP, tandis que les prédicteurs à influence positive demeurent AT, VDP et FDI. Ces variables impactent directement le régime des feux généralement sans retard. Les indices de danger de feu FDI et AI demeurent les variables les plus importantes à surveiller dans la gestion des feux du fait qu'ils présentent le degré de contrôlabilité des incendies en cas de départ de feu. Les modèles GAM ont été utilisés pour étudier les relations quantitatives entre les variables climatiques et l'activité du feu. Nos modèles ont expliqué plus de 80 % de la déviance de l'activité des feux et présenté des coefficients de détermination ajustés élevés dans la zone étudiée.

De plus, l'étude a aussi montré que l'ensemble des paramètres environnementaux (topographiques, anthropogéniques, végétation, etc.) utilisés impactent significativement sur l'apparition des feux. Ces paramètres méritent d'être suivis dans le cadre de la gestion des feux en rapport avec les sciences sociales.

Quatrièmement, la modélisation et la prévision du nombre de feux et des surfaces brûlées à l'échelle du bassin versant et de ces écorégions réalisées à l'aide des modèles SARIMA indiquent que les modèles proposés offrent des résultats satisfaisants. Ces modèles présentent une bonne description et une performance de prévision acceptable des variables pyrologiques. Les observations du nombre de feux et des surfaces brûlées simulées sont très proches des observations réelles. Les prévisions des observations du nombre de feux et des surfaces de feux sur un horizon de 4 ans (48 mois) semblent progresser légèrement. Ces prévisions pertinentes et fiables doivent servir de base pour la sensibilisation des populations locales et l'élaboration d'un outil d'aide à la décision dans l'aménagement de l'écosystème étudié et la prévention des incendies dans cet écosystème.

Finalement, l'évaluation des perceptions des communautés montre que les agriculteurs locaux ont une bonne perception de l'évolution du régime pyroclimatique. Ces perceptions correspondent dans la majorité des cas avec l'analyse des données climatiques et satellitaires. Cependant, les perceptions ont varié en fonction des écorégions et quelques contrastes existent entre les perceptions et la mesure scientifique dont les causes pourraient être le degré d'exposition plus localisé des communautés, la baisse du nombre de jours pluvieux et l'accroissement des pluies extrêmes. A l'échelle du bassin versant, diverses stratégies d'adaptation ont été adoptées en réponse aux risques et aléas pyroclimatiques observés. Les

perceptions et stratégies d'adaptation adoptées sont reliées par une relation d'interdépendance dans laquelle les connaissances et les chocs observés jouent un rôle important.

Les résultats de cette étude peuvent constituer les bases et repères pour la prise de décisions dans l'ambition de réduire la vulnérabilité des populations ivoiriennes face aux aléas pyroclimatiques actuels et futurs. Ils permettront de cibler les zones pour la sensibilisation par l'administration forestière et une meilleure distribution spatio-temporelle des moyens de lutte. Malgré ces résultats et leurs utilités, nous ne devons pas perdre de vue les faiblesses de cette étude :

- le manque de station synoptique à l'intérieur de certaines écorégions a entraîné l'utilisation de stations éloignées (près de 100 km autour de la zone d'étude) ; ce qui pourrait biaiser les résultats de cette recherche ;
- les données manquantes sur une longue période pour les stations de la zone soudanaise peuvent influencer fortement sur les prévisions et les corrélations entre les variables climatiques et les variables pyrologiques ;
- les valeurs prédites par la modélisation statistique liée à l'apprentissage machine peuvent être loin de la réalité à cause de la modicité de la plage temporelle (inférieur à 50 ans), des pratiques et comportements de la population et de l'intensité du dérèglement climatique qui pourraient faire varier la précision de nos modèles.

Sur la base des résultats et des limites de cette étude, plusieurs perspectives à court terme se présentent. Il s'agit de :

- mettre en place d'un système national de suivi des feux de végétation à temps réel à l'aide de la télédétection afin d'obtenir des statistiques fiables et orienter les moyens de prévention et de lutte ;
- sensibiliser et éduquer les populations locales sur les impacts du climat et des feux de brousse et les stratégies d'adaptations innovantes à adopter, surtout dans les zones reculées les plus sensibles ;
- élaborer la cartographie du risque d'incendies de végétation à l'aide des facteurs climatiques et biophysiques pour la prévention des éclosions de feux de végétation ;
- mener des études complémentaires incluant les facteurs et scénarios climatiques, socio-économiques locaux dans la modélisation et la prévision de la dynamique des feux et des surfaces brûlées pour l'amélioration de la précision des modèles ;
- évaluer les émissions de GES dues aux feux de végétation dans les différentes formations végétales et écorégions.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Doerr, S.H.; Santín, C. Global trends in wildfire and its impacts: perceptions versus realities in a changing world. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. **2016**, *371* (1696), 20150345. doi: 10.1098/rstb.2015.0345.
- [2] Goldammer, J.G.; de Ronde, C. Wildland fire management handbook for sub-Saharan Africa; Goldammer, J.G., de Ronde, C., Eds.; Global Fire Monitoring Center: Freiburg, Germany, **2004**.
- [3] Giglio, L.; Randerson, J.T.; van der Werf, G.R.; Kasibhatla, P.S.; Collatz, G.J.; Morton, D.C.; DeFries, R.S. Assessing variability and long-term trends in burned area by merging multiple satellite fire products. *Biogeosciences Discussions*. **2009**, *6* (6), 11577–11622. doi: 10.5194/bgd-6-11577-2009.
- [4] Humber, M.L.; Boschetti, L.; Giglio, L.; Justice, C.O. Spatial and temporal intercomparison of four global burned area products. *International Journal of Digital Earth*. **2018**, 1–25. doi: 10.1080/17538947.2018.1433727.
- [5] FAO. Fire management global assessment 2006; FAO Forestry Paper 151; Rome, Italy, **2007**.
- [6] FAO. Feux de forêts : Les pays en développement plus vulnérables. En ligne : <https://news.un.org/fr/story/2009/07/162642-feux-de-forets-les-pays-en-developpement-plus-vulnerables> (visité le 30/03/2018).
- [7] Finlay, S.E.; Moffat, A.; Gazzard, R.; Baker, D.; Murray, V. Health impacts of wildfires. *PLoS Currents*. **2012**, *4*, e4f959951cce2c. doi: 10.1371/4f959951cce2c.
- [8] Cochrane, M.A. Fire in the tropics In *Tropical Fire Ecology*. doi: 10.1007/978-3-540-77381-8_1; Cochrane, M.A., Ed.; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, UK, **2009**; pp 1–23.
- [9] Jolly, W.M.; Cochrane, M.A.; Freeborn, P.H.; Holden, Z.A.; Brown, T.J.; Williamson, G.J.; Bowman, D.M.J.S. Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. *Nature Communications*. **2015**, *6*, 7537. doi: 10.1038/ncomms8537.
- [10] Laris, P. Integrating Land Change Science and Savanna Fire Models in West Africa. *Land*. **2013**, *2* (4), 609–636. doi: 10.3390/land2040609.
- [11] GIEC. Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat; Pachauri, R.K., Meyer, L.A., Eds.; GIEC: Genève, Suisse, 2014.
- [12] NASA Goddard Institute for Space Studies. NASA, NOAA Data Show 2016 Warmest Year on Record Globally. En ligne : <https://www.giss.nasa.gov/research/news/20170118/> (visité le 18/09/2017).
- [13] NASA Goddard Institute for Space Studies. March 2018 was one of six warmest Marches on record. En ligne : <https://climate.nasa.gov/news/2714/march-2018-was-one-of-six-warmest-marches-on-record/> (visité le 15/06/2018).
- [14] Paudel, B.; Acharya, B.S.; Ghimire, R.; Dahal, K.R.; Bista, P. Adapting agriculture to climate change and variability in Chitwan: Long-term trends and farmers' perceptions. *Agricultural Research*. **2014**, *3* (2), 165–174. doi: 10.1007/s40003-014-0103-0.

- [15] GIEC. Bilan 2007 des changements climatiques - Conséquences, adaptation et vulnérabilité. Contribution du Groupe de travail III au quatrième Rapport d'Évaluation; Bernstein, L., Bosch, P., Canziani, O., Chen, Z., Christ, R., Davidson, O., Hare, W., Huq, S., Karoly, D., Kattsov, V., Kundzewicz, Z., Liu, J., Lohmann, U., Manning, M., Matsuno, T., Menne, B., Metz, B., Mirza, M., Nicholls, N., Nurse, L., Pachauri, R., Palutikof, J., Parry, M., Qin, D., Ravindranath, N., Reisinger, A., Ren, J., Riahi, K., Rosenzweig, C., Rusticucci, M., Schneider, S., Sokona, Y., Solomon, S., Stott, P., Stouffer, R., Sugiyama, T., Swart, R., Tirpak, D., Vogel, C., Yohe, G., Pachauri, R.K., Andy Reisinger, Eds.; GIEC: Geneve, Suisse, **2007**.
- [16] Mertz, O.; Halsnæs, K.; Olesen, J.E.; Rasmussen, K. Adaptation to Climate Change in Developing Countries. *Environmental Management*. **2009**, *43* (5), 743–752. doi: 10.1007/s00267-008-9259-3.
- [17] Tanner, T.; Mitchell, T. Entrenchment or enhancement: could climate change adaptation help reduce poverty? *Development*. **2008**, *39* (106), 1–19. doi: 10.1111/j.1759-5436.2008.tb00471.x.
- [18] Kull, C.A.; Laris, P. Fire ecology and fire politics in Mali and Madagascar In *Tropical Fire Ecology: Climate Change, Land Use and Ecosystem Dynamics*. doi: 10.1007/978-3-540-77381-8_7; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, **2009**; pp 171–226.
- [19] Shlisky, A.; Alencar, A.A.C.; Nolasco, M.M.; Curran, L.M.L. Overview: Global fire regime conditions, threats, and opportunities for fire management in the tropics In *Tropical Fire Ecology*. doi: 10.1007/978-3-540-77381-8_3; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, **2009**; pp 65–83.
- [20] AGRHYMET. Suivi des feux actifs en Afrique de l'Ouest; Niamey, Niger, **2014**.
- [21] Levine, J.S. Biomass burning and the production of greenhouse gases In *Climate Biosphere Interaction: Biogenic Emissions and Environmental Effects of Climate Change*. Zepp, R.G., Ed.; John Wiley and Sons: New York, **1994**; pp 139–160.
- [22] Loehman, R.A.; Reinhardt, E.; Riley, K.L. Wildland fire emissions, carbon, and climate: Seeing the forest and the trees - A cross-scale assessment of wildfire and carbon dynamics in fire-prone, forested ecosystems. *Forest Ecology and Management*. **2014**, *317*, 9–19. doi: 10.1016/j.foreco.2013.04.014.
- [23] Houinato, M.; Sinsin, B.; Lejoly, J. Impact des feux de brousse sur la dynamique des communautés végétales dans la forêt de Bassila (Bénin). *Acta Botanica Gallica*. **2001**, *148* (3), 237–251. doi: 10.1080/12538078.2001.10515891.
- [24] Kouassi, N.F.; Ahoussi, J.M.-S. Le feu comme facteur anthropogène In *Atlas de la Biodiversité de l'Afrique de l'Ouest, Tome III : Côte d'Ivoire*. Konaté, S., Kampmann, D., Eds.; Abidjan & Frankfurt/Main, Côte d'Ivoire & Germany, **2010**; pp 150–158.
- [25] Mbow, C. Rapport sur les feux de brousse au Sénégal pour la saison sèche de septembre 2004 à mai 2005; Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD): Dakar, Sénégal, **2005**.
- [26] Adouabou, A.B.; Gallardo, J.; Gutierrez, A.R.; Sanou, L. Propositions d'aménagement intégré de l'espace rural à partir des multiples usages écologiques, sociaux et économiques des feux de brousse : cas du ranch de gibier de Nazinga et du sud du

- Burkina Faso; Toulouse, France, **2004**.
- [27] The World Bank. *Baissions la chaleur : Phénomènes climatiques extrêmes, impacts régionaux et plaidoyer en faveur de l'adaptation*; Washington, DC, USA, **2013**.
- [28] World Bank. *Pour que demain ne meure jamais : la Côte d'Ivoire face au changement climatique (French)*; World Bank Group: Washington, D.C, **2018**.
- [29] ThinkHazard. Côte d'Ivoire Country Profile. En ligne : <http://thinkhazard.org/fr/report/66-cote-divoire/> (visité le 18/01/2019).
- [30] SODEFOR. "Gestion des feux de forêts en Côte d'Ivoire à titre expérimental" PD 51/98 REV.1 (F); SODEFOR: Abidjan, Côte d'Ivoire, **2006**.
- [31] Etc Terra - Rongead; BNETD. *Analyse qualitative des facteurs de déforestation et de dégradation des forêts en Côte d'Ivoire*; Ministère de l'Environnement et du Développement Durable: Abidjan, Côte d'Ivoire, **2016**.
- [32] Bigot, S. *Variabilité climatique, interactions et modifications environnementales : l'exemple de la Côte d'Ivoire*; Université des Sciences et Technologies de Lille: Lille, France, **2005**.
- [33] Goldammer, J.G. *Les incendies dans le monde : Message du Global Fire Monitoring Center*; Global Fire Monitoring Center (GFMC): Freiburg, Germany, **2000**.
- [34] MINEF. *Campagne nationale de lutte contre les feux de brousse édition 2016-2017*. En ligne : <http://www.eauxetforets.gouv.ci/index.php/le-minef/actualites/a-la-une/514-campagne-nationale-de-lutte-contre-les-feux-de-brousse-edition-2016-2017> (visité le 14/06/2017).
- [35] MINEF. *Cérémonie de lancement de la caravane Nationale de Sensibilisation sur les méfaits des feux de brousse*. En ligne : <http://www.eauxetforets.gouv.ci/index.php/component/content/article?id=119> (visité le 18/03/2018).
- [36] Kouadio, K.B.; N'Da, D.H.; Vroh Bi, A.T.; Zobi, I.C.; N'Guessan, K.E. *Dynamique de la végétation et fréquence des feux de brousse dans la Reserve de Faune d'Abokouamekro (Centre, Côte d'Ivoire)*. *European Scientific Journal*. **2013**, 9 (35), 179–192.
- [37] Louppe, D.; Ouattara, N.; Coulibaly, A. *Effet des feux de brousse sur la végétation*. *Bois et forêts des tropiques*. **1995**, 245, 1–11.
- [38] Louppe, D.; Oliver, R. *Impacts des feux annuels sur la végétation et les sols des savanes du centre de la Côte d'Ivoire* In *Colloque international sur l'influence de la gestion de la biomasse sur l'érosion et la séquestration du carbone*. Roose, E., De Noni, G., Prat, C., Ganry, F., Bourgeon, G., Eds.; IRD, CIRAD-AMIS-AGRONOMIE: Montpellier, France, **2004**; pp 80–95.
- [39] Aubréville, A.M.A. *The Disappearance of the Tropical Forests of Africa*. *Fire Ecology*. **2013**, 9 (2), 3–13. doi: 10.1007/BF03400624.
- [40] Aubréville, A.M.A. *Les expériences de reconstitution de la savane boisée en Côte d'Ivoire*. *Revue Bois et Forêts des Tropiques*. **1953**, 32, 4–10. doi:

- 10.19182/bft1953.32.a18485.
- [41] N'Dri, A.B.; Soro, T.D.; Gignoux, J.; Dosso, K.; Koné, M.; N'Dri, J.K.; Koné, N.A.; Barot, S. Season affects fire behavior in annually burned humid savanna of West Africa. *Fire Ecology*. **2018**, *14* (2), 5. doi: 10.1186/s42408-018-0005-9.
- [42] N'Dri, A.B.; Gignoux, J.; Dembele, A.; Konate, S. Short term effects of fire intensity and fire regime on vegetation dynamic in a tropical humid savanna (Lamto, central Côte d'Ivoire). *Natural Science*. **2012**, *04* (12), 1056–1064. doi: 10.4236/ns.2012.412134.
- [43] N'Dri, A.B.; Gignoux, J.; Barot, S.; Konaté, S.; Dembélé, A.; Werner, P.A. The dynamics of hollowing in annually burnt savanna trees and its effect on adult tree mortality. *Plant Ecology*. **2014**, *215* (1), 27–37. doi: 10.1007/s11258-013-0276-9.
- [44] N'Dri, A.B.; Fongbe, M.; Soro, T.D.; Gignoux, J.; Kone, M.; Dosso, K.; N'dri, J.K.; Kone, N.A.; Barot, S. Principaux indices de l'intensité du feu dans une savane Guinéenne d'Afrique de l'Ouest. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*. **2018**, *12* (1), 266. doi: 10.4314/ijbcs.v12i1.21.
- [45] Bigot, S.; Brou, T.Y.; Oszwald, J.; Diedhiou, A. Facteurs de la variabilité pluviométrique en Côte d'Ivoire et relations avec certaines modifications environnementales. *Sécheresse*. **2005**, *16* (1), 5–13.
- [46] Goula, B.T.A.; Savané, I.; Fadika, V.; Konan, B.; Kouadio, G.B. Impact de la variabilité climatique sur les ressources hydriques des bassins du N'Zo et N'Zi en Côte d'Ivoire (Afrique Tropicale Humide). *VertigO*. **2006**, *7* (1), 1–12. doi: 10.4000/vertigo.2038. En ligne : <http://vertigo.revues.org/2038>.
- [47] Kanohin, F.; Saley, M.B.; Savane, I. Impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau et les activités humaines en zone tropicale humide: cas de la région de Daoukro en Côte d'Ivoire. *European Journal of Scientific Research*. **2009**, *26* (2), 209–222.
- [48] N'Guessan, J.A.; Yoboue, K.B.; N'Daoule, R. La variabilité pluviométrique et ses impacts sur l'alimentation en eau des milieux ruraux du département de Dimbokro (Centre-Est de la Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal*. **2015**, *11* (35), 36–57.
- [49] Yao, T.B.; Akindès, F.; Bigot, S. La variabilité climatique en Côte d'Ivoire : entre perceptions sociales et réponses agricoles. *Cahiers Agricultures*. **2005**, *14* (6), 533–540. doi: 10.13140/2.1.5174.3368.
- [50] Strydom, S.; Savage, M.J. Potential impacts of climate change on wildfire dynamics in the midlands of KwaZulu-Natal, South Africa. *Climatic Change*. **2017**, *143* (3–4), 385–397. doi: 10.1007/s10584-017-2019-8.
- [51] Hawbaker, T.J.; Radeloff, V.C.; Syphard, A.D.; Zhu, Z.; Stewart, S.I. Detection rates of the MODIS active fire product in the United States. *Remote Sensing of Environment*. **2008**, *112* (5), 2656–2664. doi: 10.1016/j.rse.2007.12.008.
- [52] Barry, M.B.; Badiane, D.; Sall, S.M.; Balde, M.L.; Millimono, T.; Diaby, I.; Diallo, D. Apport d'une méthode de détection et d'estimation des surfaces brûlées par imagerie MODIS : application aux savanes guinéennes. *Revue Scientifique de l'Université Julius N'yéré de Kankan : L'harmattan*. **2015**, 11.

- [53] Oliveras, I.; Anderson, L.O.; Malhi, Y. Application of remote sensing to understanding fire regimes and biomass burning emissions of the tropical Andes. *Global Biogeochemical Cycles*. **2014**, 28 (4), 480–496. doi: 10.1002/2013GB004664.
- [54] Robinson, J.M. Fire from space: Global fire evaluation using infrared remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*. **1991**, 12 (1), 3–24. doi: 10.1080/01431169108929628.
- [55] Roy, D.P.; Jin, Y.; Lewis, P.E.; Justice, C.O. Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data. *Remote Sensing of Environment*. **2005**, 97 (2), 137–162. doi: 10.1016/j.rse.2005.04.007.
- [56] Roy, D.P.; Boschetti, L.; Justice, C.O.; Ju, J. The collection 5 MODIS burned area product - Global evaluation by comparison with the MODIS active fire product. *Remote Sensing of Environment*. **2008**, 112 (9), 3690–3707. doi: 10.1016/j.rse.2008.05.013.
- [57] CCNUCC. Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques; Organisation des Nations Unies: New York City, USA, **1992**.
- [58] Pulido, J.; Bocco, G. Local perception of land degradation in developing countries: A simplified analytical framework of driving forces, processes, indicators and coping strategies. *Living Reviews in Landscape Research*. **2014**, 8 (1), 1–21. doi: 10.12942/lrlr-2014-4.
- [59] UNISDR. Terminologie pour la Prévention des risques de catastrophe; Geneva, Switzerland, **2009**.
- [60] Nicholson, S.E. The intensity, location and structure of the tropical rainbelt over west Africa as factors in interannual variability. *International Journal of Climatology*. **2008**, 28 (13), 1775–1785. doi: 10.1002/joc.1507.
- [61] Mertz, O.; D’haen, S.; Maiga, A.; Moussa, I.B.; Barbier, B.; Diouf, A.; Diallo, D.; Dapola Da, E.; Dabi, D. Climate variability and environmental stress in the Sudan-Sahel zone of West Africa. *Ambio*. **2012**, 41 (4), 380–392. doi: 10.1007/s13280-011-0231-8.
- [62] Druyan, L.M. Studies of 21st-century precipitation trends over West Africa. *International Journal of Climatology*. **2011**, 31 (10), 1415–1424. doi: 10.1002/joc.2180.
- [63] Hastenrath, S.; Polzin, D. Long-term variations of circulation in the tropical Atlantic sector and Sahel rainfall. *International Journal of Climatology*. **2011**, 31 (5), 649–655. doi: 10.1002/joc.2116.
- [64] Rodríguez-Fonseca, B.; Janicot, S.; Mohino, E.; Losada, T.; Bader, J.; Caminade, C.; Chauvin, F.; Fontaine, B.; García-Serrano, J.; Gervois, S.; Joly, M.; Polo, I.; Ruti, P.; Roucou, P.; Voltaire, A. Interannual and decadal SST-forced responses of the West African monsoon. *Atmospheric Science Letters*. **2011**, 12 (1), 67–74. doi: 10.1002/asl.308.
- [65] Dai, A.; Lamb, P.J.; Trenberth, K.E.; Hulme, M.; Jones, P.D.; Xie, P. The recent Sahel drought is real. *International Journal of Climatology*. **2004**, 24 (11), 1323–1331. doi: 10.1002/joc.1083.
- [66] Chappell, A.; Agnew, C.T. Modelling climate change in West African Sahel rainfall(1931–90) as an artifact of changing station locations. *International Journal of*

- Climatology*. **2004**, 24 (5), 547–554. doi: 10.1002/joc.1021.
- [67] ECOWAS-SWAC/OECD. Climate and Climate Change In *Atlas on Regional Integraion in West Africa*. Environment; ECOWAS-SWAC/OECD: Abuja, Nigeria, **2008**; p 24.
- [68] Asseman, E.A.; Kouame, F.K.; Djagoua, É.V.; Affian, K.; Jourda, J.P.R.; Adja, M.; Lasm, T.; Biemi, J. Étude de l’impact des variabilités climatiques sur les ressources hydriques d’un milieu tropical humide. *Revue des sciences de l’eau*. **2013**, 26 (3), 247. doi: 10.7202/1018789ar.
- [69] Niasse, M.; Afouda, A.; Amani, A. Réduire la vulnérabilité de l’Afrique de l’ouest aux impacts du climat sur les ressources en eau, les zones humides et la désertification: élément de stratégie régionale de préparation et d’adaptation; UICN: Glan, Suisse et Cambridge, Royaume-Uni, **2004**.
- [70] Mertz, O.; Mbow, C.; Reenberg, A.; Diouf, A. Farmers’ perceptions of climate change and agricultural adaptation strategies in rural sahel. *Environmental Management*. **2009**, 43 (5), 804–816. doi: 10.1007/s00267-008-9197-0.
- [71] Mertz, O.; Mbow, C.; Reenberg, A.; Genesio, L.; Lambin, E.F.; D’haen, S.; Zorom, M.; Rasmussen, K.; Diallo, D.; Barbier, B.; Moussa, I.B.; Diouf, A.; Nielsen, J.; Sandholt, I. Adaptation strategies and climate vulnerability in the Sudano-Sahelian region of West Africa. *Atmospheric Science Letters*. **2011**, 12 (1), 104–108. doi: 10.1002/asl.314. En ligne : <http://doi.wiley.com/10.1002/asl.314>.
- [72] Connolly-Boutin, L.; Smit, B. Climate change, food security, and livelihoods in sub-Saharan Africa. *Regional Environmental Change*. **2016**, 16 (2), 385–399. doi: 10.1007/s10113-015-0761-x.
- [73] Verhagen, A.; Dietz, A.J.; Ruben, R.; van Dijk, H.; de Jong, A.; Zaal, F.; de Bruijn, M.; van Keulen, H. Climate change and food security in the drylands of West Africa In *Global Environmental Change and Land Use*. doi: 10.1007/978-94-017-0335-2_7; Springer Netherlands: Dordrecht, Netherlands, **2003**; pp 167–185.
- [74] Paeth, H.; Capo-Chichi, A.; Endlicher, W. Climate change and food security in Tropical West Africa — A dynamic-statistical modelling approach. *Erdkunde*. **2008**, 62 (2), 101–115. doi: 10.2307/25648102.
- [75] Mertz, O.; Mbow, C.; Nielsen, J.Ø.; Maiga, A.; Diallo, D.; Reenberg, A.; Diouf, A.; Barbier, B.; Moussa, I.B.; Zorom, M.; Ouattara, I.; Dabi, D. Climate factors play a limited role for past adaptation strategies in West Africa. *Ecology and Society*. **2010**, 15 (4), art25. doi: 10.5751/ES-03774-150425.
- [76] Kanohin, F.O.; Saley, M.B.; Aké, G.E.; Savané, I. Variabilité climatique et productions de café et cacao en zone tropicale humide : cas de la région de Daoukro (Centre-est de la Côte d’Ivoire). *International Journal of Innovation and Applied Studies*. **2012**, 1 (2), 194–215.
- [77] Aloko-N’Guessan, J.; Djako, A.; N’Guessan, K.G. Crise de l’économie de plantation et modification du paysage agraire dans l’ancienne boucle du cacao: l’exemple de Daoukro. *European Scientific Journal*. **2014**, 10 (5), 308–326.
- [78] Affou, Y.; Tano, K. La boucle du cacao en Côte d’Ivoire : une situation migratoire inversée In *Migration, changements sociaux et développement*. Quesnel, A., Vimard, P.,

- Eds.; ORSTOM: Paris, **1991**; pp 307–315.
- [79] Barrat, J.-M. Changements climatiques en Afrique de l’Ouest et Conséquences sur les eaux souterraines; 13; OSS-GICRESAIT, **2012**.
- [80] Brandt, M.; Rasmussen, K.; Peñuelas, J.; Tian, F.; Schurgers, G.; Verger, A.; Mertz, O.; Palmer, J.R.B.; Fensholt, R. Human population growth offsets climate-driven increase in woody vegetation in sub-Saharan Africa. *Nature Ecology and Evolution*. **2017**, 1 (4), 0081. doi: 10.1038/s41559-017-0081.
- [81] Brandt, M.; Hiernaux, P.; Rasmussen, K.; Mbow, C.; Kergoat, L.; Tagesson, T.; Ibrahim, Y.Z.; Wélé, A.; Tucker, C.J.; Fensholt, R. Assessing woody vegetation trends in Sahelian drylands using MODIS based seasonal metrics. *Remote Sensing of Environment*. **2016**, 183, 215–225. doi: 10.1016/j.rse.2016.05.027.
- [82] Huber, S.; Fensholt, R.; Rasmussen, K. Water availability as the driver of vegetation dynamics in the African Sahel from 1982 to 2007. *Global and Planetary Change*. **2011**, 76 (3–4), 186–195. doi: 10.1016/j.gloplacha.2011.01.006.
- [83] Kouassi, A.M.; Kouamé, K.F.; Ahoussi, K.E.; Oularé, S.; Biemi, J. Impacts conjugués des changements climatiques et des pressions anthropiques sur les modifications de la couverture végétale dans le bassin versant du N’Zi-Bandama (Côte d’Ivoire). *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*. **2012**, 20, 124–146.
- [84] BNETD. Réalisation d’une étude sur : identification, analyse et cartographie des causes de la déforestation et de la dégradation des forêts en Côte d’Ivoire; Bureau National d’Etudes Techniques et de Développement (BNETD): Abidjan, Côte d’Ivoire, **2016**.
- [85] Kouassi, J.-L. Suivi de la dynamique de l’occupation du sol à l’aide de l’imagerie satellitaire et des Systèmes d’Informations Géographiques : Cas de la Direction Régionale des Eaux et Forêts de Yamoussoukro (Côte d’Ivoire), Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny: Yamoussoukro, Côte d’Ivoire, **2014**.
- [86] FAO. Situation des forêts du monde; FAO: Rome, Italy, **2011**.
- [87] Servat, E.; Paturel, J.-E.; Kouame, B.; Travaglio, M.; Ouedraogo, M.; Boyer, J.-F.; Lubes-Niel, H.; Fritsch, J.-M.; Masson, J.-M.; Marieu, B. Identification, caractérisation et conséquences d’une variabilité hydrologique en Afrique de l’ouest et centrale In *Water Resources Variability in Africa during the XXth Century*. IAHS Publication: Abidjan, **1998**; pp 323–337.
- [88] Fofana, O.; Kouassi, E.A.; Avy, S.K. Cartographie et identification des activités sources de nuisances et de pollutions dans le bassin versant du barrage du Kan de Bouake (Côte d’Ivoire). *European Scientific Journal*. **2017**, 13 (5), 303–316.
- [89] Sircoulon, J. Variation des débits des cours d’eau et des niveaux des lacs en Afrique de l’Ouest depuis le début du 20^e siècle = variation of river discharges and lake levels in West Africa since the beginning of the twentieth century In *The influence of climate change and climatic variability on the hydrologic regime and water resources*. IASH: Vancouver, **1987**; pp 13–25.
- [90] Mahe, G.; Olivry, J.C.; Servat, E. Sensibilité des cours d’eau ouest-africains aux changements climatiques et environnementaux: extrêmes et paradoxes In *Regional Hydrological Impacts of Climatic Change - Hydroclimatic Variability*. IASH: Foz do

- Iguaçu, Brazil, **2005**; pp 169–177.
- [91] Olivry, J.-C.; Bricquet, J.P.; Mahe, G. Variabilité de la puissance des crues des grands cours d'eau d'Afrique intertropicale et incidence de la baisse des écoulements de base au cours des deux dernières décennies In *Water Resources Variability in Africa during the XXth Century*. IASH: Abidjan, Côte d'Ivoire, **1998**; pp 189–197.
- [92] Benhin, J.K.A.; Barbier, E.B. Structural Adjustment Programme, deforestation and biodiversity loss in Ghana. *Environmental and Resource Economics*. **2004**, 27 (3), 337–366. doi: 10.1023/B:EARE.0000017653.15107.0f.
- [93] Fried, J.S.; Torn, M.S.; Mills, E. The Impact of Climate Change on Wildfire Severity: A Regional Forecast for Northern California. *Climatic Change*. **2004**, 64 (1/2), 169–191. doi: 10.1023/B:CLIM.0000024667.89579.ed.
- [94] OMS; OMM; PNUE. Changement climatique et santé humaine – Risques et mesures à prendre. Résumé; Organisation Mondiale de la Santé (OMS): Geneve, Suisse, **2004**.
- [95] Cissé, G.; Koné, B.; Bâ, H.; Mbaye, I.; Koba, K.; Utzinger, J.; Tanner, M. Ecohealth and Climate Change: Adaptation to Flooding Events in Riverside Secondary Cities, West Africa In *Resilient Cities*. doi: 10.1007/978-94-007-0785-6_6; Springer Netherlands: Dordrecht, **2011**; pp 55–67.
- [96] Drouet, E. Changement climatique : quels effets sur notre santé ? In *Encyclopédie de l'Environnement*. **2019**.
- [97] Moore, S.M.; Azman, A.S.; Zaitchik, B.F.; Mintz, E.D.; Brunkard, J.; Legros, D.; Hill, A.; McKay, H.; Luquero, F.J.; Olson, D.; Lessler, J. El Niño and the shifting geography of cholera in Africa. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. **2017**, 114 (17), 4436–4441. doi: 10.1073/pnas.1617218114.
- [98] Bassa, F.K.; Ouattara, M.; Silué, K.D.; Adiossan, L.G.; Baikoro, N.; Koné, S.; N'Cho, M.; Traoré, M.; Bonfoh, B.; Utzinger, J.; N'Goran, E.K. Epidemiology of malaria in the Taabo health and demographic surveillance system, south-central Côte d'Ivoire. *Malaria Journal*. **2016**, 15 (1), 9. doi: 10.1186/s12936-015-1076-6.
- [99] M'Bra, R.K.; Kone, B.; Soro, D.P.; N'krumah, R.T.A.S.; Soro, N.; Ndione, J.A.; Sy, I.; Ceccato, P.; Ebi, K.L.; Utzinger, J.; Schindler, C.; Cissé, G. Impact of climate variability on the transmission risk of malaria in northern Côte d'Ivoire. *PLOS ONE*. **2018**, 13 (6), e0182304. doi: 10.1371/journal.pone.0182304.
- [100] Gbalégba, C.G.N.; Ba, H.; Silué, K.D.; Ba, O.; Tia, E.; Chouaibou, M.; Tian-Bi, N.T.Y.; Yapi, G.Y.; Koné, B.; Utzinger, J.; Koudou, B.G. Distribution of Plasmodium spp. infection in asymptomatic carriers in perennial and low seasonal malaria transmission settings in West Africa. *Infectious Diseases of Poverty*. **2018**, 7 (1), 39. doi: 10.1186/s40249-018-0412-9.
- [101] Coulibaly, G.; Ouattara, M.; Dongo, K.; Hürlimann, E.; Bassa, F.K.; Koné, N.; Essé, C.; Yapi, R.B.; Bonfoh, B.; Utzinger, J.; Raso, G.; N'Goran, E.K. Epidemiology of intestinal parasite infections in three departments of south-central Côte d'Ivoire before the implementation of a cluster-randomised trial. *Parasite Epidemiology and Control*. **2018**, 3 (2), 63–76. doi: 10.1016/j.parepi.2018.02.003.
- [102] Sultan, B.; Labadi, K.; Guégan, J.-F.; Janicot, S. Climate Drives the Meningitis

- Epidemics Onset in West Africa. *PLoS Medicine*. **2005**, 2 (1), e6. doi: 10.1371/journal.pmed.0020006.
- [103] Besancenot, J.P.; Boko, M.; Oke, P.C. Weather conditions and cerebrospinal meningitis in Benin (gulf of Guinea, West Africa). *European Journal of Epidemiology*. **1997**, 13 (7), 807–815. doi: 10.1023/A:1007365919013.
- [104] Okeke, I.N. Diarrheagenic *Escherichia coli* in sub-Saharan Africa: Status, Uncertainties and Necessities. *The Journal of Infection in Developing Countries*. **2010**, 3 (11) doi: 10.3855/jidc.586.
- [105] Effler, P.; Isaäcson, M.; Arntzen, L.; Heenan, R.; Canter, P.; Barrett, T.; Lee, L.; Mambo, C.; Levine, W.; Zaidi, A.; Griffin, P.M. Factors contributing to the emergence of *Escherichia coli* O157 in Africa. *Emerging Infectious Diseases*. **2001**, 7 (5), 812–819. doi: 10.3201/eid0705.017507.
- [106] Mweu, E.; English, M. Typhoid fever in children in Africa. *Tropical Medicine & International Health*. **2008**, 13 (4), 532–540. doi: 10.1111/j.1365-3156.2008.02031.x.
- [107] Kim, J.-H.; Mogasale, V.; Im, J.; Ramani, E.; Marks, F. Updated estimates of typhoid fever burden in sub-Saharan Africa. *The Lancet Global Health*. **2017**, 5 (10), e969. doi: 10.1016/S2214-109X(17)30328-5.
- [108] Omoleke, S.A.; Mohammed, I.; Saidu, Y. Ebola viral disease in West Africa: a threat to global health, economy and political stability. *Journal of Public Health in Africa*. **2016**, 7 (1) doi: 10.4081/jphia.2016.534.
- [109] Constantin de Magny, G.; Guégan, J.-F.; Petit, M.; Cazelles, B. Regional-scale climate-variability synchrony of cholera epidemics in West Africa. *BMC Infectious Diseases*. **2007**, 7 (1), 20. doi: 10.1186/1471-2334-7-20.
- [110] Plana, E.; Font, M.; Serra, M.; Chauvin, S.; Gladiné, J. Les incendies en forêt, guide pour les journalistes et les médias, Edition CT.; Projet eFIRECOM, **2016**.
- [111] Otsuka, M.; Razafimahatratra, M.; Andrianandrasana, O. Manuel sur la lutte contre les feux de végétation : Compilation du savoir-faire actuel; Ministère de l'Environnement, des Eaux et Forêts & Agence japonaise de Coopération Internationale: Antananarivo, Madagascar, **2003**.
- [112] Broucke, S. État de l'Art sur la détermination du régime du feu par des moyens de Télédétection In *Rapport sur l'évaluation du régime du feu par des moyens de télédétection et qualification des données*. **2009**; p 14.
- [113] Johnson, E.A.; Gutsell, S.L. Fire frequency models, methods, and interpretations. *Advances in Ecological Research*. **1994**, 25, 239–287.
- [114] Sousa, W.P. The Role of disturbance in natural communities. *Annual Review of Ecology and Systematics*. **1984**, 15 (1), 353–391. doi: 10.1146/annurev.es.15.110184.002033.
- [115] Merrill, D.F.; Alexander, M.E. Glossary of forest fire management terms; Canadian Interagency Forest Fire Centre: Winnipeg, Canada, **2003**.
- [116] Monnier, Y. La poussière et la cendre : paysages, dynamique des formations végétales et stratégies des sociétés en Afrique de l'Ouest, 2e éd.; Ministère de la Coopération et du

- Développement: Paris, France, **1990**.
- [117] Sonko, I. Etudes des effets de différents régimes de feux sur la dynamique de la flore et de la végétation ligneuses de plateaux du Parc National du Niokolo-Koba (Sud-est du Senegal); Dakar, Senegal, **2000**.
- [118] Mbow, C.; Sambou, B.; Ba, A.T.; Goudiaby, A. Vegetation and fire readiness in main morphological units of Niokolo Koba National Park (Southeast Senegal). *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography*. **2003**, *103* (1), 55–62. doi: 10.1080/00167223.2003.10649479.
- [119] Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD). Plans de prévention des risques naturels (PPR) - Risques d'incendies de forêt - Guide méthodologique; La Documentation Française: Paris, France, **2002**.
- [120] Darwich, T.; Assaker, A.; Faour, G.; Noun, M.; Poupet, P.; Harfouche, R. Utilisation de la télédétection et des techniques SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques de feux de forêts dans le bassin versant du Nahr Ibrahim In *Du Mont Liban aux Sierras d'Espagne. Sols, eau et sociétés en montagne*. Harfouche, R., Poupet, P., Eds.; **2015**; pp 137–146.
- [121] Yao, N.; Landmann, T.; Schmidt, M.; Konaté, S.; Dech, S.; Linsenmair, K.E. Le feu comme agent pour la structure végétale & la diversité In *Atlas de la Biodiversité de l'Afrique de l'Ouest, Tome III : Côte d'Ivoire*. Konaté, S., Kampmann, D., Eds.; Abidjan & Frankfurt/ Main, Côte d'Ivoire, **2010**; pp 64–75.
- [122] Bowman, D.M.J.S.; Balch, J.; Artaxo, P.; Bond, W.J.; Cochrane, M.A.; D'Antonio, C.M.; Defries, R.; Johnston, F.H.; Keeley, J.E.; Krawchuk, M.A.; Kull, C.A.; Mack, M.; Moritz, M.A.; Pyne, S.; Roos, C.I.; Scott, A.C.; Sodhi, N.S.; Swetnam, T.W. The human dimension of fire regimes on Earth. *Journal of Biogeography*. **2011**, *38* (12), 2223–2236. doi: 10.1111/j.1365-2699.2011.02595.x. En ligne : <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1365-2699.2011.02595.x> (visité le 1 January 2018).
- [123] Archibald, S.; Staver, A.C.; Levin, S.A. Evolution of human-driven fire regimes in Africa. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. **2012**, *109* (3), 847–852. doi: 10.1073/pnas.1118648109.
- [124] Rothermel, R.C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels; U.S. Department of Agriculture, Intermountain Forest and Range Experiment Station: Ogden, US, **1972**.
- [125] Courty, L. Etude de l'émission et des propriétés de combustion des composés organiques volatils potentiellement impliqués dans les feux de forêts accélérés, 2012 <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00766040/>.
- [126] Trollope, W.S.W.; de Ronde, C.; Geldenhuys, C.J. Fire behaviour In *Wildland fire management: Handbook for Sub-Sahara Africa*. Goldammer, J.G., de Ronde, C., Eds.; Global Fire Monitoring Center: Freiburg, Germany, **2004**; pp 27–59.
- [127] Cochrane, M.A.; Ryan, K.C. Fire and fire ecology: Concepts and principles In *Tropical Fire Ecology*. 10.1007/978-3-540-77381-8_2; Cochrane, M.A., Ed.; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 2009; pp 25–62.
- [128] Montes-Helu, M.C.; Kolb, T.; Dore, S.; Sullivan, B.; Hart, S.C.; Koch, G.; Hungate, B.A.

- Persistent effects of fire-induced vegetation change on energy partitioning and evapotranspiration in ponderosa pine forests. *Agricultural and Forest Meteorology*. **2009**, 149 (3–4), 491–500. doi: 10.1016/j.agrformet.2008.09.011.
- [129] Knorr, W.; Kaminski, T.; Arneth, A.; Weber, U. Impact of human population density on fire frequency at the global scale. *Biogeosciences*. **2014**, 11 (4), 1085–1102. doi: 10.5194/bg-11-1085-2014.
- [130] Boubeta, M.; Lombardía, M.J.; González-Manteiga, W.; Marey-Pérez, M.F. Burned area prediction with semiparametric models. *International Journal of Wildland Fire*. **2016**, 25 (6), 669–678. doi: 10.1071/WF15125.
- [131] Denman, K.L.; Brasseur, G.; Chidthaisong, A.; Ciais, P.; Cox, P.M.; Dickinson, R.E.; Hauglustaine, D.; Heinze, C.; Holland, E.; Jacob, D.; Lohmann, U.; Ramachandran, S.; da Silva Dias, P.L.; Wofsy, S.C.; Zhang, X. Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, **2007**; pp 499–587.
- [132] Bowman, D.M.J.S.; Balch, J.K.; Artaxo, P.; Bond, W.J.; Carlson, J.M.; Cochrane, M.A.; D’Antonio, C.M.; DeFries, R.S.; Doyle, J.C.; Harrison, S.P.; Johnston, F.H.; Keeley, J.E.; Krawchuk, M.A.; Kull, C.A.; Marston, J.B.; Moritz, M.A.; Prentice, I.C.; Roos, C.I.; Scott, A.C.; Swetnam, T.W.; Van Der Werf, G.R.; Pyne, S.J. Fire in the earth system. *Science*. **2009**, 324 (5926), 481–484. doi: 10.1126/science.1163886.
- [133] Bellassen, V.; Crassous, R.; Dietzsch, L.; Schwartzman, S. Réduction des émissions dues à la déforestation et à la dégradation des forêts: quelle contribution de la part des marchés du carbone? *Etude Climat*. **2008**, 14 (202), 43.
- [134] Cochrane, M.A. Fire science for rainforests. *Nature*. **2003**, 421 (6926), 913–919. doi: 10.1038/nature01437.
- [135] van der Werf, G.R.; Morton, D.C.; DeFries, R.S.; Olivier, J.G.J.; Kasibhatla, P.S.; Jackson, R.B.; Collatz, G.J.; Randerson, J.T. CO₂ emissions from forest loss. *Nature Geoscience*. **2009**, 2 (11), 737–738. doi: 10.1038/ngeo671.
- [136] Goldammer, J.G. Fire ecology of the recent anthropocene In *Earth System Science in the Anthropocene*. doi: 10.1007/3-540-26590-2_8; Ehlers, E., Krafft, T., Eds.; Springer Berlin Heidelberg, **2006**; pp 63–85.
- [137] de Ronde, C.; Trollope, W.S.W.; Parr, C.L.; Brockett, B.; Geldenhuys, C.J. Fire effects on flora and fauna In *Wildland Fire Management Handbook for Sub-Saharan Africa*. Goldammer, J.G., de Ronde, C., Eds.; Global Fire Monitoring Center (GFMC): Freiburg, Germany, **2004**; pp 60–87.
- [138] Higgins, S.I.; Bond, W.J.; February, E.C.; Bronn, A.; Euston-Brown, D.I.W.; Enslin, B.; Govender, N.; Rademan, L.; O’Regan, S.; Potgieter, A.L.F.; Scheiter, S.; Sowry, R.; Trollope, L.; Trollope, W.S.W. Effects of four decades of fire manipulation on woody vegetation structure in savanna. *Ecology*. **2007**, 88 (5), 1119–1125. doi: 10.1890/06-1664.

- [139] Le Page, Y.; Oom, D.; Silva, J.M.N.; Jönsson, P.; Pereira, J.M.C. Seasonality of vegetation fires as modified by human action: observing the deviation from eco-climatic fire regimes. *Global Ecology and Biogeography*. **2010** doi: 10.1111/j.1466-8238.2010.00525.x.
- [140] Gignoux, J.; Clobert, J.; Menaut, J.-C. Alternative fire resistance strategies in savanna trees. *Oecologia*. **1997**, *110* (4), 576–583. doi: 10.1007/s004420050198.
- [141] Razanamandranto, S.; Tigabu, M.; Sawadogo, L.; Odén, P.C. Seed germination of eight savanna-woodland species from West Africa in response to different cold smoke treatments. *Seed Science and Technology*. **2005**, *33* (2), 315–328. doi: 10.15258/sst.2005.33.2.05.
- [142] Moreira, B.; Pausas, J.G. Tanned or burned: The role of fire in shaping physical seed dormancy. *PLoS ONE*. **2012**, *7* (12), e51523. doi: 10.1371/journal.pone.0051523.
- [143] Barlow, J.; Silveira, J.M. The consequences of fire for the fauna of humid tropical forests In *Tropical Fire Ecology*. doi: 10.1007/978-3-540-77381-8_19; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, **2009**; pp 543–556.
- [144] Certini, G. Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia*. **2005**, *143* (1), 1–10. doi: 10.1007/s00442-004-1788-8.
- [145] Geldenhuys, C.J.; van Wilgen, B.W.; Bond, W.J.; van de Vijver, C.A.D.M.; de Ronde, C. Fire effects on the maintenance of biodiversity, soil and nutrients In *Wildland Fire Management Handbook for Sub-Saharan Africa*. Goldammer, J.G., de Ronde, C., Eds.; Global Fire Monitoring Center (GFMC): Freiburg, Germany, **2004**; pp 88–113.
- [146] Bruzon, Y. Les pratiques du feu en Afrique subhumide : exemples des milieux savannicoles de la Centrafrique et de la Côte d’Ivoire In *Dynamique des systèmes agraires, France*. Blanc-Pamard, C., Boutrais, J., Eds.; ORSTOM: Paris, **1994**; pp 147–162.
- [147] Durrieu de Madron, L.; Gbalet, P.E.; Balou Bi, T. Gestion durable des ressources forestières; BNETD: Abidjan, Côte d’Ivoire, **2015**.
- [148] MINEF. Attribution et organisation du Ministère des Eaux et Forêts. En ligne : <http://www.eauxetforets.gouv.ci/index.php/minef/attribution-et-organisation> (visité le 18/03/2018).
- [149] FAO. Guidelines on Fire Management in Temperate and Boreal Forests; Forest Protection Working Papers, Working Paper FP/1/E.; Forest Resources Development Service, Forest Resources Division. FAO: Rome, Italy, **2002**.
- [150] Flasse, S.I.; Trigg, S.N.; Ceccato, P.N.; Perryman, A.H.; Brockett, B.H.; Frost, P.E.; Roux, J.L. Remote sensing of vegetation fires and its contribution to a fire management information system In *Wildland Fire Management Handbook for Sub-Saharan Africa*. Goldammer, J.G., de Ronde, C., Eds.; Global Fire Monitoring Center (GFMC): Freiburg, Germany, **2004**; pp 158–211.
- [151] Kana, C.E.; Etouna, J.E. Apport de trois méthodes de détection des surfaces brûlées par imagerie Landsat ETM+: Application au contact forêt-savane du Cameroun. *CyberGeo*. **2006**, *2006*, 1–16. doi: 10.4000/cybergeog.2711.

- [152] Kaufman, Y.J.; Justice, C.O.; Flynn, L.P.; Kendall, J.D.; Prins, E.M.; Giglio, L.; Ward, D.E.; Menzel, W.P.; Setzer, A.W. Potential global fire monitoring from EOS-MODIS. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. **1998**, *103* (D24), 32215–32238. doi: 10.1029/98JD01644.
- [153] Schroeder, W.; Oliva, P.; Giglio, L.; Csiszar, I.A. The New VIIRS 375m active fire detection data product: Algorithm description and initial assessment. *Remote Sensing of Environment*. **2014**, *143*, 85–96. doi: 10.1016/j.rse.2013.12.008.
- [154] Giglio, L.; Schroeder, W.; Justice, C.O. The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products. *Remote Sensing of Environment*. **2016**, *178*, 31–41. doi: 10.1016/j.rse.2016.02.054.
- [155] Giglio, L.; Boschetti, L.; Roy, D.P.; Humber, M.L.; Justice, C.O. The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product. *Remote Sensing of Environment*. **2018**, *217*, 72–85. doi: 10.1016/j.rse.2018.08.005.
- [156] Giglio, L.; Justice, C.; Boschetti, L.; Roy, D. MCD64A1 MODIS/Terra + Aqua Burned Area Monthly L3 Global 500m SIN Grid V006; NASA EOSDIS Land Processes DAAC: Sioux Falls, South Dakota, **2015**.
- [157] Giglio, L.; Boschetti, L.; Roy, D.; Hoffmann, A.A.; Humber, M. Collection 6 MODIS Burned Area Product User's Guide - Version 1.0; NASA EOSDIS Land Processes DAAC: Sioux Falls, South Dakota, **2016**.
- [158] Boschetti, L.; Roy, D.; Hoffmann, A.A.; Humber, M. MODIS Collection 5 Burned Area Product MCD45, version 3.; **2008**; Vol. Version 1.
- [159] Gueguim, C.D.; Tchamba, N.M.; Fotso, C.R. Dynamique spatio-temporelle des feux de brousse dans le Parc National du Mbam et Djerem (Cameroun). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*. **2018**, *12* (2), 728–748. doi: 10.4314/ijbcs.v12i2.10.
- [160] Scholes, R.J. Greenhouse gas emissions from vegetation fires in Southern Africa. *Environmental Monitoring and Assessment*. **1995**, *38–38* (2–3), 169–179. doi: 10.1007/BF00546761.
- [161] Bowman, D.M.J.S.; Zhang, Y.; Walsh, A.; Williams, R.J. Experimental comparison of four remote sensing techniques to map tropical savanna fire-scars using Landsat-TM imagery. *International Journal of Wildland Fire*. **2003**, *12* (4), 341. doi: 10.1071/WF03030.
- [162] Isichei, A.O.; Muoghalu, J.I.; Akeredolu, F.A.; Afolabi, O.A. Fuel characteristics and emissions from biomass burning and land-use change in Nigeria. *Environmental Monitoring and Assessment*. **1995**, *38–38* (2–3), 279–289. doi: 10.1007/BF00546769.
- [163] Quintano, C.; Fernández-Manso, A.; Fernández-Manso, O.; Shimabukuro, Y.E. Mapping burned areas in Mediterranean countries using spectral mixture analysis from a uni-temporal perspective. *International Journal of Remote Sensing*. **2006**, *27* (4), 645–662. doi: 10.1080/01431160500212195.
- [164] Henry, M.C. Comparison of single- and multi-date Landsat data for mapping wildfire scars in Ocala National Forest, Florida. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. **2008**, *74* (7), 881–891. doi: 10.14358/PERS.74.7.881.

- [165] Eva, H.; Lambin, E.F. Burnt area mapping in Central Africa using ATSR data. *International Journal of Remote Sensing*. **1998**, *19* (18), 3473–3497. doi: 10.1080/014311698213768.
- [166] Salvador, R.; Valeriano, J.; Pons, X.; Diaz-Delgado, R. A semi-automatic methodology to detect fire scars in shrubs and evergreen forests with Landsat MSS time series. *International Journal of Remote Sensing*. **2000**, *21* (4), 655–671. doi: 10.1080/014311600210498.
- [167] Mataveli, G.A.V.; Silva, M.E.S.; Pereira, G.; da Silva Cardozo, F.; Kawakubo, F.S.; Bertani, G.; Costa, J.C.; de Cássia Ramos, R.; da Silva, V.V. Satellite observations for describing fire patterns and climate-related fire drivers in the Brazilian savannas. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. **2018**, *18* (1), 125–144. doi: 10.5194/nhess-18-125-2018.
- [168] Moreira de Araújo, F.; Ferreira, L.G.; Arantes, A.E. Distribution patterns of burned areas in the Brazilian biomes: An analysis based on satellite data for the 2002–2010 period. *Remote Sensing*. **2012**, *4* (7), 1929–1946. doi: 10.3390/rs4071929.
- [169] Moreira de Araújo, F.; Ferreira, L.G. Satellite-based automated burned area detection: A performance assessment of the MODIS MCD45A1 in the Brazilian savanna. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. **2015**, *36*, 94–102. doi: 10.1016/j.jag.2014.10.009.
- [170] Libonati, R.; DaCamara, C.; Setzer, A.; Morelli, F.; Melchiori, A. An Algorithm for Burned Area Detection in the Brazilian Cerrado Using 4 μm MODIS Imagery. *Remote Sensing*. **2015**, *7* (11), 15782–15803. doi: 10.3390/rs71115782.
- [171] Archibald, S.; Nickless, A.; Govender, N.; Scholes, R.J.; Lehsten, V. Climate and the inter-annual variability of fire in southern Africa: a meta-analysis using long-term field data and satellite-derived burnt area data. *Global Ecology and Biogeography*. **2010**, *19* (6), 794–809. doi: 10.1111/j.1466-8238.2010.00568.x.
- [172] Devineau, J.L.; Fournier, A.; Nignan, S. Savanna fire regimes assessment with MODIS fire data: Their relationship to land cover and plant species distribution in western Burkina Faso (West Africa). *Journal of Arid Environments*. **2010**, *74* (9), 1092–1101. doi: 10.1016/j.jaridenv.2010.03.009.
- [173] Kusangaya, S.; Sithole, V. Remote sensing-based fire frequency mapping in a savannah rangeland. *South African Journal of Geomatics*. **2015**, *4* (1), 36. doi: 10.4314/sajg.v4i1.3.
- [174] Andela, N.; van der Werf, G.R. Recent trends in African fires driven by cropland expansion and El Niño to La Niña transition. *Nature Climate Change*. **2014**, *4* (9), 791–795. doi: 10.1038/nclimate2313.
- [175] van der Werf, G.R.; Randerson, J.T.; Giglio, L.; Gobron, N.; Dolman, A.J. Climate controls on the variability of fires in the tropics and subtropics. *Global Biogeochemical Cycles*. **2008**, *22* (3), 1–13. doi: 10.1029/2007GB003122.
- [176] Haines, D.A.; Main, W.A.; Frost, J.S.; Simard, A.J. Fire-danger rating and wildfire occurrence in the Northeastern United States. *Forest Science*. **1983**, *29* (4), 679–696. doi: 10.1093/forestscience/29.4.679.
- [177] Haines, D.; Main, W.; Johnson, V. Relation between the U.S. National Fire Danger

- Rating System spread component and fire activity in the lake States; St. Paul, MN, USA, **1970**.
- [178] Viedma, O.; Angeler, D.G.; Moreno, J.M. Landscape structural features control fire size in a Mediterranean forested area of central Spain. *International Journal of Wildland Fire*. **2009**, *18* (5), 575. doi: 10.1071/WF08030.
- [179] Ordóñez, C.; Saavedra, A.; Rodríguez-Pérez, J.R.; Castedo-Dorado, F.; Covián, E. Using model-based geostatistics to predict lightning-caused wildfires. *Environmental Modelling & Software*. **2012**, *29* (1), 44–50. doi: 10.1016/j.envsoft.2011.10.004.
- [180] Vasconcelos, M.J.P.; Silva, S.; Tomé, M.; Alvim, M.; Pereira, J.M.C. Spatial prediction of fire ignition probabilities: comparing logistic regression and neural network. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. **2001**, *67* (1), 73–81.
- [181] Preisler, H.K.; Westerling, A.L. Statistical model for forecasting monthly large wildfire events in Western United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. **2007**, *46* (7), 1020–1030. doi: 10.1175/JAM2513.1.
- [182] Martínez, J.; Vega-García, C.; Chuvieco, E. Human-caused wildfire risk rating for prevention planning in Spain. *Journal of Environmental Management*. **2009**, *90* (2), 1241–1252. doi: 10.1016/j.jenvman.2008.07.005.
- [183] Catry, F.X.; Rego, F.C.; Bação, F.L.; Moreira, F. Modeling and mapping wildfire ignition risk in Portugal. *International Journal of Wildland Fire*. **2009**, *18* (8), 921. doi: 10.1071/WF07123.
- [184] Chuvieco, E.; Aguado, I.; Yebra, M.; Nieto, H.; Salas, J.; Martín, M.P.; Vilar, L.; Martínez, J.; Martín, S.; Ibarra, P.; de la Riva, J.; Baeza, J.; Rodríguez, F.; Molina, J.R.; Herrera, M.A.; Zamora, R. Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies. *Ecological Modelling*. **2010**, *221* (1), 46–58. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2008.11.017.
- [185] Padilla, M.; Vega-García, C. On the comparative importance of fire danger rating indices and their integration with spatial and temporal variables for predicting daily human-caused fire occurrences in Spain. *International Journal of Wildland Fire*. **2011**, *20* (1), 46. doi: 10.1071/WF09139.
- [186] Verdú, F.; Salas, J.; Vega-García, C. A multivariate analysis of biophysical factors and forest fires in Spain, 1991 - 2005. *International Journal of Wildland Fire*. **2012**, *21* (5), 498. doi: 10.1071/WF11100.
- [187] Chas-Amil, M.L.; Prestemon, J.P.; McClean, C.J.; Touza, J. Human-ignited wildfire patterns and responses to policy shifts. *Applied Geography*. **2015**, *56*, 164–176. doi: 10.1016/j.apgeog.2014.11.025.
- [188] Mandallaz, D.; Ye, R. Prediction of forest fires with Poisson models. *Canadian Journal of Forest Research*. **1997**, *27* (10), 1685–1694. doi: 10.1139/x97-103.
- [189] Liu, D.; Zhang, Y. Research of regional forest fire prediction method based on multivariate linear regression. *International Journal of Smart Home*. **2015**, *9* (1), 13–22. doi: 10.14257/ijsh.2015.9.1.02.
- [190] Marchal, J.; Cumming, S.G.; McIntire, E.J.B. Exploiting Poisson additivity to predict

- fire frequency from maps of fire weather and land cover in boreal forests of Québec, Canada. *Ecography*. **2017**, *40* (1), 200–209. doi: 10.1111/ecog.01849.
- [191] Papakosta, P.; Straub, D. Probabilistic prediction of daily fire occurrence in the Mediterranean with readily available spatio-temporal data. *IForest - Biogeosciences and Forestry*. **2017**, *10* (1), 32–40. doi: 10.3832/ifor1686-009.
- [192] Boubeta, M.; Lombardía, M.J.; Marey-Pérez, M.F.; Morales, D. Prediction of forest fires occurrences with area-level Poisson mixed models. *Journal of Environmental Management*. **2015**, *154*, 151–158. doi: 10.1016/j.jenvman.2015.02.009.
- [193] Serra, P.; Pons, X.; Saurí, D. Land-cover and land-use change in a Mediterranean landscape: A spatial analysis of driving forces integrating biophysical and human factors. *Applied Geography*. **2008**, *28* (3), 189–209. doi: 10.1016/j.apgeog.2008.02.001.
- [194] Argañaraz, J.P.; Gavier Pizarro, G.; Zak, M.; Landi, M.A.; Bellis, L.M. Human and biophysical drivers of fires in Semiarid Chaco mountains of Central Argentina. *Science of The Total Environment*. **2015**, *520*, 1–12. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.02.081.
- [195] Sitanggang, I.S.; Yaakob, R.; Mustapha, N.; Ainuddin, A.N. Predictive models for hotspots occurrence using Decision Tree Algorithms and Logistic Regression. *Journal of Applied Sciences*. **2013**, *13* (2), 252–261. doi: 10.3923/jas.2013.252.261.
- [196] Amatulli, G.; Rodrigues, M.J.; Trombetti, M.; Lovreglio, R. Assessing long-term fire risk at local scale by means of decision tree technique. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. **2006**, *111* (G4) doi: 10.1029/2005JG000133.
- [197] Vilar, L.; Woolford, D.G.; Martell, D.L.; Martín, M.P. A model for predicting human-caused wildfire occurrence in the region of Madrid, Spain. *International Journal of Wildland Fire*. **2010**, *19* (3), 325. doi: 10.1071/WF09030.
- [198] Loepfe, L.; Rodrigo, A.; Lloret, F. Two thresholds determine climatic control of forest-fire size in Europe. *Biogeosciences Discussions*. **2012**, *9* (7), 9065–9089. doi: 10.5194/bgd-9-9065-2012.
- [199] Ruiz-Mirazo, J.; Martínez-Fernández, J.; Vega-García, C. Pastoral wildfires in the Mediterranean: Understanding their linkages to land cover patterns in managed landscapes. *Journal of Environmental Management*. **2012**, *98*, 43–50. doi: 10.1016/j.jenvman.2011.12.017.
- [200] Rodrigues, M.; de la Riva, J.; Fotheringham, S. Modeling the spatial variation of the explanatory factors of human-caused wildfires in Spain using geographically weighted logistic regression. *Applied Geography*. **2014**, *48*, 52–63. doi: 10.1016/j.apgeog.2014.01.011.
- [201] Penman, T.D.; Nicholson, A.E.; Bradstock, R.A.; Collins, L.; Penman, S.H.; Price, O.F. Reducing the risk of house loss due to wildfires. *Environmental Modelling & Software*. **2015**, *67*, 12–25. doi: 10.1016/j.envsoft.2014.12.020.
- [202] Vega Orozco, C.; Tonini, M.; Conedera, M.; Kanveski, M. Cluster recognition in spatial-temporal sequences: the case of forest fires. *GeoInformatica*. **2012**, *16* (4), 653–673. doi: 10.1007/s10707-012-0161-z.
- [203] Romero-Calcerrada, R.; Barrio-Parra, F.; Millington, J.D.A.; Novillo, C.J. Spatial

- modelling of socioeconomic data to understand patterns of human-caused wildfire ignition risk in the SW of Madrid (central Spain). *Ecological Modelling*. **2010**, 221 (1), 34–45. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2009.08.008.
- [204] Rohde, D.; Corcoran, J.; Chhetri, P. Spatial forecasting of residential urban fires: A Bayesian approach. *Computers, Environment and Urban Systems*. **2010**, 34 (1), 58–69. doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2009.09.001.
- [205] Schoenberg, F.P.; Pompa, J.; Chang, C.-H. A note on non-parametric and semi-parametric modeling of wildfire hazard in Los Angeles County, California. *Environmental and Ecological Statistics*. **2009**, 16 (2), 251–269. doi: 10.1007/s10651-007-0087-z.
- [206] Schroeder, M.J. Critical fire weather patterns in the conterminous United States; Washington, DC, USA, **1969**.
- [207] Podur, J.; Martell, D.L.; Knight, K. Statistical quality control analysis of forest fire activity in Canada. *Canadian Journal of Forest Research*. **2002**, 32 (2), 195–205. doi: 10.1139/x01-183.
- [208] Crimmins, M.A.; Comrie, A.C. Interactions between antecedent climate and wildfire variability across south-eastern Arizona. *International Journal of Wildland Fire*. **2004**, 13 (4), 455. doi: 10.1071/WF03064.
- [209] Shahwan, T.; Odening, M. Forecasting agricultural commodity prices using hybrid neural networks In *Computational Intelligence in Economics and Finance*. 10.1007/978-3-540-72821-4_3; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, **2007**; pp 63–74.
- [210] Zhang, G.P. Time series forecasting using a hybrid ARIMA and neural network model. *Neurocomputing*. **2003**, 50, 159–175. doi: 10.1016/S0925-2312(01)00702-0.
- [211] Khandelwal, I.; Adhikari, R.; Verma, G. Time Series Forecasting Using Hybrid ARIMA and ANN Models Based on DWT Decomposition. *Procedia Computer Science*. **2015**, 48, 173–179. doi: 10.1016/j.procs.2015.04.167.
- [212] Box, G.E.P.; Jenkins, G. Time series analysis: forecasting and control; Holden-Day: San Francisco, CA, USA, **1970**.
- [213] McKenzie, E. General exponential smoothing and the equivalent arma process. *Journal of Forecasting*. **1984**, 3 (3), 333–344. doi: 10.1002/for.3980030312.
- [214] Miller, J.D.; Safford, H.D.; Crimmins, M.; Thode, A.E. Quantitative evidence for increasing forest fire severity in the Sierra Nevada and Southern Cascade Mountains, California and Nevada, USA. *Ecosystems*. **2009**, 12 (1), 16–32. doi: 10.1007/s10021-008-9201-9.
- [215] Taylor, A.H.; Scholl, A.E. Climatic and human influences on fire regimes in mixed conifer forests in Yosemite National Park, USA. *Forest Ecology and Management*. **2012**, 267, 144–156. doi: 10.1016/j.foreco.2011.11.026.
- [216] Viganó, H.H. da G.; Souza, C.C. de; Reis Neto, J.F.; Cristaldo, M.F.; Jesus, L. de. Prediction and modeling of forest fires in the Pantanal. *Revista Brasileira de Meteorologia*. **2018**, 33 (2), 306–316. doi: 10.1590/0102-7786332012.

- [217] Hamilton, J.D. Time series analysis; Princeton University Press: Princeton, New Jersey, USA, **1994**.
- [218] Hyndman, R.J.; Athanasopoulos, G. Forecasting: principles and practice, 2nd ed.; OTexts: Melbourne, Austria, **2018**.
- [219] Sakulkitbanjong, K.; Pongchavalit, C.; Garivait, S. Time series analysis and forecasting of forest fire weather In *98th The IIER International Conference*. Pattaya, Thailand, **2017**; pp 6–12.
- [220] Shumway, R.H.; Stoffer, D.S. Time series analysis and its applications; Springer Texts in Statistics; Springer International Publishing: Cham, **2017**.
- [221] Desbois, D. Une introduction à la méthodologie de Box et Jenkins : l'utilisation de modèles ARIMA avec SPSS. *Revue Moulad*. **2006**, *33*, 1–24.
- [222] Mbaye, B.B.; Sene, S.M. Analyse et prévision des séries temporelles par la méthode Box & Jenkins; Dakar, **2007**.
- [223] Johnston, J.; Dinardo, J. Méthodes économétriques; Economica: Paris, France, **1999**.
- [224] Avenard, J.-M.; Eldin, M.; Girard, G.; Touchebeuf, P.; Guillaumet, J.-L.; Adjanohoun, E.; Perraud, A. Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire, 50th ed.; Avenard, J.-M., Eldin, M., Girard, G., Touchebeuf, P., Guillaumet, J.-L., Adjanohoun, E., Perraud, A., Eds.; ORSTOM: Paris, France, **1971**.
- [225] Peltre, P. Héritage géomorphologique et paléoclimatique dans le tracé du contact Forêt-Savane; ORSTOM: Paris, France, **1977**.
- [226] Peel, M.C.; Finlayson, B.L.; McMahon, T.A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*. **2007**, *11* (5), 1633–1644. doi: 10.5194/hess-11-1633-2007.
- [227] Jones, A.; Breuning-Madsen, H.; Brossard, M.; Dampha, A.; Deckers, J.; Dewitte, O.; Gallali, T.; Hallett, S.; Jones, R.; Kilasara, M.; Le Roux, P.; Micheli, E.; Montanarella, L.; Spaargaren, O.; Thiombiano, L.; Van Ranst, E.; Yemefack, M.; Zougmore, R. Soil Atlas of Africa; Jones, A., Breuning-Madsen, H., Brossard, M., Dampha, A., Deckers, J., Dewitte, O., Gallali, T., Hallett, S., Jones, R., Kilasara, M., Le Roux, P., Micheli, E., Montanarella, L., Spaargaren, O., Thiombiano, L., Van Ranst, E., Yemefack, M., Zougmore, R., Eds.; European Commission, Publications Office of the European Union: Luxembourg, **2013**.
- [228] CPCS. Classification des Sols; Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols (CPCS): France, **1967**.
- [229] FAO; ISRIC; ISSS. World Reference Base for Soil Resources. World Soil Resources Report 84; FAO: Rome, Italy, **1998**.
- [230] BNETD; SEP-REDD+. Projet de surveillance spatiale des terres de la Côte d'Ivoire : Occupation du sol; Bureau National d'Etudes Techniques et de Développement (BNETD): Abidjan, Côte d'Ivoire, **2019**.
- [231] Guillaumet, J. La végétation de la Côte d'Ivoire In *Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire*. Avenard, J.-M., Eldin, M., Girard, G., Touchebeuf, P., Guillaumet, J.-L., Adjanohoun,

- E., Perraud, A., Eds.; ORSTOM: Paris, France, **1971**; pp 157–263.
- [232] Kouassi, A.M.; Okaingni, J.C.; Kouakou, K.E.; Biemi, J. Evaluation des propriétés hydrauliques des aquifères de socle cristallin et cristallophyllien: Cas de la région du N’zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d’Ivoire). *International Journal of Innovation and Applied Studies*. **2013**, 2 (1), 61–71.
- [233] INS. Recensement Général de la Population et de l’Habitat (RGPH) de 2014; Institut National de la Statistique: Abidjan, Côte d’Ivoire, **2014**.
- [234] Etienne, P. Le fait villageois Baoulé; ORSTOM: Abidjan, Côte d’Ivoire, **1971**.
- [235] Wikipedia. Groupes ethno-lingustiques de Côte d’Ivoire. En ligne : <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:IvoryCoastEthno.jpg> (visité le 12//2018).
- [236] LANCE FIRMS. Collection 6 NRT Hotspot / Active Fire Detections MCD14DL. En ligne : <https://earthdata.nasa.gov/firms> (visité le 21 June 2017).
- [237] LANCE FIRMS. NRT VIIRS 375 m Active Fire product VNP14IMGT. En ligne : <https://earthdata.nasa.gov/firms> (visité le 21/06/2017).
- [238] Hansen, M.C.; Potapov, P. V.; Moore, R.; Hancher, M.; Turubanova, S.A.; Tyukavina, A.; Thau, D.; Stehman, S. V.; Goetz, S.J.; Loveland, T.R.; Kommareddy, A.; Egorov, A.; Chini, L.; Justice, C.O.; Townshend, J.R.G. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*. **2013**, 342 (6160), 850–853. doi: 10.1126/science.1244693. En ligne : <http://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest>.
- [239] Biswas, S.; Vadrevu, K.P.; Lwin, Z.M.; Lasko, K.; Justice, C.O. Factors controlling vegetation fires in protected and non-protected areas of Myanmar. *PLoS ONE*. **2015**, 10 (4), e0124346. doi: 10.1371/journal.pone.0124346.
- [240] FAO. Global Forest Resources Assessment 2000 - Main Report; FAO Forestry Paper 140; Rome, Italy, **2001**.
- [241] Wunder, S. Forests without trees? A note on problematic forest definitions and change assessment In *12th World Forestry Congress*. FAO: Quebec City, Canada, **2003**; p 68.
- [242] NASA LP DAAC. MOD13A3: MODIS/Terra Vegetation Indices Monthly L3 Global 1km V005. **2015** doi: 10.5067/MODIS/MOD13A3.006.
- [243] Tucker, C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*. **1979**, 8 (2), 127–150. doi: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.
- [244] NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL). NASA Shuttle Radar Topography Mission DEM 1 arc second. Version 3; [Data set]. NASA LP DAAC, **2015**.
- [245] Stolle, F.; Chomitz, K.M.; Lambin, E.F.; Tomich, T.P. Land use and vegetation fires in Jambi Province, Sumatra, Indonesia. *Forest Ecology and Management*. **2003**, 179 (1–3), 277–292. doi: 10.1016/S0378-1127(02)00547-9.
- [246] Garah, K.; Chafai, C.; Abdallah, B. Évolution spatiotemporelle des écosystèmes forestiers à Pin d’Alep de l’Aurès oriental (Algérie). *Revue forestière française*. **2016**,

- 68 (3), 217–229.
- [247] National Centers for Environmental Information. Global Surface Summary of the Day - GSOD. En ligne : <https://data.noaa.gov/dataset/dataset/global-surface-summary-of-the-day-gsod> (visité le 04/01/2017).
- [248] OMM. Guide des pratiques climatologiques; Organisation Météorologique Mondiale, **2011**.
- [249] ESA. Land Cover CCI, Product User Guide Version 2.0; UCL (Université catholique de Louvain)-Geomatics, ESA CCI LC project, **2017**.
- [250] Center for International Earth Science Information Network - CIESIN - Columbia University. Gridded Population of the World, Version 4 (GPWv4): Population Density, Revision 10. Palisades, NY: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC); NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC): Palisades, NY, **2017**.
- [251] Nelson, A. Estimated travel time to the nearest city of 50,000 or more people in year 2000. *Global Environment Monitoring Unit - Joint Research Centre of the European Commission*. **2008**. En ligne : <http://forobs.jrc.ec.europa.eu/products/gam/> (visité le 24/03/2017).
- [252] Allen, R.G.; Smith, M.; Pereira, L.S.; Perrier, A. An Update for the Calculation of Reference Evapotranspiration. *ICID Bulletin*. **1994**, 43 (2), 35–92.
- [253] Bond-Lamberty, B.; Peckham, S.D.; Gower, S.T.; Ewers, B.E. Effects of fire on regional evapotranspiration in the central Canadian boreal forest. *Global Change Biology*. **2009**, 15 (5), 1242–1254. doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01776.x.
- [254] Labędzki, L.; Kanecka-Geszke, E. Estimation of reference evapotranspiration using the FAO Penman-Monteith Method for climatic conditions of Poland In *Evapotranspiration*. 10.5772/14081; Labędzki, L., Ed.; InTech, **2011**; pp 275–290.
- [255] Droogers, P.; Allen, R.G. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrigation and Drainage Systems*. **2002**, 16 (1), 33–45. doi: 10.1023/A:1015508322413.
- [256] Farmer, W.; Strzepek, K.; Schlosser, C.A.; Droogers, P.; Xiang, G. A Method for Calculating Reference Evapotranspiration on Daily Time Scales; 195; Cambridge, USA, **2011**.
- [257] Borona, M.; Mbow, C.; Ouedraogo, I. Unstacking high temporal resolution meteorological data for multidimensional analysis of climate variability in southern Burkina Faso. *GeoGrafisk Tidsskrift-danish Journal of GeoGraphy*. **2016**, 116 (2), 176–189. doi: 10.1080/00167223.2016.1212668.
- [258] Dale, A.; Fant, C.; Strzepek, K.; Lickley, M.; Solomon, S. Climate model uncertainty in impact assessments for agriculture: A multi-ensemble case study on maize in sub-Saharan Africa. *Earth's Future*. **2017**, 5 (3), 337–353. doi: 10.1002/2017EF000539.
- [259] Walter, I.A.; Allen, R.G.; Elliott, R.; Itenfisu, D.; Brown, P.; Jensen, M.E.; Mecham, B.; Howell, T.A.; Snyder, R.; Eching, S.; Spofford, T.; Mary Hattendorf; Martin, D.; Cuenca, R.H.; Wright, J.L. The asce standardized reference evapotranspiration equation;

- Allen, R.G., Walter, I.A., Elliott, R., Howell, T., Itenfisu, D., Jensen, M., Eds.; Environmental and Water Resources Institute, American Society of Civil Engineers, **2005**.
- [260] McKee, T.B.; Doesken, N.J.; Kleist, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales In *Preprints, 8th Conference on Applied Climatology*. January 17–22, Anaheim, California, **1993**; pp 179–184.
- [261] Seiler, R.A.; Hayes, M.; Bressan, L. Using the standardized precipitation index for flood risk monitoring. *International Journal of Climatology*. **2002**, *22* (11), 1365–1376. doi: 10.1002/joc.799.
- [262] Willis, C.; Van Wilgen, B.; Tolhurst, K.; Everson, C.; D’Abreton, P.; Pero, L.; Fleming, G. Development of a National Fire Danger Rating System for South Africa; Pretoria, South Africa, **2001**.
- [263] Dje, K.B.; Yao, A.N.; N’guesan Bi, V.H.; Kouadio, B.H.; Nzue, A.K.; Djagoua, V.; Affian, K. Prévention contre les feux de végétation en Afrique de l’ouest, cas du district du Zanzan, nord-est de la Côte d’Ivoire: analyse du phénomène et des seuils climatiques favorables. *International Journal of Innovation and Applied Studies*. **2017**, *20* (2), 500–516.
- [264] Ångström, A. Swedish meteorological research 1939–1948. *Tellus*. **1949**, *1* (1), 60–64.
- [265] Kendall, M. Rank correlation methods, 4th Ed.; Charles Griffin: London, **1970**.
- [266] Mann, H.B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*. **1945**, *13* (3), 245. doi: 10.2307/1907187.
- [267] Pohlert, T. Non-parametric trend tests and change-point detection. En ligne : <https://cran.r-project.org/web/packages/trend/vignettes/trend.pdf> (visité le 30/07/2018).
- [268] Sen, P.K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall’s tau. *Journal of the American Statistical Association*. **1968**, *63* (324), 1379–1389. doi: 10.1080/01621459.1968.10480934.
- [269] Conover, W.J. Practical Nonparametric Statistics, 2nd ed.; John Wiley and Sons: New York, **1980**.
- [270] R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. **2017**.
- [271] Pettitt, A.N. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*. **1979**, *28* (2), 126. doi: 10.2307/2346729.
- [272] Müller, D.; Suess, S.; Hoffmann, A.A.; Buchholz, G. The value of satellite-based active fire data for Monitoring, Reporting and Verification of REDD+ in the Lao PDR. *Human Ecology*. **2013**, *41* (1), 7–20. doi: 10.1007/s10745-013-9565-0.
- [273] Green, P.J. Density estimation for statistics and data analysis, Monographs.; Chapman and Hall/CRC: New York, **1988**; Vol. 37.
- [274] Diggle, P. A Kernel Method for smoothing point process data. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*. **1985**, *34* (2), 138–147. doi: 10.2307/2347366.

- [275] Hirsch, R.M.; Slack, J.R. A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence. *Water Resources Research*. **1984**, 20 (6), 727–732. doi: 10.1029/WR020i006p00727.
- [276] Hyndman, R.J.; Khandakar, Y. Automatic Time Series Forecasting: The forecast Package for R. *Journal of Statistical Software*. **2008**, 27 (3) doi: 10.18637/jss.v027.i03.
- [277] Hyndman, R.J.; Khandakar, Y. forecast: Forecasting functions for time series and linear models. *Journal of Statistical Software*. **2016**, 26 (3), 1–22.
- [278] Coghlan, A. A little book of R for time series; Wellcome Trust Sanger Institute: Cambridge, United Kingdom, **2014**.
- [279] Hyndman, R.; Athanasopoulos, G.; Bergmeir, C.; Caceres, G.; Chhay, L.; O’Hara-Wild, M.; Petropoulos, F.; Razbash, S.; Wang, E.; Yasmeeen, F. forecast: Forecasting functions for time series and linear models. **2018** En ligne : <http://pkg.robjhyndman.com/forecast>.
- [280] Wei, T.; Simko, V. R package “corrplot”: Visualization of a Correlation Matrix (Version 0.84). **2017**.
- [281] Wood, S.N. mgcv: GAMs and Generalized Ridge Regression for R. *R News*. **2001**, 1 (2), 20–25. En ligne : <http://cran.r-project.org/doc/Rnews/>.
- [282] Wood, S.N. Fast stable restricted maximum likelihood and marginal likelihood estimation of semiparametric generalized linear models. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*. **2011**, 73 (1), 3–36. doi: 10.1111/j.1467-9868.2010.00749.x.
- [283] Wood, S.N. Generalized Additive Models : An introduction with R, 2nd ed.; Chapman & Hall/CRC: Boca Raton, FL, **2017**.
- [284] Hastie, T.; Tibshirani, R. Generalized Additive Models. *Statistical Science*. **1986**, 1 (3), 297–310.
- [285] James, G.; Witten, D.; Hastie, T. An Introduction to statistical learning: With applications in R; Springer Science+Business Media: New York, NY, USA, **2014**.
- [286] Lukacs, P.M.; Burnham, K.P.; Anderson, D.R. Model selection bias and Freedman’s paradox. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*. **2010**, 62 (1), 117–125. doi: 10.1007/s10463-009-0234-4. En ligne : <http://link.springer.com/10.1007/s10463-009-0234-4>.
- [287] Maindonald, J. gamclass: Functions and data for a course on modern regression and classification. **2018**. En ligne : <https://cran.r-project.org/package=gamclass>.
- [288] Husson, F.; Josse, J.; Le, S.; Mazet, J. FactoMineR: Multivariate exploratory data analysis and data mining. **2017**. En ligne : <https://cran.r-project.org/package=FactoMineR>.
- [289] Kassambara, A.; Mundt, F. Factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses. **2017**. En ligne : <http://www.sthda.com/english/rpkgs/factoextra>.
- [290] Armenteras, D.; Gibbes, C.; Vivacqua, C.A.; Espinosa, J.S.; Duleba, W.; Goncalves, F.; Castro, C. Interactions between climate, land use and vegetation fire occurrences in El

- Salvador. *Atmosphere*. **2016**, 7 (2), 26. doi: 10.3390/atmos7020026. En ligne : <http://www.mdpi.com/2073-4433/7/2/26>.
- [291] Cryer, J.D.; Chan, K.-S. Time series analysis. With applications in R, 2nd ed.; Casella, G., Fienberg, S., Okin, I., Eds.; Springer, **2010**.
- [292] Probst, W.N.; Stelzenmüller, V.; Fock, H.O. Using cross-correlations to assess the relationship between time-lagged pressure and state indicators: An exemplary analysis of North Sea fish population indicators. *ICES Journal of Marine Science*. **2012**, 69 (4), 670–681. doi: 10.1093/icesjms/fss015.
- [293] Lupi, C. Unit Root CADF Testint with R. *Journal of Statistical Software*. **2009**, 32 (2), 1–19. doi: 10.18637/jss.v032.i02. En ligne : <http://www.jstatsoft.org/v32/i02/>.
- [294] Barnier, J.; Briatte, F.; Larmarange, J. questionr: Functions to make surveys processing easier. R package version 0.6.1. En ligne : <http://cran.r-project.org/package=questionr>.
- [295] Guest, G.; Bunce, A.; Johnson, L. How many interviews are enough? *Field Methods*. **2006**, 18 (1), 59–82. doi: 10.1177/1525822X05279903.
- [296] Yao, N.R.; Oule, A.F.; N’Goran, K.D. Etude de vulnérabilité du secteur agricole face aux changements climatiques en Côte d’Ivoire; MINEDD - PNUD: Abidjan, Côte d’Ivoire, **2012**.
- [297] Collins, J.M. Temperature variability over Africa. *Journal of Climate*. **2011**, 24 (14), 3649–3666. doi: 10.1175/2011JCLI3753.1.
- [298] Glantz, M.H. Currents of change: Impacts of El Niño and La Niña on climate and society; Cambridge University Press: Cambridge, New York, United Kingdom & USA, **2001**.
- [299] Sarachik, E.S.; Cane, M.A. The El Nino - Southern Oscillation Phenomenon; Cambridge University Press: Cambridge, New York, United Kingdom & USA, **2010**.
- [300] Allan, R.J.; Lindesay, J.; Parker, D.E. El Nino Southern Oscillation and climatic variability; CSIRO Publishing: Clayton, Australia, **1996**.
- [301] Null, J. El Niño and La Niña years and intensities based on Oceanic Niño Index (ONI). En ligne : <https://ggweather.com/enso/oni.htm> (visité le 30/11/2018).
- [302] Kouassi, A.M.; Kouamé, K.F.; Koffi, Y.B.; Dje, K.B.; Paturel, J.E.; Oulare, S. Analyse de la variabilité climatique et de ses influences sur les régimes pluviométriques saisonniers en Afrique de l’ouest: Cas du bassin versant du N’zi (Bandama) en Côte d’Ivoire. *CyberGeo*. **2010** doi: 10.4000/cybergeogeo.23388. En ligne : <http://cybergeogeo.revues.org/23388> (visité le 01/04/2017).
- [303] Nicholson, S.E.; Funk, C.; Fink, A.H. Rainfall over the African continent from the 19th through the 21st century. *Global and Planetary Change*. **2018**, 165, 114–127. doi: 10.1016/j.gloplacha.2017.12.014.
- [304] Nicholson, S.E.; Some, B.; Kone, B. An analysis of recent rainfall conditions in West Africa, including the rainy seasons of the 1997 El Niño and the 1998 La Niña years. *Journal of Climate*. **2000**, 13 (14), 2628–2640. doi: 10.1175/1520-0442(2000)013<2628:AAORRC>2.0.CO;2.

- [305] Nicholson, S.E.; Fink, A.H.; Funk, C. Assessing recovery and change in West Africa's rainfall regime from a 161-year record. *International Journal of Climatology*. **2018**, *38* (10), 3770–3786. doi: 10.1002/joc.5530.
- [306] Kouassi, A.M.; Kouamé, K.F.; Goula, B.T.A.; Lasm, T.; Paturel, J.E.; Biémi, J. Influence de la variabilité climatique et de la modification de l'occupation du sol sur la relation pluie-débit à partir d'une modélisation globale du bassin versant du N'Zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. *Revue Ivoirienne des Science et Technologie*. **2008**, *11*, 207 – 229.
- [307] Goula, B.T.A.; Soro, E.G.; Kouassi, W.; Srohourou, B. Tendances et ruptures au niveau des pluies journalières extrêmes en Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest). *Hydrological Sciences Journal*. **2012**, *57* (6), 1067–1080. doi: 10.1080/02626667.2012.692880.
- [308] Lean, J.L.; Rind, D.H. How will Earth's surface temperature change in future decades? *Geophysical Research Letters*. **2009**, *36* (15), L15708. doi: 10.1029/2009GL038932.
- [309] Lu, R. Impact of Atlantic sea surface temperatures on the warmest global surface air temperature of 1998. *Journal of Geophysical Research*. **2005**, *110* (D5), D05103. doi: 10.1029/2004JD005203.
- [310] Bell, G.D.; Halpert, M.S.; Ropelewski, C.F.; Kousky, V.E.; Douglas, A. V.; Schnell, R.C.; Gelman, M.E. Climate Assessment for 1998. *Bulletin of the American Meteorological Society*. **1999**, *80* (5s), S1–S48. doi: 10.1175/1520-0477-80.5s.S1.
- [311] Giglio, L.; Loboda, T.; Roy, D.P.; Quayle, B.; Justice, C.O. An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor. *Remote Sensing of Environment*. **2009**, *113* (2), 408–420. doi: 10.1016/j.rse.2008.10.006.
- [312] N'Datchoh, E.T.; Konaré, A.; Diedhiou, A.; Diawara, A.; Quansah, E.; Assamoi, P. Effects of climate variability on savannah fire regimes in West Africa. *Earth System Dynamics*. **2015**, *6* (1), 161–174. doi: 10.5194/esd-6-161-2015.
- [313] Dwomoh, F.; Wimberly, M. Fire regimes and their drivers in the Upper Guinean Region of West Africa. *Remote Sensing*. **2017**, *9* (11), 1117. doi: 10.3390/rs9111117.
- [314] Giglio, L.; Randerson, J.T.; van der Werf, G.R. Analysis of daily, monthly, and annual burned area using the fourth-generation global fire emissions database (GFED4). *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. **2013**, *118* (1), 317–328. doi: 10.1002/jgrg.20042.
- [315] Andela, N.; Morton, D.C.; Giglio, L.; Chen, Y.; van der Werf, G.R.; Kasibhatla, P.S.; DeFries, R.S.; Collatz, G.J.; Hantson, S.; Kloster, S.; Bachelet, D.; Forrest, M.; Lasslop, G.; Li, F.; Mangeon, S.; Melton, J.R.; Yue, C.; Randerson, J.T. A human-driven decline in global burned area. *Science*. **2017**, *356* (6345), 1356–1362. doi: 10.1126/science.aal4108.
- [316] Nielsen, T.T.; Rasmussen, K. Utilization of NOAA AVHRR for assessing the determinants of savanna fire distribution in Burkina Faso. *International Journal of Wildland Fire*. **2001**, *10*, 129–135. doi: 10.1071/WF01015.
- [317] Oloukoi, J.; Yabi, I.; Johnson, D. Influence des facteurs climatiques et topographiques sur les risques de feux de végétation au Centre du Bénin. *Journal of Geospatial Science and Technology*. **2014**, *1* (1), 64–86.

- [318] Govender, N.; Trollope, W.S.W.; Van Wilgen, B.W. The effect of fire season, fire frequency, rainfall and management on fire intensity in savanna vegetation in South Africa. *Journal of Applied Ecology*. **2006**, *43* (4), 748–758. doi: 10.1111/j.1365-2664.2006.01184.x.
- [319] Guiguindibaye, M.; Belem, M.; Boussim, J. Caractéristiques des feux dans un incendie en savane soudanienne au Tchad. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*. **2013**, *7* (3), 1147. doi: 10.4314/ijbcs.v7i3.21.
- [320] Kull, C.A. Madagascar aflame: landscape burning as peasant protest, resistance, or a resource management tool? *Political Geography*. **2002**, *21* (7), 927–953. doi: 10.1016/S0962-6298(02)00054-9.
- [321] Tabor, K.; Jones, K.W.; Hewson, J.; Rasolohery, A.; Rabeloson, A.; Andrianjohanarivo, T.; Harvey, C.A. Evaluating the effectiveness of conservation and development investments in reducing deforestation and fires in Ankeniheny-Zahemena Corridor, Madagascar. *PLOS ONE*. **2017**, *12* (12), e0190119. doi: 10.1371/journal.pone.0190119.
- [322] Fuller, D.O.; Murphy, K. The Enso-Fire Dynamic in Insular Southeast Asia. *Climatic Change*. **2006**, *74* (4), 435–455. doi: 10.1007/s10584-006-0432-5.
- [323] Turco, M.; Bedia, J.; Di Liberto, F.; Fiorucci, P.; von Hardenberg, J.; Koutsias, N.; Llasat, M.-C.; Xystrakis, F.; Provenzale, A. Decreasing fires in Mediterranean Europe. *PLOS ONE*. **2016**, *11* (3), e0150663. doi: 10.1371/journal.pone.0150663.
- [324] Abatzoglou, J.T.; Williams, A.P. Impact of anthropogenic climate change on wildfire across western US forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. **2016**, *113* (42), 11770–11775. doi: 10.1073/pnas.1607171113.
- [325] Koutsias, N.; Xanthopoulos, G.; Founda, D.; Xystrakis, F.; Nioti, F.; Pleniou, M.; Mallinis, G.; Arianoutsou, M. On the relationships between forest fires and weather conditions in Greece from long-term national observations (1894–2010). *International Journal of Wildland Fire*. **2013**, *22* (4), 493–507. doi: 10.1071/WF12003.
- [326] Holsten, A.; Dominik, A.R.; Costa, L.; Kropp, J.P. How well do meteorological indices explain forest fire occurrence in Germany? In *EGU General Assembly 2013*. Vienna, Austria, **2013**; p 1.
- [327] Xiao, Y.; Zhang, X.; Ji, P. Modeling forest fire occurrences using count-data mixed models in Qiannan Autonomous Prefecture of Guizhou Province in China. *PLoS ONE*. **2015**, *10* (3), e0120621. doi: 10.1371/journal.pone.0120621.
- [328] Archibald, S.; Roy, D.P.; Van Wilgen, B.W.; Scholes, R.J. What limits fire? An examination of drivers of burnt area in Southern Africa. *Global Change Biology*. **2009**, *15* (3), 613–630. doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01754.x.
- [329] Aldersley, A.; Murray, S.J.; Cornell, S.E. Global and regional analysis of climate and human drivers of wildfire. *Science of The Total Environment*. **2011**, *409* (18), 3472–3481. doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.05.032.
- [330] Hessel, A.E. Pathways for climate change effects on fire: Models, data, and uncertainties. *Progress in Physical Geography*. **2011**, *35* (3), 393–407. doi: 10.1177/0309133311407654.

- [331] Fernandes, K.; Verchot, L.; Baethgen, W.; Gutierrez-Velez, V.; Pinedo-Vasquez, M.; Martius, C. Heightened fire probability in Indonesia in non-drought conditions: the effect of increasing temperatures. *Environmental Research Letters*. **2017**, *12* (5), 054002. doi: 10.1088/1748-9326/aa6884.
- [332] Sá, A.C.L.; Turkman, M.A.A.; Pereira, J.M.C. Exploring fire incidence in Portugal using generalized additive models for location, scale and shape (GAMLSS). *Modeling Earth Systems and Environment*. **2018**, *4* (1), 199–220. doi: 10.1007/s40808-017-0409-6.
- [333] Pausas, J.G.; Ribeiro, E. The global fire-productivity relationship. *Global Ecology and Biogeography*. **2013**, *22* (6), 728–736. doi: 10.1111/geb.12043.
- [334] Ríos-Pena, L.; Kneib, T.; Cadarso-Suárez, C.; Klein, N.; Marey-Pérez, M. Studying the occurrence and burnt area of wildfires using zero-one-inflated structured additive beta regression. *Environmental Modelling & Software*. **2018**, 1–12. doi: 10.1016/j.envsoft.2018.03.008.
- [335] Krawchuk, M.A.; Moritz, M.A.; Parisien, M.-A.; Van Dorn, J.; Hayhoe, K. Global Pyrogeography: the Current and Future Distribution of Wildfire. *PLoS ONE*. **2009**, *4* (4), e5102. doi: 10.1371/journal.pone.0005102.
- [336] Ríos-Pena, L.; Cadarso-Suárez, C.; Kneib, T.; Marey-Pérez, M. Applying Binary Structured Additive Regression (STAR) for predicting wildfire in Galicia, Spain. *Procedia Environmental Sciences*. **2015**, *27*, 123–126. doi: 10.1016/j.proenv.2015.07.121.
- [337] Lee, H.-J.; Choi, Y.; Lee, S.-W. Complex relationships of the effects of topographic characteristics and susceptible tree cover on burn severity. *Sustainability*. **2018**, *10* (2), 295. doi: 10.3390/su10020295.
- [338] Léger, L.; Daudin, J.J. Étude d'un modèle de régression non paramétrique : la régression par directions révélatrices. *Revue de statistique appliquée*. **1993**, *41* (3), 21–48.
- [339] Syphard, A.D.; Sheehan, T.; Rustigian-Romsos, H.; Ferschweiler, K. Mapping future fire probability under climate change: Does vegetation matter? *PLOS ONE*. **2018**, *13* (8), e0201680. doi: 10.1371/journal.pone.0201680.
- [340] Bajocco, S.; Guglietta, D.; Ricotta, C. Modelling fire occurrence at regional scale: Does vegetation phenology matter? *European Journal of Remote Sensing*. **2015**, *48* (1), 763–775. doi: 10.5721/EuJRS20154842.
- [341] Ricotta, C.; Bajocco, S.; Guglietta, D.; Conedera, M. Assessing the influence of roads on fire ignition: Does land cover matter? *Fire*. **2018**, *1* (2), 24. doi: 10.3390/fire1020024.
- [342] Nunes, M.C.S.; Vasconcelos, M.J.; Pereira, J.M.C.; Dasgupta, N.; Alldredge, R.J.; Rego, F.C. Land Cover Type and Fire in Portugal: Do Fires Burn Land Cover Selectively? *Landscape Ecology*. **2005**, *20* (6), 661–673. doi: 10.1007/s10980-005-0070-8.
- [343] Costafreda-Aumedes, S.; Comas, C.; Vega-Garcia, C. Human-caused fire occurrence modelling in perspective: a review. *International Journal of Wildland Fire*. **2017**, *26* (12), 983. doi: 10.1071/WF17026.
- [344] Lee, B.; Kim, S.Y.; Chung, J.; Park, P.S. Estimation of fire severity by use of Landsat TM images and its relevance to vegetation and topography in the 2000 Samcheok forest

- fire. *Journal of Forest Research*. **2008**, *13* (4), 197–204. doi: 10.1007/s10310-008-0072-x.
- [345] Diouf, A.; Barbier, N.; Lykke, A.M.; Couteron, P.; Deblauwe, V.; Mahamane, A.; Saadou, M.; Bogaert, J. Relationships between fire history, edaphic factors and woody vegetation structure and composition in a semi-arid savanna landscape (Niger, West Africa). *Applied Vegetation Science*. **2012**, *15* (4), 488–500. doi: 10.1111/j.1654-109X.2012.01187.x.
- [346] Feltman, J.A.; Straka, T.J.; Post, C.J.; Sperry, S.L. Geospatial analysis application to forecast wildfire occurrences in South Carolina. *Forests*. **2012**, *3* (2), 265–282. doi: 10.3390/f3020265.
- [347] Lambin, E.F.; Meyfroidt, P. Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. **2011**, *108* (9), 3465–3472. doi: 10.1073/pnas.1100480108.
- [348] Caillaut, S. Le feu, la brousse et la savane: Modelisation spatiale de la dynamique des paysages soudaniens (Burkina Faso), Université de Caen Basse Normandie, **2011**.
- [349] Taylor, S.W.; Woolford, D.G.; Dean, C.B.; Martell, D.L. Wildfire prediction to inform fire management: Statistical science challenges. *Statistical Science*. **2013**, *28* (4), 586–615. doi: 10.1214/13-STS451. En ligne : <http://projecteuclid.org/euclid.ss/1386078880>.
- [350] Anggraeni, W.; Vinarti, R.A.; Kurniawati, Y.D. Performance Comparisons between Arima and Arimax Method in Moslem Kids Clothes Demand Forecasting: Case Study. *Procedia Computer Science*. **2015**, *72*, 630–637. doi: 10.1016/j.procs.2015.12.172.
- [351] Ta, S.; Kouadio, K.Y.; Ali, K.E.; Toualy, E.; Aman, A.; Yoroba, F. West Africa Extreme Rainfall Events and Large-Scale Ocean Surface and Atmospheric Conditions in the Tropical Atlantic. *Advances in Meteorology*. **2016**, *2016*, 1–14. doi: 10.1155/2016/1940456.
- [352] Bomuhangi, A.; Nabanoga, G.; Namaalwa, J.J.; Jacobson, M.G.; Abwoli, B.; Wich, S. Local communities' perceptions of climate variability in the Mt. Elgon region, eastern Uganda. *Cogent Environmental Science*. **2016**, *2* (1), 1168276. doi: 10.1080/23311843.2016.1168276.
- [353] Yéo, W.E.; Goula, B.T.A.; Diekkrüger, B.; Afouda, A. Vulnerability and adaptation to climate change in the Comoe River Basin (West Africa). *SpringerPlus*. **2016**, *5* (1), 847. doi: 10.1186/s40064-016-2491-z.
- [354] Doumbia, S.; Depieu, M. Perception paysanne du changement climatique et stratégies d'adaptation en riziculture pluviale dans le Centre Ouest de la Côte d'Ivoire. *Journal of Applied Biosciences*. **2013**, *64* (1), 4822. doi: 10.4314/jab.v64i1.88470.
- [355] Ehiakpor, D.S.; Danso-Abbeam, G.; Baah, J.E. Cocoa farmer's perception on climate variability and its effects on adaptation strategies in the Suaman district of western region, Ghana. *Cogent Food & Agriculture*. **2016**, *2* (1), 1210557. doi: 10.1080/23311932.2016.1210557.
- [356] Boissière, M.; Locatelli, B.; Sheil, D.; Padmanaba, M.; Sadjudin, E. Local perceptions of climate variability and change in tropical forests of Papua, Indonesia. *Ecology and Society*. **2013**, *18* (4), art13. doi: 10.5751/ES-05822-180413.

- [357] Ejeh, L.; Ati, O.F. Farmer's on-farm traditional mitigation, techniques against climate change impacts in selected LGAS of Kano State. *Research Journal of Environmental and Earth Sciences*. **2014**, 6 (7), 353–357.
- [358] Githeko, A.K.; Lindsay, S.W.; Confalonieri, U.E.; Patz, J.A. Climate change and vector-borne diseases: a regional analysis. *Bulletin of the World Health Organization*. **2000**, 78 (9), 1136–1147.
- [359] Chretien, J.P.; Anyamba, A.; Small, J.; Britch, S.; Sanchez, J.L.; Halbach, A.C.; Tucker, C.; Linthicum, K.J. Global climate anomalies and potential infectious disease risks: 2014-2015. *PLoS Currents Outbreaks*. **2015**, 7 doi: 10.1371/currents.outbreaks.95fbc4a8fb4695e049baabfc2fc8289f.
- [360] Costello, A.; Abbas, M.; Allen, A.; Ball, S.; Bell, S.; Bellamy, R.; Friel, S.; Groce, N.; Johnson, A.; Kett, M.; Lee, M.; Levy, C.; Maslin, M.; McCoy, D.; McGuire, B.; Montgomery, H.; Napier, D.; Pagel, C.; Patel, J.; de Oliveira, J.A.P.; Redclift, N.; Rees, H.; Rogger, D.; Scott, J.; Stephenson, J.; Twigg, J.; Wolff, J.; Patterson, C. Managing the health effects of climate change. *The Lancet*. **2009**, 373 (9676), 1693–1733. doi: 10.1016/S0140-6736(09)60935-1.
- [361] Fournier, A.; Douanio, M.; Bene, A. Pratique et perception des feux de végétation dans un paysage de vergers. Le pays sèmè (Kéné Dougou, Burkina Faso) In *Regards scientifiques croisés sur le changement global et le développement - Langue, environnement, culture : Actes du Colloque international de Ouagadougou*. Fabre, G., Fournier, A., Sanogo, L., Eds.; **2014**; pp 201–229.
- [362] Appiah, M.; Damnyag, L.; Blay, D.; Pappinen, A. Forest and agroecosystem fire management in Ghana. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. **2010**, 15 (6), 551–570. doi: 10.1007/s11027-010-9236-z.
- [363] Maddison, D. The perception of and adaptation to climate change in Africa; Policy Research Working Paper; 4308; World Bank: Washington, DC, USA, **2007**.
- [364] Jiri, O.; Mafongoya, P.; Chivenge, P. Smallholder farmer perceptions on climate change and variability: A predisposition for their subsequent adaptation strategies. *Earth Science & Climatic Change*. **2015**, 6 (5), 277. doi: 10.4172/2157-7617.1000277.
- [365] Amissah, L.; Kyereh, B.; Agyeman, V. Wildfire incidence and management in the forest transition zone of Ghana: Farmer's perspectives. *Ghana Journal of Forestry*. **2011**, 26 (1) doi: 10.4314/gjf.v26i1.66202.

ANNEXES

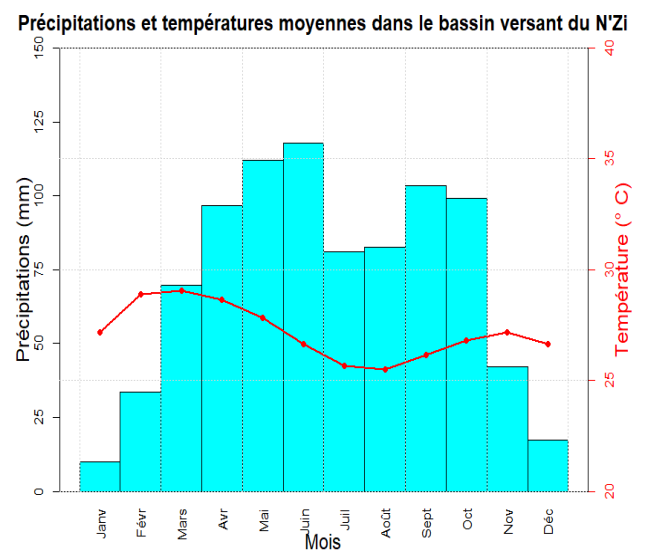
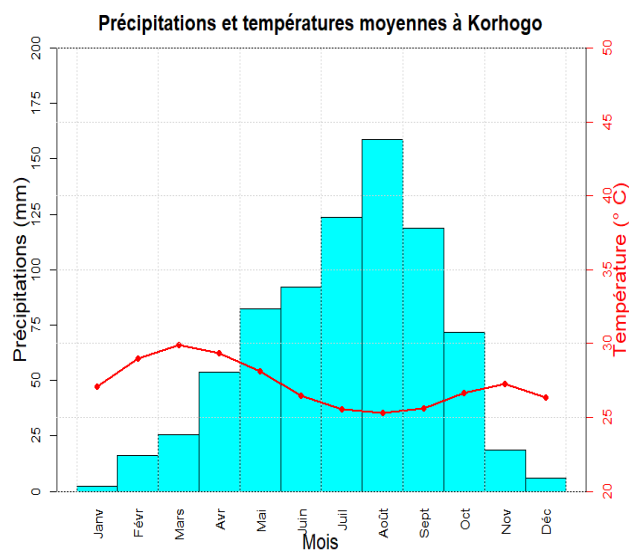
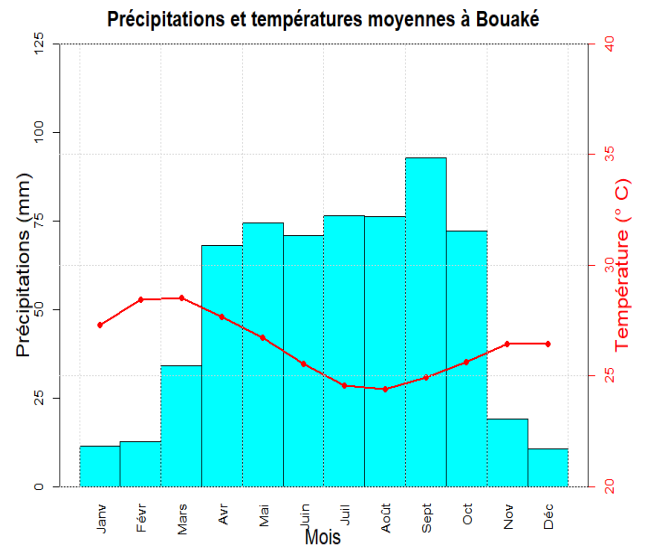
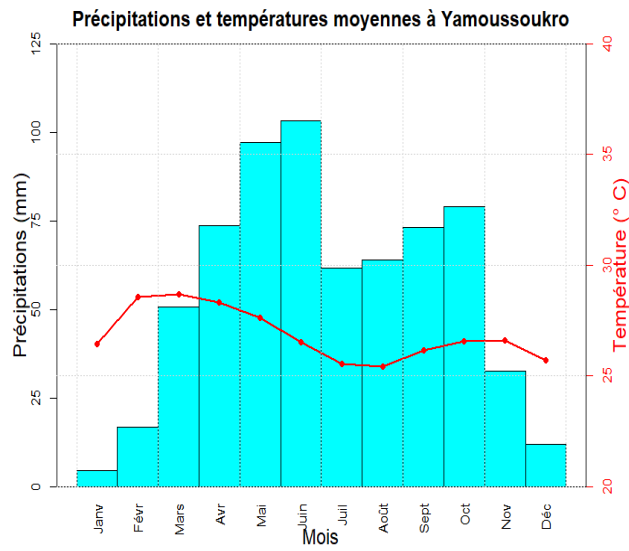
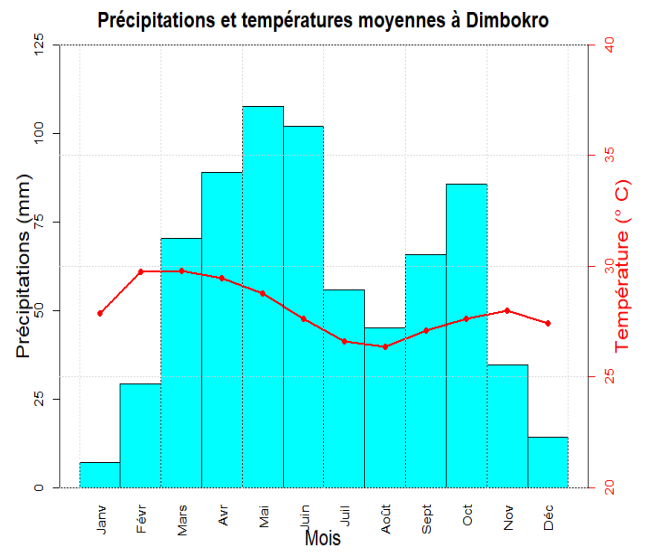
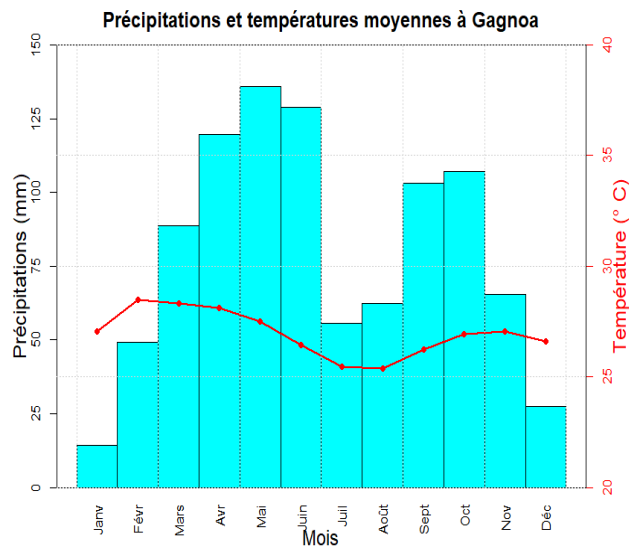
Annexe 1 : Cadre légal et réglementaire de la prévention et de la lutte contre les feux de brousse en Côte d'Ivoire

1. Loi n°2014-427 du 14 juillet 2014 portant Code Forestier
2. Loi n°96-766 du 3 octobre 1996 portant Code de l'Environnement
3. Décret n°2018-36 du 17 janvier 2018 portant organisation du Ministère des Eaux et Forêts
4. Décret n°2014-394 du 25 juin 2014 portant création de l'emploi de Pompier Civil
5. Décret n°2012-988 du 10 octobre 2012 portant création, attributions, organisation et fonctionnement de la Plateforme Nationale de Réduction des Risques et de Gestion des Catastrophes
6. Décret n°2012-962 du 02 octobre 2012 portant création, attributions, organisation et fonctionnement du Comité National de la Forêt et de la lutte contre les feux de brousse
7. Décret n°2000-822 du 22 novembre 2000 portant création de l'Office Nationale de la Protection Civile
8. Décret n°86-378 du 04 juin 1986 portant création d'un Secrétariat Permanent du Comité National de la Forêt et de la lutte contre les feux de brousse (CNDFB)
9. Décret n°79-643 du 8 août 1979 portant organisation du plan de secours à l'échelon national en cas de catastrophe
10. Décret n°66-52 du 8 mars 1966 fixant les modalités de mise à feu autorisées

Annexe 2 : Fiche de vérité terrain pour le suivi des feux de végétation

FireID	Coordonnées GPS		Jours après le feu	Durée du feu	Occupation du sol	Taille du feu	Causes du feu
	Latitude	Longitude	0=0 jour 1=1 jour 2=2 jours 3=3 jours ... 99=Ne sait pas	début (hh:mm) - fin (hh:mm) 99=Ne sait pas	1=forêt secondaire 2=forêt primaire 3=jachères 4=agriculture 5=savane herbeuse 6=autres (spécifier)	(estimée en hectare)	1=agriculture sur brûlis 2=brûlage des sons de cultures 3=conversion de terre 4=chasse 5=feux de brousse 6=autres (spécifier) 99=Ne sait pas
10001							
10002							
10003							
...							

Annexe 3 : Diagramme ombrothermique des stations au sein du bassin versant du N'Zi



Annexe 4 : Test de normalité de Shapiro-Wilk et Jarque-Bera des données pyrologiques

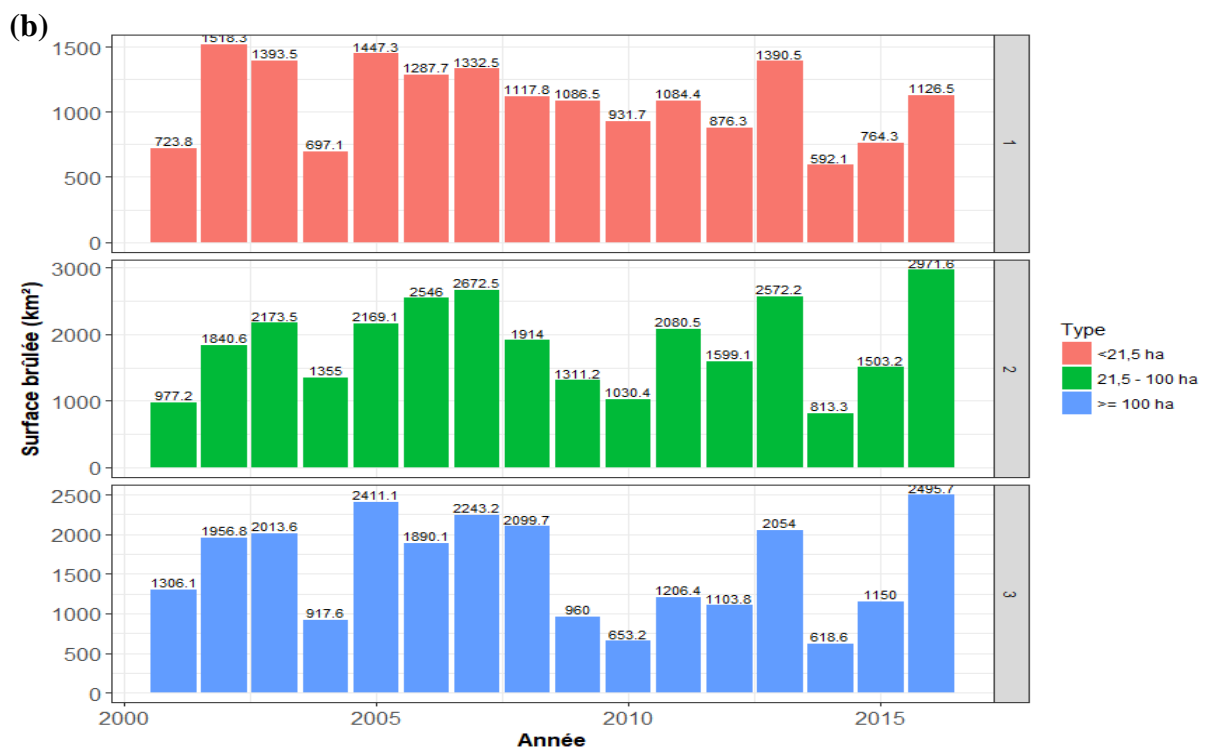
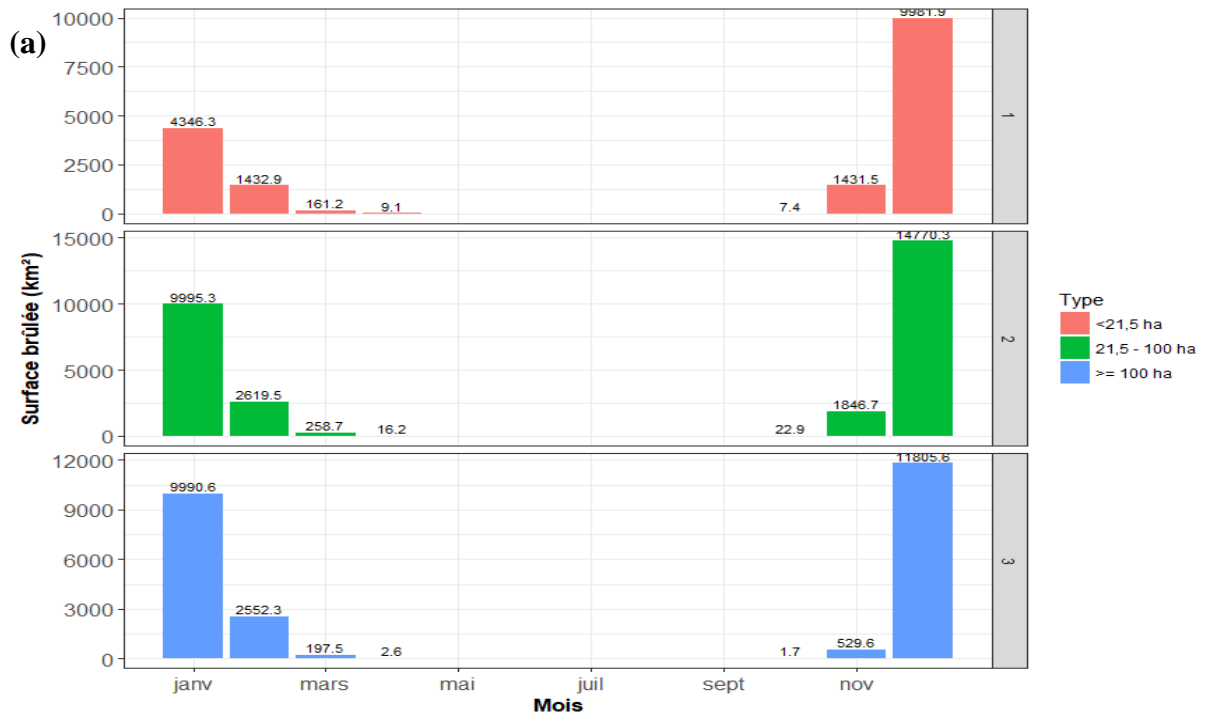
a) Occurrence des feux

Localisation	Shapiro-Wilk		Jarque-Bera	
	W	p-value	JB	p-value
Zone forestière	0,7859210	$1,749840 \times 10^{-15}$	24,39166	$5,051477 \times 10^{-6}$
Zone préforestière	0,7651524	$3,127183 \times 10^{-16}$	31,12154	$1,745999 \times 10^{-7}$
Zone soudanaise	0,7500220	$9,548708 \times 10^{-17}$	32,22505	$1,005586 \times 10^{-7}$
Bassin versant	0,8227061	$5,081671 \times 10^{-14}$	22,7847	$1,128146 \times 10^{-5}$

b) Surfaces brûlées

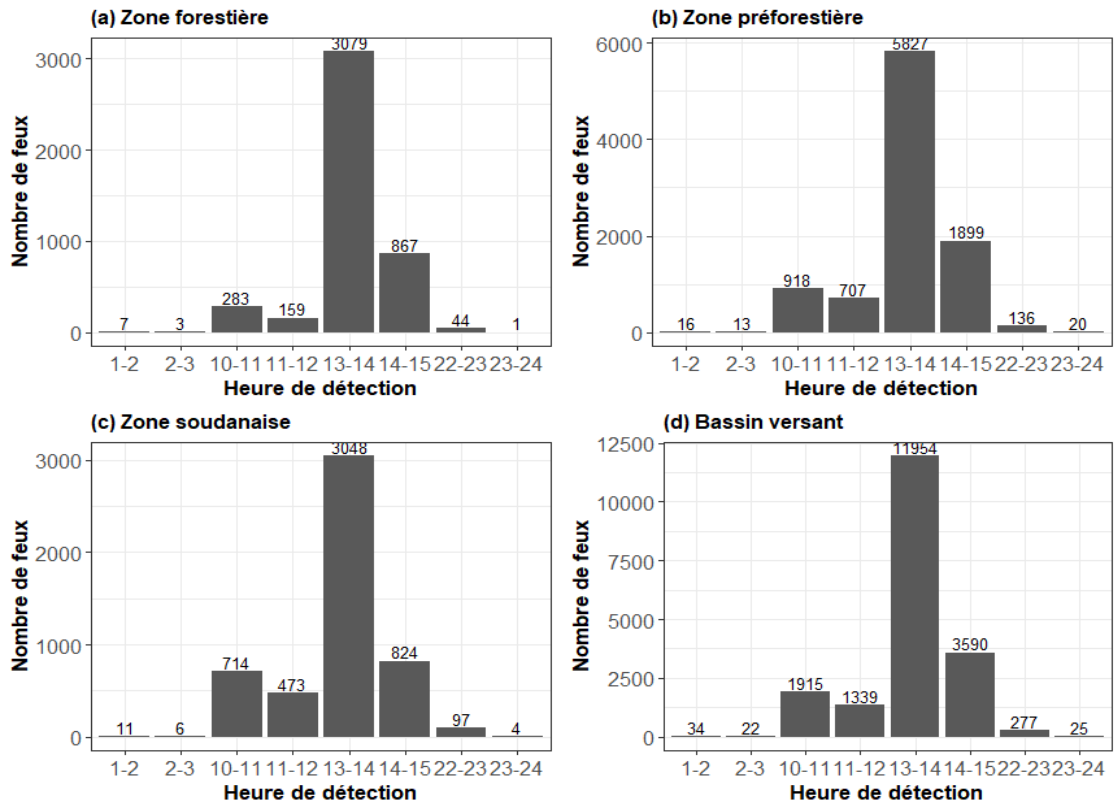
Localisation	Shapiro-Wilk		Jarque-Bera	
	W	p-value	JB	p-value
Zone forestière	0,7498141	$9,397775 \times 10^{-17}$	25,62357	$2,728421 \times 10^{-6}$
Zone préforestière	0,7298873	$2,130434 \times 10^{-17}$	27,29675	$1,181912 \times 10^{-6}$
Zone soudanaise	0,7290981	$2,012187 \times 10^{-17}$	27,16309	$1,263601 \times 10^{-6}$
Bassin versant	0,7673066	$3,719186 \times 10^{-16}$	24,97596	$3,771725 \times 10^{-6}$

Annexe 5 : Distribution des surfaces brûlées mensuellement (a) et annuellement (b) en fonction des catégories de surfaces

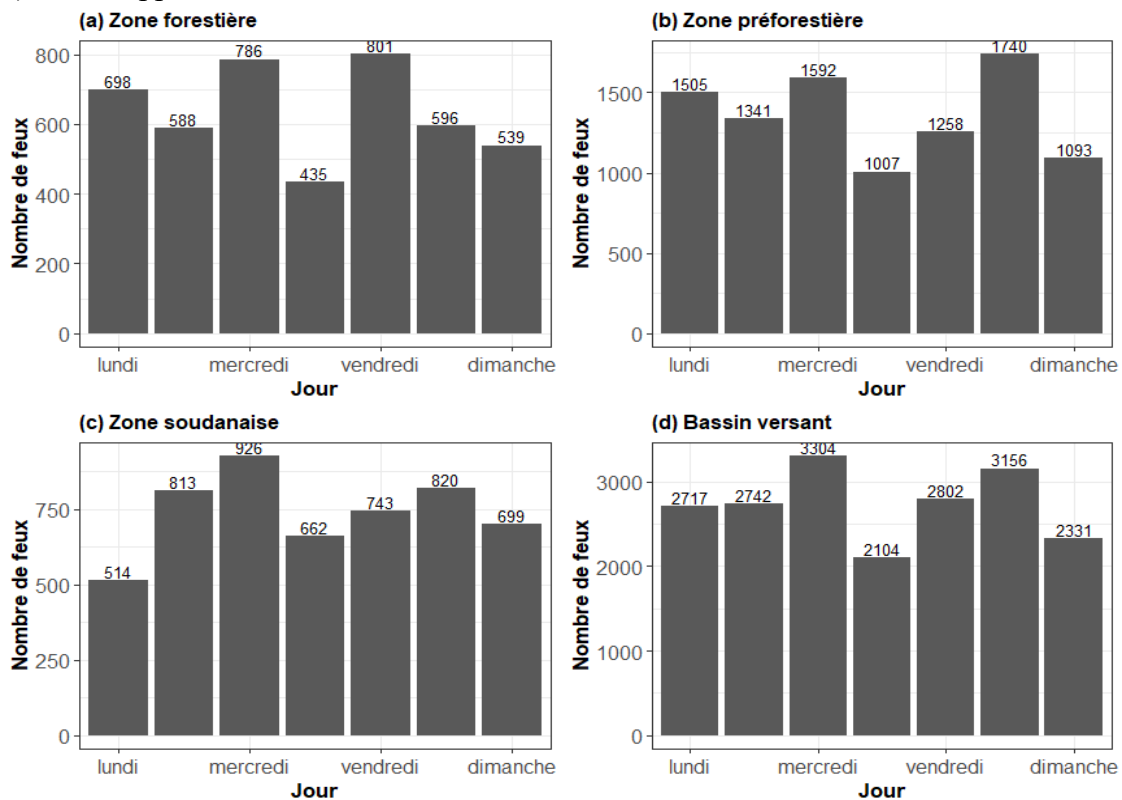


Annexe 6 : Evolution des feux en fonction des heures et jours d'apparition

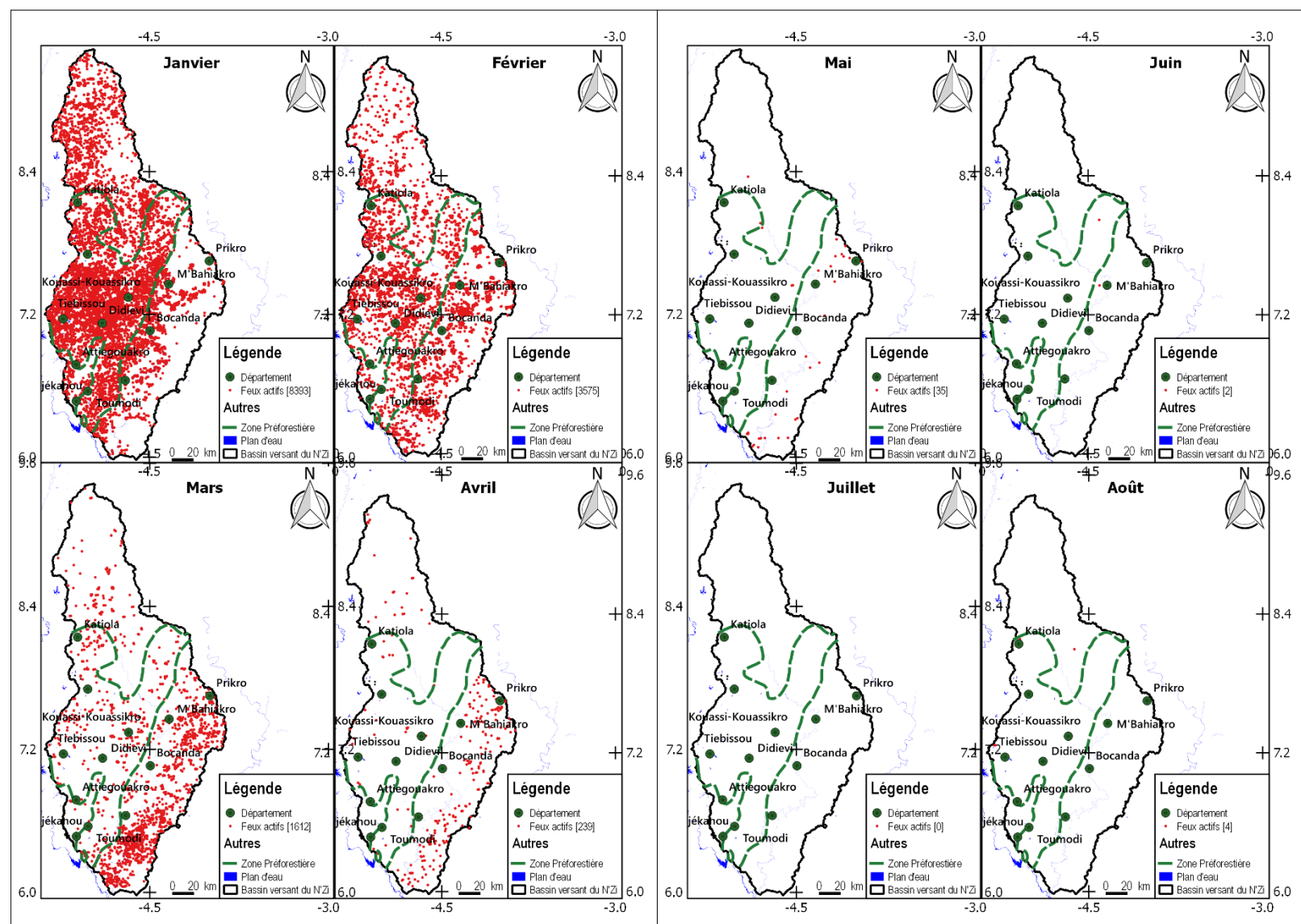
a) Heure d'apparition

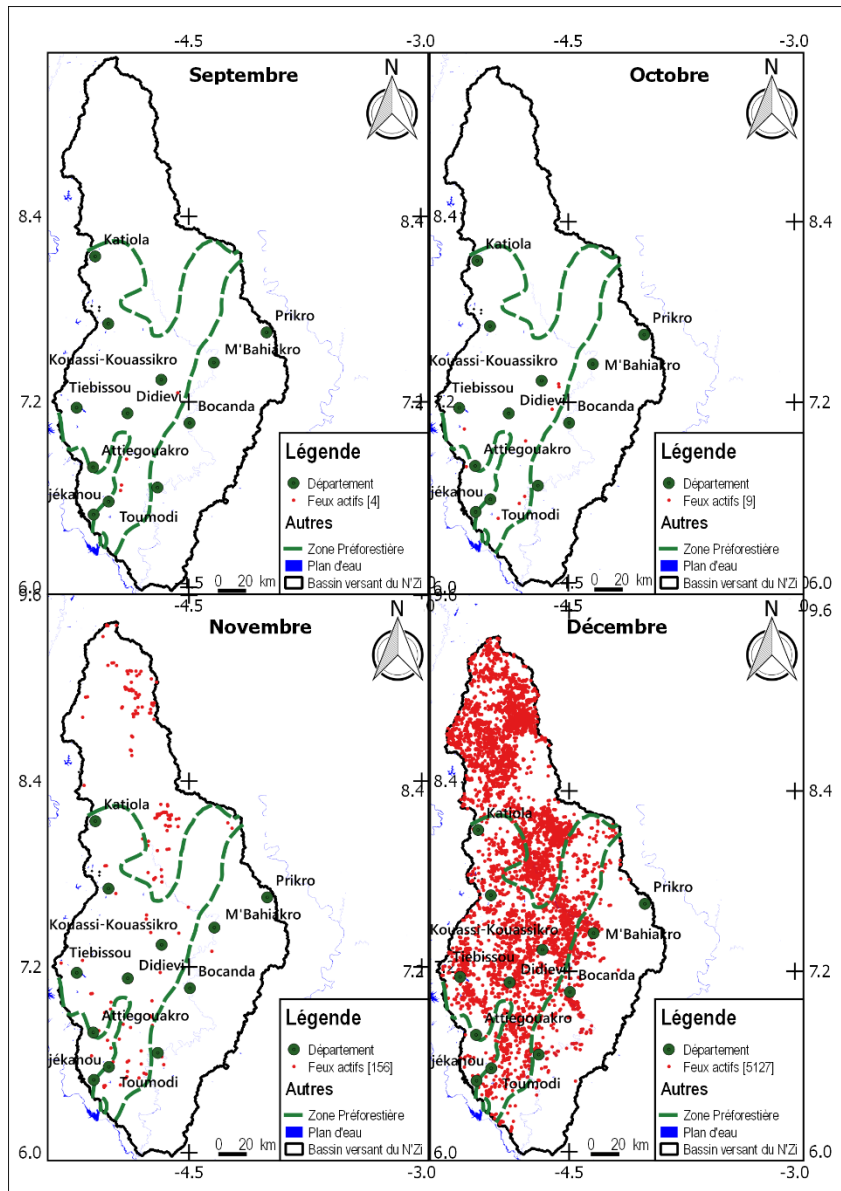


b) Jour d'apparition

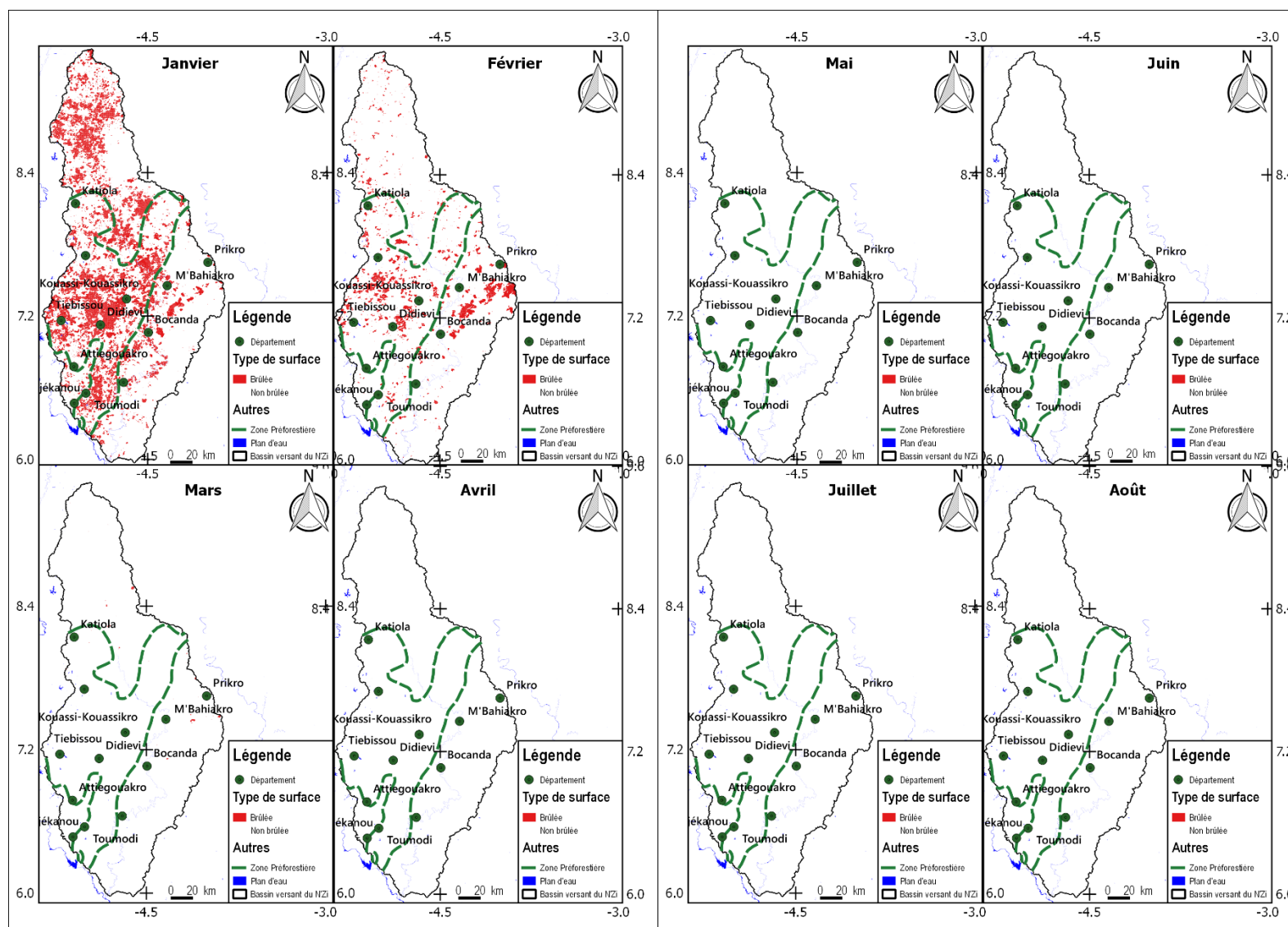


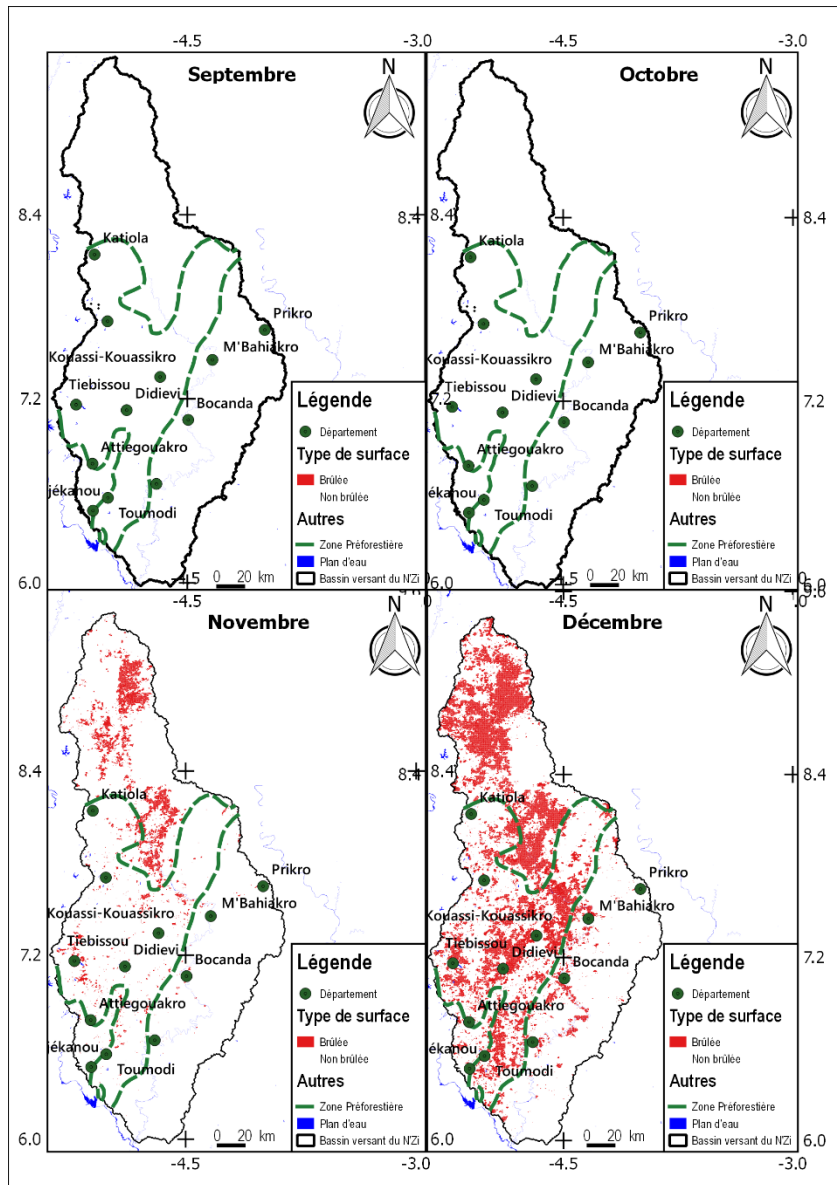
Annexe 7 : Distribution spatiale mensuelle des foyers des feux



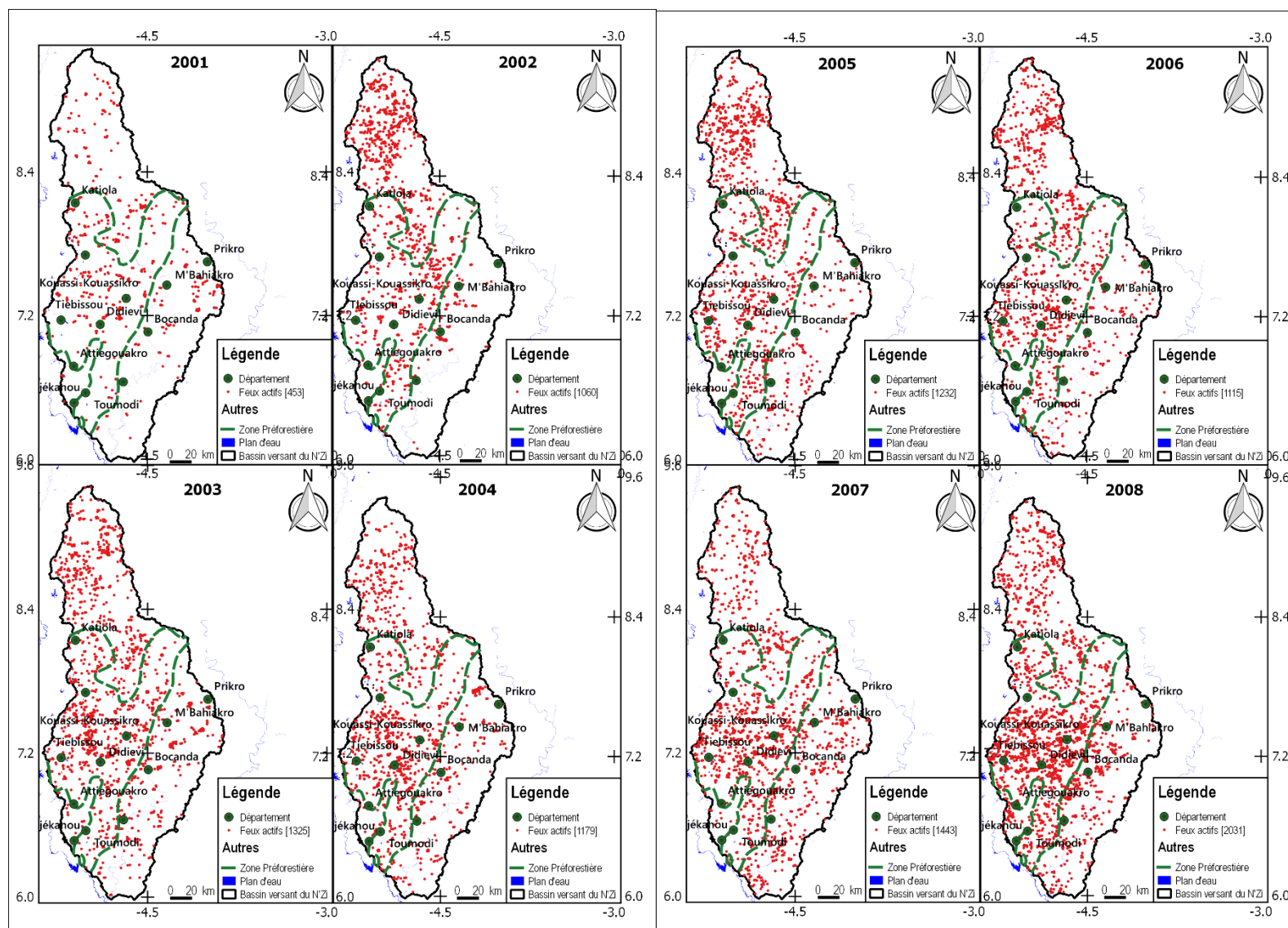


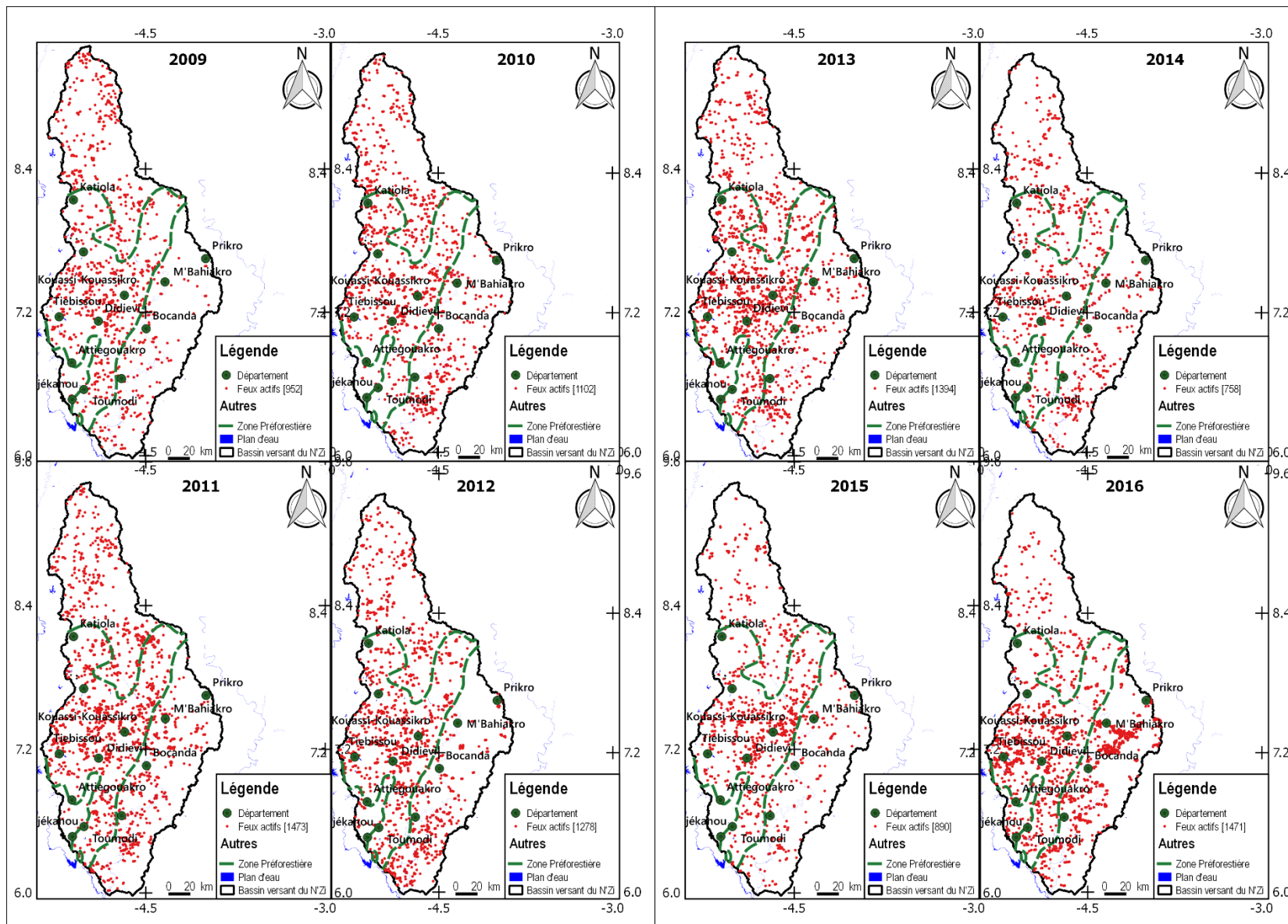
Annexe 8 : Distribution spatiale mensuelle des surfaces brûlées



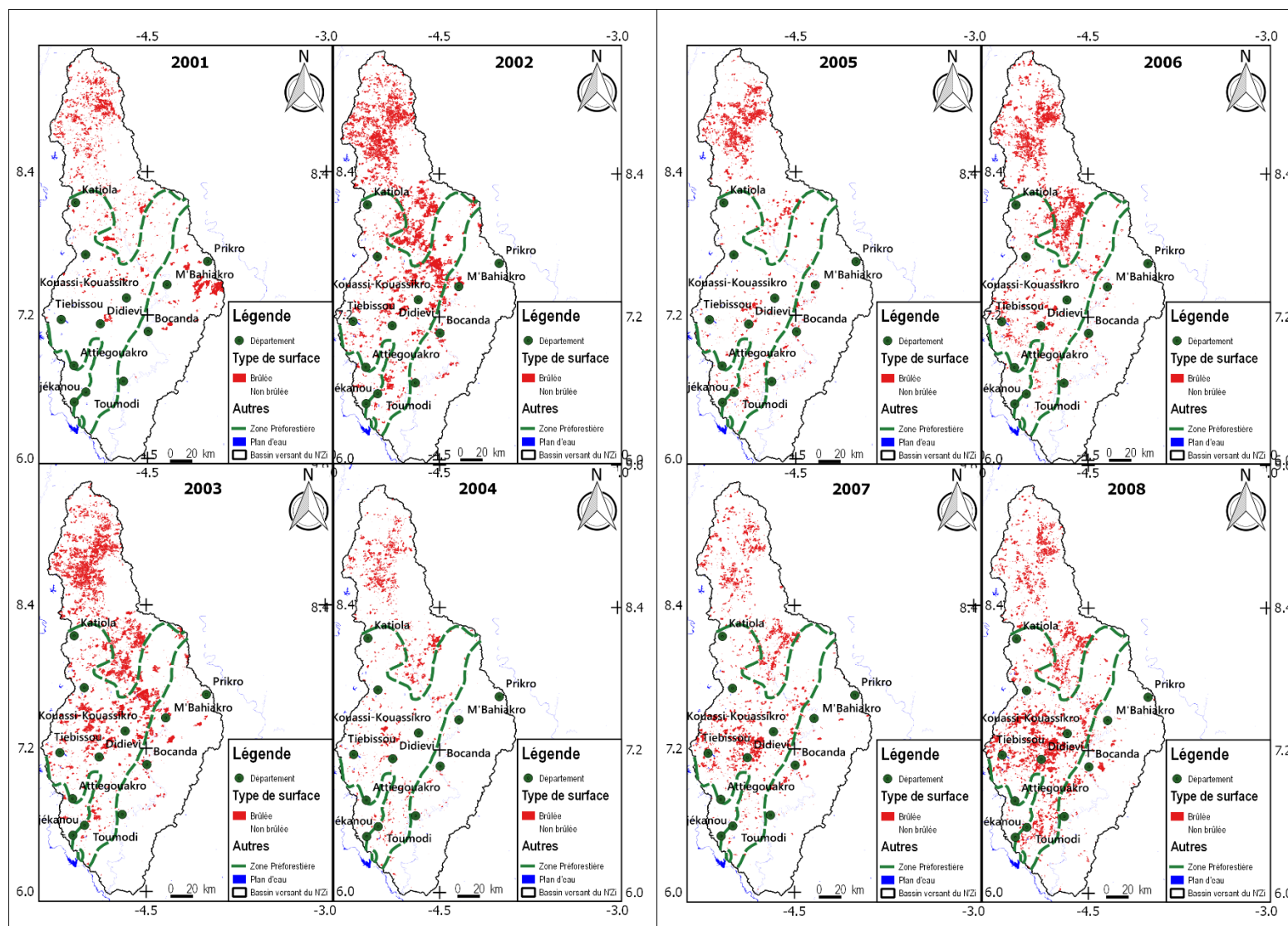


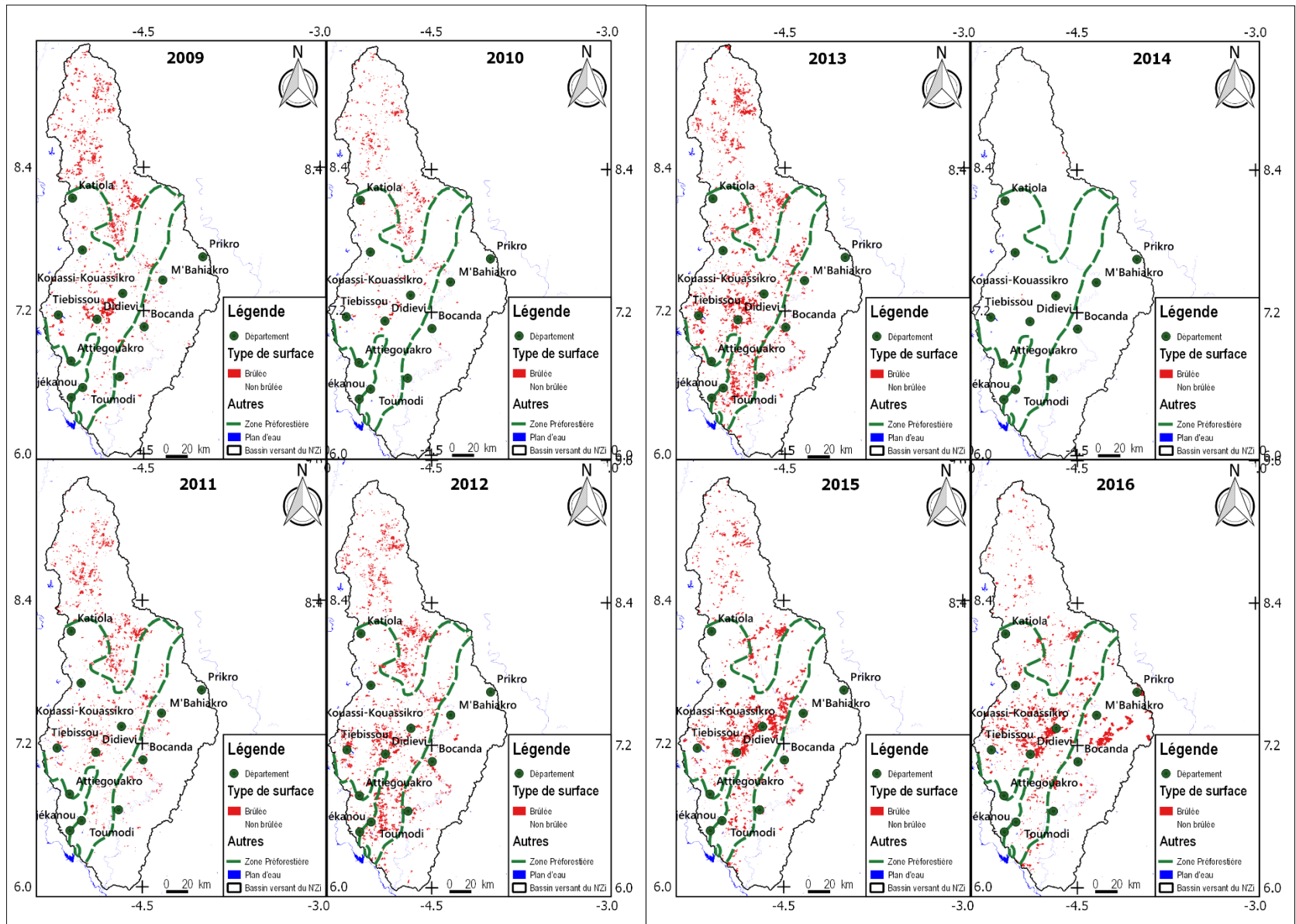
Annexe 9 : Distribution spatiale annuelle des foyers de feux de végétation



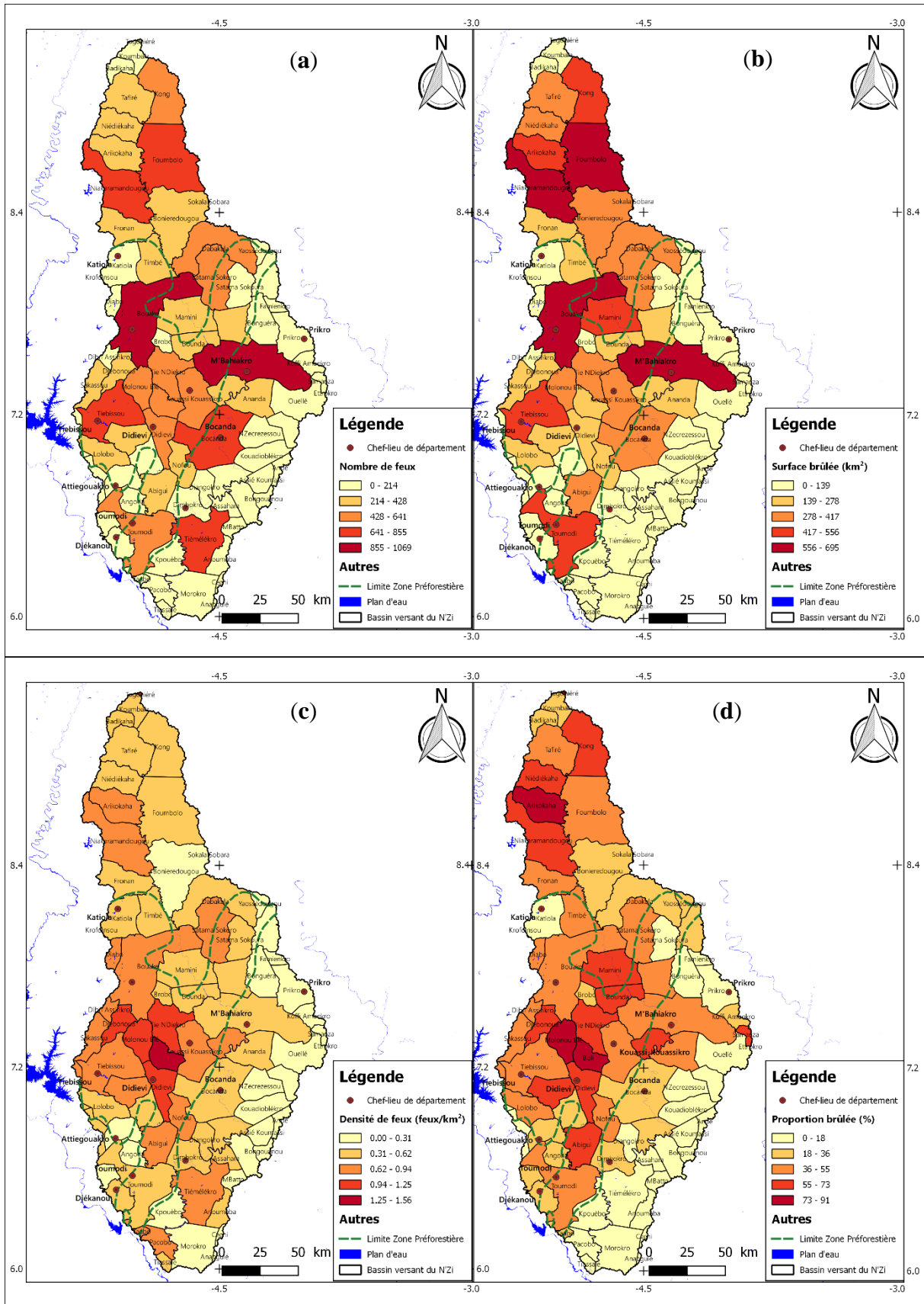


Annexe 10 : Distribution spatiale annuelle des surfaces brûlées



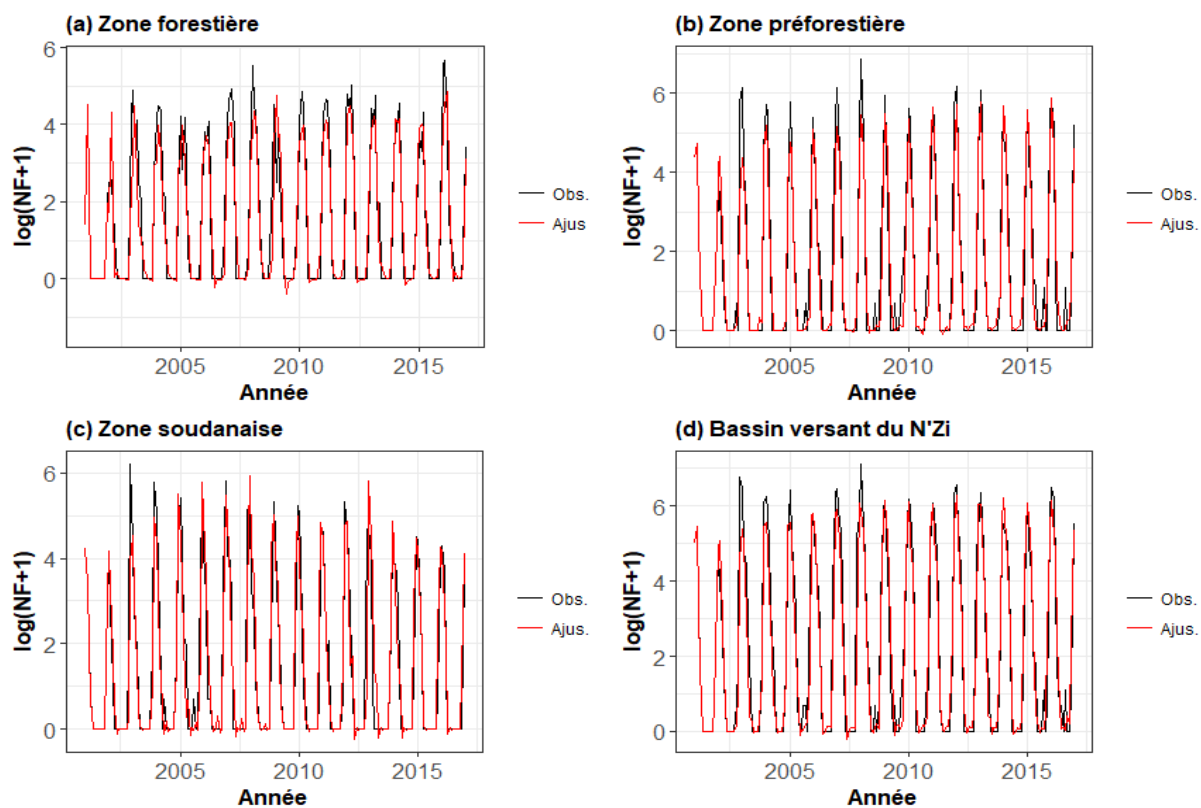


Annexe 11 : Distribution par sous-préfecture des (a) foyers de feux, (b) surfaces brûlées, (c) densités de feux et (d) proportions brûlées

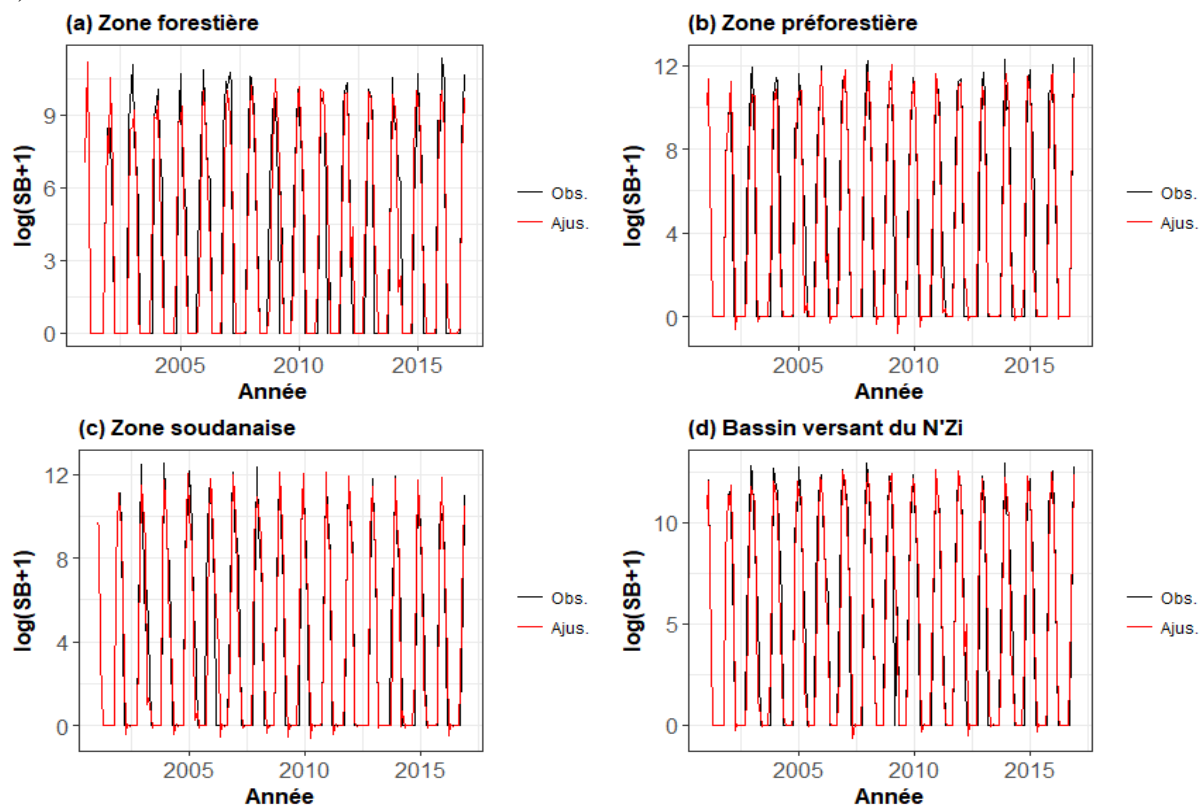


Annexe 12 : Séries observées et simulées pour (a) les foyers de feux et (b) les surfaces brûlées en fonction des écorégions

a) Nombre de feux

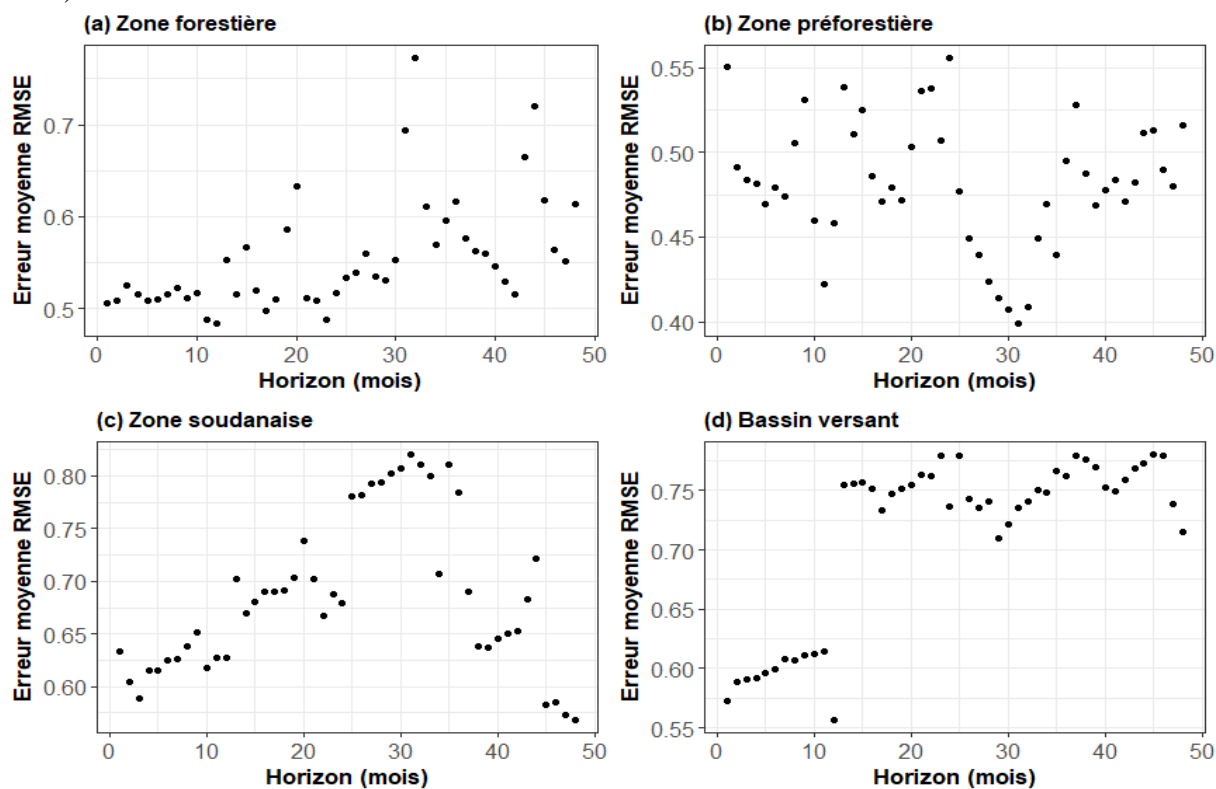


b) Surfaces brûlées

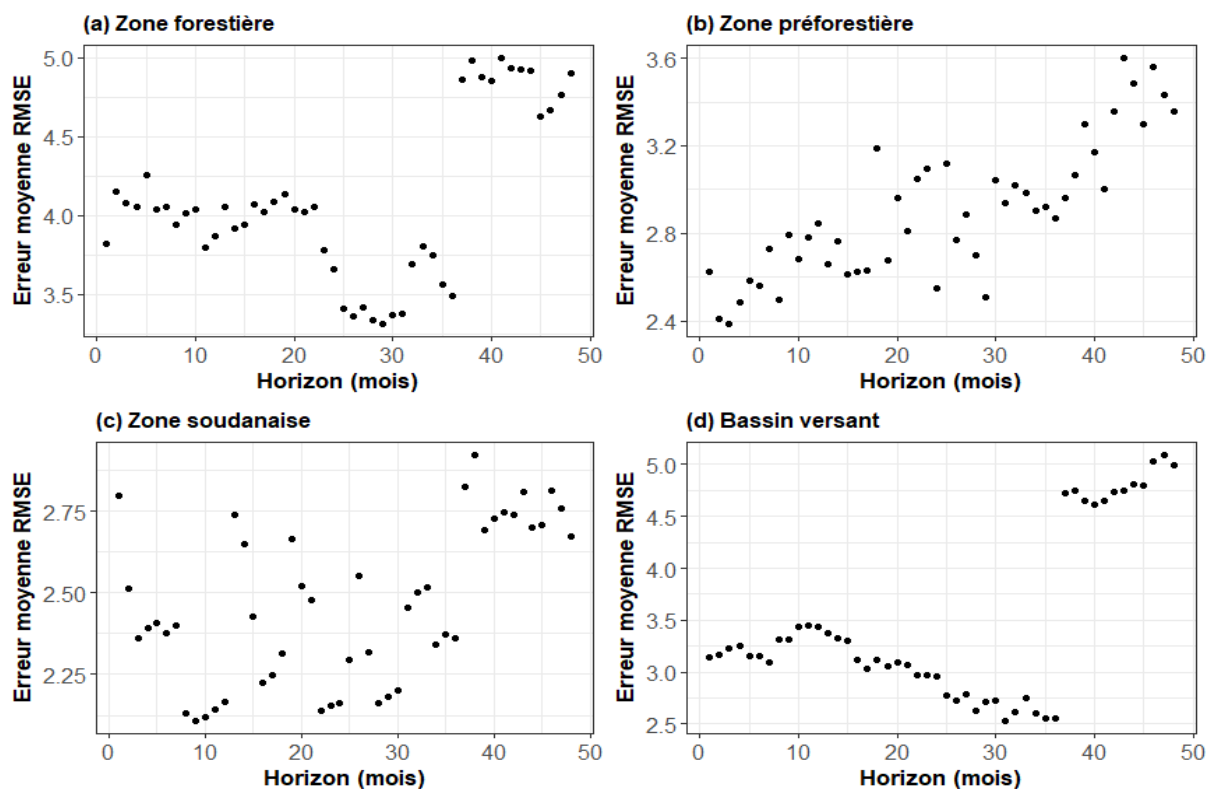


Annexe 13 : Evaluation des erreurs de prévisions des (a) foyers de feux et (b) surfaces brûlées en fonction des écorégions

a) Nombre de feux



b) Surfaces brûlées



Annexe 14 : Prévisions du nombre de feux [$\log(\text{NF}+1)$] et des surfaces brûlées [$\log(\text{SB}+1)$]
par ARIMA dans la zone forestière

Année	Mois	log(NF+1)			log(SB+1)		
		Prévision	F.95	E.95	Prévision	F.95	E.95
2017	1	4,321705751	3,0183496	5,625062	9,91119283	6,4595332	13,362853
2017	2	4,336815429	2,9769627	5,696668	8,8010631	5,3494034	12,252723
2017	3	4,25127732	2,869994	5,632561	3,2385351	-0,2131246	6,690195
2017	4	2,186713514	0,7971529	3,576274	2,4814664	-0,9701933	5,933126
2017	5	0,722160553	-0,6706183	2,114939	0	-3,4516597	3,45166
2017	6	0,103823309	-1,2902098	1,497856	0	-3,4516597	3,45166
2017	7	0,006493491	-1,3880288	1,401016	0	-3,4516597	3,45166
2017	8	0,002003566	-1,3927088	1,396716	0	-3,4516597	3,45166
2017	9	-0,002035056	-1,3968197	1,39275	0	-3,4516597	3,45166
2017	10	0,027301572	-1,3675062	1,422109	0,0883455	-3,3633142	3,540005
2017	11	0,434354051	-0,9604498	1,829158	6,5575798	3,1059201	10,009239
2017	12	3,063623585	1,6688547	4,458393	9,64566325	6,1940036	13,097323
2018	1	4,196657682	2,7916464	5,601669	10,0631181	6,5040375	13,622199
2018	2	4,258680525	2,8527004	5,664661	8,25390647	4,6948259	11,812987
2018	3	4,202455589	2,7960974	5,608814	4,83047584	1,2713953	8,389556
2018	4	2,156207795	0,749702	3,562714	1,85116987	-1,7079107	5,41025
2018	5	0,703099391	-0,7034639	2,109663	0	-3,5590806	3,559081
2018	6	0,091913153	-1,3146725	1,498499	0	-3,5590806	3,559081
2018	7	-0,000948439	-1,4075425	1,405646	0	-3,5590806	3,559081
2018	8	-0,002646442	-1,4092431	1,40395	0	-3,5590806	3,559081
2018	9	-0,004940562	-1,3811041	1,401655	0	-3,5590806	3,559081
2018	10	0,025486098	-1,3811041	1,432076	0,0659056	-3,493175	3,624986
2018	11	0,433219672	-0,9733555	1,839795	7,19676011	3,6376795	10,755841
2018	12	3,062914781	1,6563785	4,469451	9,12792753	5,568847	12,687008
2019	1	4,196214793	2,779754	5,612676	10,496995	6,9185111	14,075479
2019	2	4,258403791	2,8410253	5,675782	8,89169954	5,3132157	12,470183
2019	3	4,202282675	2,784546	5,620019	3,34528018	-0,2332037	6,923764
2019	4	2,156099751	0,7382233	3,573976	1,18309288	-2,395391	4,761577
2019	5	0,703031881	-0,7148991	2,120963	0	-3,5784839	3,578484
2019	6	0,09187097	-1,3260812	1,509823	0	-3,5784839	3,578484
2019	7	-0,000974796	-1,4189349	1,416985	0	-3,5784839	3,578484
2019	8	-0,002662911	-1,4206254	1,4153	0	-3,5784839	3,578484
2019	9	-0,004950852	-1,4229123	1,413011	0	-3,5784839	3,578484
2019	10	0,025479669	-1,3924763	1,443436	0,04212063	-3,5363632	3,620605
2019	11	0,433215655	-0,9847255	1,851157	7,46258	3,8840961	11,041064
2019	12	3,062912271	1,6450098	4,480815	9,59599016	6,0175063	13,174474
2020	1	4,196213225	2,768466	5,62396	10,3360855	6,5077435	14,164427
2020	2	4,258402811	2,8297453	5,68706	8,91230904	5,0839671	12,740651
2020	3	4,202282062	2,7732693	5,631295	3,1912224	-0,6371196	7,019564
2020	4	2,156099369	0,726948	2,132237	1,56314292	-2,265199	5,391485
2020	5	0,703031642	-0,7261739	2,132237	0	-3,828342	3,828342
2020	6	0,091870821	-1,4302093	1,521097	0	-3,828342	3,828342

Annexe 14. Suite

2020	7	-0,000974889	-1,4302093	1,42826	0	-3,828342	3,828342
2020	8	-0,002662969	-1,4318997	1,424285	0	-3,828342	3,828342
2020	9	-0,004950889	-1,4341866	1,424285	0	-3,828342	3,828342
2020	10	0,025479646	-1,4037507	1,45471	0,05565122	-3,7726907	3,883993
2020	11	0,43321564	-0,9959999	1,862431	7,18173902	3,3533971	11,010081
2020	12	3,062912262	1,633735	4,49209	9,64989243	5,8215505	13,478234

F.95 : Prévision la plus faible à intervalle de confiance de 95 %

E.95 : Prévision la plus élevée à intervalle de confiance de 95 %

Annexe 15 : Prévisions du nombre de feux [log(NF+1)] et des surfaces brûlées [log(SB+1)]
par ARIMA dans la zone préforestière

Année	Mois	log(NF+1)			log(SB+1)		
		Prévision	F.95	E.95	Prévision	F.95	E.95
2017	1	5,72323851	4,5067433	6,939734	10,931	7,7988687	14,063141
2017	2	4,78539484	3,5688996	6,00189	9,321733	6,1694692	12,473997
2017	3	2,40838402	1,1918888	3,624879	4,983572	1,8310493	8,136094
2017	4	0,62930239	-0,5871929	1,845798	0,000119726	-3,152406	3,152645
2017	5	-0,11101382	-1,3275091	1,105481	1,35949×10 ⁻⁵	-3,1525122	3,152539
2017	6	0,05093452	-1,1655607	1,26743	1,54369×10 ⁻⁶	-3,1525242	3,152527
2017	7	0	-1,2164952	1,216495	1,75285×10 ⁻⁷	-3,1525256	3,152526
2017	8	0,19366192	-1,0228333	1,410157	1,99035×10 ⁻⁸	-3,1525257	3,152526
2017	9	-0,06282304	-1,2793183	1,153672	2,26004×10 ⁻⁹	3,1525258	3,152526
2017	10	0,25695989	-0,9595354	1,473455	2,56626×10 ⁻¹⁰	-3,1525258	3,152526
2017	11	1,07540627	-0,141089	2,291902	8,313579	5,1610528	11,466104
2017	12	4,43275239	3,2162571	5,649248	11,531	8,3784725	14,683524
2018	1	5,6362603	4,4095577	6,862963	11,426	7,9997152	14,852286
2018	2	4,42184723	3,1951446	5,64855	8,920136	5,4904635	12,349808
2018	3	3,01247924	1,7857766	4,239182	6,958413	3,5286973	10,388129
2018	4	0,97868772	-0,2480149	2,20539	5,12988×10 ⁻⁵	-3,4296652	3,429768
2018	5	0,16364518	-1,0630574	1,390348	5,82495×10 ⁻⁶	-3,4297106	3,429722
2018	6	0,05112016	-1,1755824	1,277823	6,6142×10 ⁻⁷	-3,4297158	3,429717
2018	7	0	-1,2267026	1,226703	7,51039×10 ⁻⁸	-3,4297164	3,429717
2018	8	0,08470006	-1,3114027	1,142003	8,52801×10 ⁻⁹	-3,4297165	3,429716
2018	9	0,21201162	-1,014691	1,438714	9,68352×10 ⁻¹⁰	-3,4297165	3,429716
2018	10	0,25789645	-0,9688062	1,484599	1,09956×10 ⁻¹⁰	-3,4297165	3,429716
2018	11	0,90325369	-0,3234489	2,129956	9,586316	6,1565995	13,016032
2018	12	4,48948174	3,2627791	5,716184	11,18456	7,7548407	14,614274
2019	1	5,65870025	4,4238976	6,893503	11,73121	8,2333806	15,229045
2019	2	4,50825403	3,2734513	5,743057	8,660335	5,1616333	5,1616333
2019	3	2,75877667	1,523974	1,523974	4,874473	1,3757605	8,373186
2019	4	0,82240038	-0,4124023	2,057203	2,6258×10 ⁻⁵	-3,4986868	3,498739
2019	5	0,1924412	-1,0423615	1,427244	2,98158×10 ⁻⁶	-3,49871	3,498716
2019	6	0,03836818	-1,1964345	1,273171	3,38557×10 ⁻⁷	-3,4987127	3,498713
2019	7	0	-1,2348027	1,234803	3,8443×10 ⁻⁸	-3,498713	3,498713
2019	8	0,14086115	-1,0939415	1,375664	4,36519×10 ⁻⁹	-3,498713	3,498713

Annexe 15. Suite

2019	9	0,22874257	-1,0060601	1,463545	4,95665×10 ⁻¹⁰	-3,498713	3,498713
2019	10	0,19356387	-1,0412388	1,428367	5,62825×10 ⁻¹¹	-3,498713	3,498713
2019	11	0,80691861	-0,4278841	2,041721	9,193827	5,6951138	12,69254
2019	12	4,67862887	3,4438262	5,913432	11,81215	8,3134365	15,310863
2020	1	5,6805591	4,4405752	6,920543	11,29156	7,2513411	15,33177
2020	2	4,59959172	3,3596078	5,839576	8,91230904	5,0839671	12,740651
2020	3	2,60660242	1,3666185	3,846586	3,1912224	-0,6371196	7,019564
2020	4	0,73435385	-0,5056301	1,974338	1,56314292	-2,265199	5,391485
2020	5	0,12377876	-1,1162052	1,363763	0	-3,828342	3,828342
2020	6	0,03827522	-1,2017087	1,278259	0	-3,828342	3,828342
2020	7	0	-1,2399839	1,239984	0	-3,828342	3,828342
2020	8	0,21137779	-1,0286061	1,451362	0	-3,828342	3,828342
2020	9	0,15999218	-1,0799917	1,399976	0	-3,828342	3,828342
2020	10	0,1930949	-1,046889	1,433079	0,05565122	-3,7726907	3,883993
2020	11	0,84966997	-0,390314	2,089654	7,18173902	3,3533971	11,010081
2020	12	4,66511473	3,4251308	5,905099	9,64989243	5,8215505	13,478234

F.95 : Prévision la plus faible à intervalle de confiance de 95 %

E.95 : Prévision la plus élevée à intervalle de confiance de 95 %

Annexe 16 : Prévisions du nombre de feux [log(NF+1)] et des surfaces brûlées [log(SB+1)]
par ARIMA dans la zone soudanaise

Année	Mois	log(NF+1)			log(SB+1)		
		Prévision	F.95	E.95	Prévision	F.95	E.95
2017	1	4,215246	2,78067491	5,649818	9,811847	6,7464561	12,877237
2017	2	3,366764	1,89841664	4,835112	7,419829	4,3190846	10,520574
2017	3	1,719845	0,25149762	3,188193	2,328697	-0,7720479	5,429441
2017	4	7,64258×10 ⁻²²	-1,46834779	1,468348	-6,83952×10 ⁻¹⁸	-3,1007445	3,100744
2017	5	2,13818×10 ⁻²²	-1,46834779	1,468348	9,35805×10 ⁻¹⁹	-3,1007445	3,100744
2017	6	-3,28503×10 ⁻¹⁹	-1,46834779	1,468348	1,63342×10 ⁻²¹	-3,1007445	3,100744
2017	7	-1,61704×10 ⁻²⁰	-1,46834779	1,468348	-2,08371×10 ⁻¹⁹	-3,1007445	3,100744
2017	8	-1,31779×10 ⁻²²	-1,46834779	1,468348	-5,49037×10 ⁻²⁰	-3,1007445	3,100744
2017	9	-3,7494×10 ⁻²²	-1,46834779	1,468348	-1,25014×10 ⁻¹⁷	-3,1007445	3,100744
2017	10	2,02184×10 ⁻²²	-1,46834779	1,468348	-4,65644×10 ⁻¹⁹	-3,1007445	3,100744
2017	11	0,5114142	-0,9569336	1,979762	7,010592	3,9098473	10,111336
2017	12	4,064507	2,59615879	5,532854	11,02407	7,9233224	14,124811
2018	1	4,280294	2,68095578	5,879631	9,6958	6,2347364	13,156864
2018	2	3,402131	1,79681943	5,007443	7,151329	3,6823498	10,620307
2018	3	1,573781	-0,03153142	3,179092	3,786988	0,3180088	7,255967
2018	4	7,38135×10 ⁻²²	-1,60531192	1,605312	-1,31233×10 ⁻¹⁷	-3,4689789	3,468979
2018	5	2,19544×10 ⁻²²	-1,60531192	1,605312	1,89115×10 ⁻¹⁸	-3,4689789	3,468979
2018	6	-3,28504×10 ⁻¹⁹	-1,60531192	1,605312	-8,75017×10 ⁻¹⁹	-3,4689789	3,468979
2018	7	-1,61696×10 ⁻²⁰	-1,60531192	1,605312	-1,66459×10 ⁻¹⁹	-3,4689789	3,468979
2018	8	-1,34323×10 ⁻²²	-1,60531192	1,605312	-6,16429×10 ⁻²⁰	-3,4689789	3,468979
2018	9	-3,6354×10 ⁻²²	-1,60531192	1,605312	-1,07939×10 ⁻¹⁷	-3,4689789	3,468979
2018	10	-1,98833×10 ⁻²³	-1,60531192	1,605312	-1,28738×10 ⁻¹⁸	-3,4689789	3,468979

Annexe 16. Suite

2018	11	0,3505362	-1,25477574	1,955848	8,118754	4,6497756	11,587733
2018	12	3,98389	2,37857767	5,589202	10,49688	7,0278983	13,965856
2019	1	4,257505	2,45352467	6,061484	10,02966	6,4420405	13,61728
2019	2	3,444711	1,63180923	5,257613	7,186299	3,5959735	10,776625
2019	3	1,595366	-0,21753602	3,408268	2,00876	-1,5815662	5,599085
2019	4	7,44304×10 ⁻²²	-1,81290187	1,812902	-1,56844×10 ⁻¹⁷	-3,5903259	3,590326
2019	5	2,18192×10 ⁻²²	-1,81290187	1,812902	2,28052×10 ⁻¹⁸	-3,5903259	3,590326
2019	6	-3,28504×10 ⁻¹⁹	-1,81290187	1,812902	-5,22723×10 ⁻¹⁹	-3,5903259	3,590326
2019	7	-1,61698×10 ⁻²⁰	-1,81290187	1,812902	-1,49377×10 ⁻¹⁹	-3,5903259	3,590326
2019	8	-1,33722×10 ⁻²²	-1,81290187	1,812902	-6,43896×10 ⁻²⁰	-3,5903259	3,590326
2019	9	-3,66232×10 ⁻²²	-1,81290187	1,812902	-1,21463×10 ⁻¹⁷	-3,5903259	3,590326
2019	10	3,25608×10 ⁻²³	-1,81290187	1,812902	-1,62229×10 ⁻¹⁸	-3,5903259	3,590326
2019	11	0,3484283	-1,46447353	2,16133	7,203604	3,6132785	10,79393
2019	12	3,982551	2,16964913	5,795453	10,74799	7,1576622	14,338314
2020	1	4,258535	2,2514209	6,265649	9,915666	5,8465037	13,984827
2020	2	3,414591	1,39869096	5,430491	7,290102	3,2104982	11,369705
2020	3	1,609565	-0,40633487	3,625466	2,236566	-1,8430373	6,31617
2020	4	7,45555×10 ⁻²²	-2,01590027	2,0159	-1,15708×10 ⁻¹⁷	-4,0796036	4,079604
2020	5	2,17918×10 ⁻²²	-2,01590027	2,0159	1,65511×10 ⁻¹⁸	-4,0796036	4,079604
2020	6	-3,28504×10 ⁻¹⁹	-2,01590027	2,0159	-3,02482×10 ⁻¹⁹	-4,0796036	4,079604
2020	7	-1,61698×10 ⁻²⁰	-2,01590027	2,0159	-1,76814×10 ⁻¹⁹	-4,0796036	4,079604
2020	8	-1,33601×10 ⁻²²	-2,01590027	2,0159	-5,99778×10 ⁻²⁰	-4,0796036	4,079604
2020	9	-3,66778×10 ⁻²²	-2,01590027	2,0159	-1,22433×10 ⁻¹⁷	-4,0796036	4,079604
2020	10	4,31945×10 ⁻²³	-2,01590027	2,0159	-1,08435×10 ⁻¹⁸	-4,0796036	4,079604
2020	11	0,3785134	-1,63738689	2,394414	7,159353	3,079749	11,238956
2020	12	3,997784	1,98188412	6,013685	10,86087	6,7812672	14,940474

F.95 : Prévision la plus faible à intervalle de confiance de 95 %

E.95 : Prévision la plus élevée à intervalle de confiance de 95 %

Annexe 17 : Prévision du nombre de feux [log(NF+1)] et des surfaces brûlées [log(SB+1)] par ARIMA dans l'ensemble du BVN

Année	Mois	log(NF+1)			log(SB+1)		
		Prévision	F.95	E.95	Prévision	F.95	E.95
2017	1	6,15028121	4,77100596	7,52955646	11,34093	8,15447187	14,527393
2017	2	5,30679766	3,90591943	6,7076759	10,3388	7,13206291	13,545538
2017	3	4,51242223	3,11154399	5,91330046	4,83732	1,63058279	8,044058
2017	4	2,40570489	1,00482666	3,80658313	3,143645	-0,06309312	6,350382
2017	5	0,77938491	-0,62149333	2,18026315	-1,38332×10 ⁻¹³	-3,20673767	3,206738
2017	6	0,12880123	-1,272077	1,52967947	3,07926×10 ⁻¹⁸	-3,20673767	3,206738
2017	7	-8,7855×10 ⁻¹⁰	-1,40087824	1,40087823	-7,3412×10 ⁻¹⁹	-3,20673767	3,206738
2017	8	0,20388133	-1,1969969	1,60475957	2,13958×10 ⁻¹⁸	-3,20673767	3,206738
2017	9	0,18992951	-1,21094872	1,59080775	-2,25234×10 ⁻¹⁴	-3,20673767	3,206738
2017	10	0,22862508	-1,17225315	1,62950332	0,889145	-2,31759267	4,095883
2017	11	2,19722027	0,79634204	3,59809851	8,783233	5,57649523	11,989971
2017	12	5,57978878	4,1789263	6,98065126	12,22274	9,01599816	15,429473
2018	1	6,12544896	4,71358111	7,53731681	11,64656	8,3643725	14,928749

Annexe 17. Suite

2018	2	5,30679766	3,89456814	6,71902719	9,704338	6,42119814	12,987479
2018	3	4,51242223	3,1001927	5,92465175	6,941583	3,65844316	10,224724
2018	4	2,40570489	0,99347536	3,81793442	1,809199	-1,4739408	5,09234
2018	5	0,77938491	-0,63284462	2,19161444	$-7,96104 \times 10^{-14}$	-3,28314025	3,28314
2018	6	0,12880123	-1,28342829	1,54103076	$1,60647 \times 10^{-18}$	-3,28314025	3,28314
2018	7	$-8,7855 \times 10^{-10}$	-1,41222953	1,41222953	$-4,23109 \times 10^{-19}$	-3,28314025	3,28314
2018	8	0,20388133	-1,20834819	1,61611086	$1,2318 \times 10^{-18}$	-3,28314025	3,28314
2018	9	0,18992951	-1,22230001	1,60215904	$-1,29625 \times 10^{-14}$	-3,28314025	3,28314
2018	10	0,22862508	-1,18360445	1,64085461	0,511712	-2,77142826	3,794852
2018	11	2,19722027	0,78499074	3,6094498	9,843035	6,55989502	13,126176
2018	12	5,57978878	4,16757488	6,99200267	11,70846	8,42532246	14,991603
2019	1	6,12544896	4,70231747	7,54858045	12,10177	8,81107606	15,392463
2019	2	5,30679766	3,88330736	6,73028797	10,03928	6,74849254	13,330073
2019	3	4,51242223	3,08893192	5,93591253	5,261248	1,97045784	8,552038
2019	4	2,40570489	0,98221459	3,8291952	0,8637739	-2,42701613	4,154564
2019	5	0,77938491	-0,64410539	2,20287522	$-3,80077 \times 10^{-14}$	-3,29079002	3,29079
2019	6	0,12880123	-1,29468907	1,55229154	$5,63037 \times 10^{-19}$	-3,29079002	3,29079
2019	7	$-8,7855 \times 10^{-10}$	-1,42349031	1,4234903	$-2,02764 \times 10^{-19}$	-3,29079002	3,29079
2019	8	0,20388133	-1,21960897	1,62737164	$5,88656 \times 10^{-19}$	-3,29079002	3,29079
2019	9	0,18992951	-1,23356079	1,61341982	$-6,18873 \times 10^{-15}$	-3,29079002	3,29079
2019	10	0,22862508	-1,19486522	1,65211539	0,2443089	-3,04648115	3,535099
2019	11	2,19722027	0,77372997	3,62071058	9,629161	6,33837089	12,919951
2019	12	5,57978878	4,15631398	7,00326357	12,15835	8,86756354	15,449144
2020	1	6,12544896	4,69114228	7,55975563	12,15835	8,09308182	15,430021
2020	2	5,30679766	3,87213497	6,74146036	10,20224	6,5291958	13,875277
2020	3	4,51242223	3,07775953	5,94708492	4,962523	1,2894822	8,635563
2020	4	2,40570489	0,9710422	3,84036759	1,906877	-1,76616374	5,579917
2020	5	0,77938491	-0,65527779	2,21404761	$-8,39087 \times 10^{-14}$	-3,67304048	3,67304
2020	6	0,12880123	-1,30586146	1,56346393	$1,71428 \times 10^{-18}$	3,67304048	3,67304
2020	7	$-8,7855 \times 10^{-10}$	-1,4346627	1,4346627	$-4,45874 \times 10^{-19}$	-3,67304048	3,67304
2020	8	0,20388133	-1,23078136	1,63854403	$1,29825 \times 10^{-18}$	-3,67304048	3,67304
2020	9	0,18992951	-1,24473318	1,62459221	$-1,36623 \times 10^{-14}$	-3,67304048	3,67304
2020	10	0,22862508	-1,20603761	1,66328778	0,5393389	-3,13370154	4,212379
2020	11	2,19722027	0,76255757	3,63188297	9,210254	5,53721347	12,883294
2020	12	5,57978878	4,14514146	7,01443609	12,21471	8,54167016	15,887751

F.95 : Prévision la plus faible   intervalle de confiance de 95 %

E.95 : Prévision la plus élevée   intervalle de confiance de 95 %

Annexe 18 : Perceptions des mois dans lesquels les risques de feu sont élevés

Mois	Proportion (%)			
	Abigui	Arikokaha	Pacobo	Ensemble
Janvier	100	92,31	70,13	87,92
Février	97,65	76,92	85,71	87,08
Mars	0	1,28	42,86	14,17
Avril	0	0	0	0
Mai	0	0	0	0
Juin	0	0	0	0
Juillet	0	0	0	0
Août	0	0	1,3	0,42
Septembre	0	0	3,9	1,25
Octobre	0	0	1,3	0,42
Novembre	1,18	5,13	7,79	4,58
Décembre	36,47	53,85	35,06	41,67

Annexe 19 : Perceptions des indicateurs de haut risque de feux de brousse

Perceptions	Proportion (%)			
	Abigui	Arikokaha	Pacobo	Ensemble
Expérience des vents d'harmattan	97,65	89,74	35,06	75
Haute intensité du soleil (insolation)	88,24	33,33	72,73	65,42
Saison sèche prolongée	43,53	19,23	92,21	51,25
Roussissement (ou brunissement) des herbes et graminées	35,29	47,44	40,26	40,83
Les arbres dégagent/perdent leurs feuilles	2,35	3,85	96,1	32,92
Migration de certains oiseaux	0	0	1,3	0,42
Autres	0	2,56	0	0,83
Ne sait pas	0	1,28	0	0,42

Article

Assessing the Impact of Climate Variability on Wildfires in the N'Zi River Watershed in Central Côte d'Ivoire

Jean-Luc Kouakou Kouassi ^{1,*}, Narcisse Eboua Wandan ¹ and Cheikh Mbow ²

¹ Laboratoire Science, Société & Environnement, Unité Mixte de Recherche et d'Innovation (UMRI) Sciences Agronomiques et Génie Rural, Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB), P.O. Box 1093, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire; wandaneb@yahoo.fr

² START International Secretariat, 1440 G Street NW, Washington, DC 20005, USA; cmbow@start.org

* Correspondence: kouakou.kouassi@inphb.ci; Tel.: +225-0742-1858

Received: 30 July 2018; Accepted: 25 September 2018; Published: 28 September 2018



check for updates

Abstract: This study evaluates the impact of climate variability on wildfire regime in the N'Zi River Watershed (NRW) in central Côte d'Ivoire. For that purpose, MODIS active fire and monthly burned area data are used to evaluate wildfire occurrence, impacts and trends. Wildfire data are compared to past trends of different climatic parameters extracted from long-term meteorological records. Generalized additive models and Spearman correlations are used to evaluate the relationships between climate variables and wildfire occurrence. Seasonal Kendall and Sen's slope methods were used for trend analysis. Results showed that from 2001 to 2016, 19,156 wildfire occurrences are recorded in the NRW, of which 4443 wildfire events are observed in forest, 9536 in pre-forest, and 5177 in Sudanian zones. The burned areas are evaluated at 71,979.7 km², of which 10,488.41 km² were registered in forest, 33,211.96 km² in pre-forest, and 28,279.33 km² in Sudanian zones. A downward trend is observed in fire records. The results indicates a strong correlation between some climatic variables and wildfire regime in this ecoregion. These correlations can be used to develop models that could be used as prediction tools for better management of fire regimes and support decision-making in the NRW.

Keywords: wildfire; climate variability; correlation; seasonal Kendall test; generalized additive model (GAM); N'Zi River Watershed (NRW)

1. Introduction

Wildfires are recognized as one of the most widespread global environmental disturbances, along with natural disasters such as droughts, floods or hurricanes [1]. Each year, 350 million hectares of vegetation affected by fires around the world, half of them in sub-Saharan Africa [2]. These wildfires have several consequences, including global warming, loss of life, air pollution, desertification and loss of biodiversity [3–5].

Climate strongly influences global wildfire activity, and recent forest fire events can signal weather-induced pyrogeographic changes [6]. Various products of fire danger rating systems are based on ignition source but also on propagation factors with climate a major modulator [7].

According to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), climate change is the largest and certainly the most critical of all the environmental challenges facing societies in the present century. Global average surface temperature at the land surface increased by 0.85 °C during the 1880–2012 period, with the warmest temperatures ever recorded over the past three decades [8]. Climate change and variability pose a growing challenge in wildfire control efforts with the biggest challenge in developing countries [9–11].

Wildfires are a key element in the landscape dynamics of West Africa [12,13]. Depending on the ecological zones and the periods of the year, wildfires are considered either as a threat to fight, or as a real management tool for sustainable resource use and conservation objectives [14]. Despite their benefits, wildfires cause significant damage to natural resources. They can lead to loss of organic matter, depletion of moisture reserves through intense evaporation, erosion and soil leaching, thus leading to lower crop yield, grazing productivity and biodiversity. The impact of wildfires on air quality is known: the release of emissions particles and volatile organic compounds, along with a significant amount of greenhouse gas [15,16].

Recent studies on drivers of deforestation in Côte d'Ivoire have shown that wildfires account for 3 % and 23 % of direct drivers of deforestation and forest degradation, respectively [17]. These wildfires cause devastating damage, threaten people and their activities, and have a very high social and economic cost [18]. Each year, around January and February, the country experiences wildfires that ravage hundreds of thousands of hectares of land suitable for agriculture, particularly in the northern half of the country. During 2016's wildfire season, nearly 15,000 ha of cropland and 11,000 ha of forest were destroyed, and 10 villages were hit by flames, with many hundreds of huts lost and 17 deaths registered in the country. The financial loss related to the fire damage is estimated at nearly 204 billion CFA francs, equivalent to approximately USD 363 million [19].

However, wildfire occurrence in these areas is still poorly understood. Little information is available about fire regimes, the ecological effects of wildfires, and associated emissions from biomass combustion in a changing climate. The lack of a strong national fire monitoring policy makes fire statistics unreliable and, also, limits their usefulness. Also, several studies have revealed the downward trend of precipitation and the variability of temperature over the country [20–24]. Although the influence of climate change on wildfires has been studied globally, uncertainties about this influence at a global, regional and hyper-regional level still exist [25].

Therefore, it is very important to understand the impact of climate variability at a fine scale in order to define clear wildfire management and prevention methods and support decision-making in the NRW to mitigate any adverse consequences of changing climate and wildfires.

The purpose of this paper was to assess the potential relationship between climate conditions and wildfire occurrence in the N'Zi River Watershed in central Côte d'Ivoire.

2. Materials and Methods

2.1. Study Site

Located in central Côte d'Ivoire, the study area is the N'Zi River Watershed, a tributary of the Bandama River. It lies between 3°85' W and 5°38' W longitude and between 5°97' N and 9°43' N latitude, with an altitude ranging between less than 100 m a.s.l. in the south and more than 600 m a.s.l. in the north (Figure 1). With an approximate area of 35,309 km², the NRW occupies nearly 11 % of the national territory and straddles 80 small administrative entities (subprefectures) of the District of Yamoussoukro and eight administrative regions (Agneby-Tiassa, Belier, Gbeke, Hambol, Iffou, Moronou, N'Zi and Tchologo). Due to its longitudinal configuration, the NRW spans the major climatic regions of Côte d'Ivoire and is covered by forest ecosystems in the south, mosaic forest–savannah ecosystems in the centre and savannah ecosystems in the north.

The forest zone is characterized by equatorial transition climate (Guinean climate) with annual rainfall between 1300 and 2400 mm. Dense moist forest is the characteristic vegetation found in this zone, with the remaining forest on the top of hills and in classified forests; the majority of the forest has been converted to agricultural land (mainly for cocoa, coffee and some food crops). In the pre-forest zone, there is an attenuated equatorial transition climate (Baoulean climate). The annual rainfall ranges between 1500 and 2200 mm. The vegetation is characterized by Guinean forest–savannah mosaic, with forest patches along the river. The open forests are composed of trees whose crowns almost meet, below which the land and grass cover is very sparse. The wooded savannahs and open wooded savannahs are made up of trees or shrubs sparse with graminaceous groups (especially *Panicum* spp., *Loudetia*

arundinacea, *L. simplex*, etc.) and elephant palm (*Borassus aethiopum*) stands, which are easily affected by wildfires. These two ecoregions have two dry seasons and two rainy seasons. In the Sudanian zone, the climate is characterized by a dry tropical transition climate (Sudano-Guinean climate) with two seasons. The landscape is mainly composed of grassland and wooded grasslands. In this area, the herbaceous cover, ranging in height from 20 cm to 1.5 m, is composed of species of *Panicum* and *Pennisetum*, which are regularly affected by wildfires [26,27].

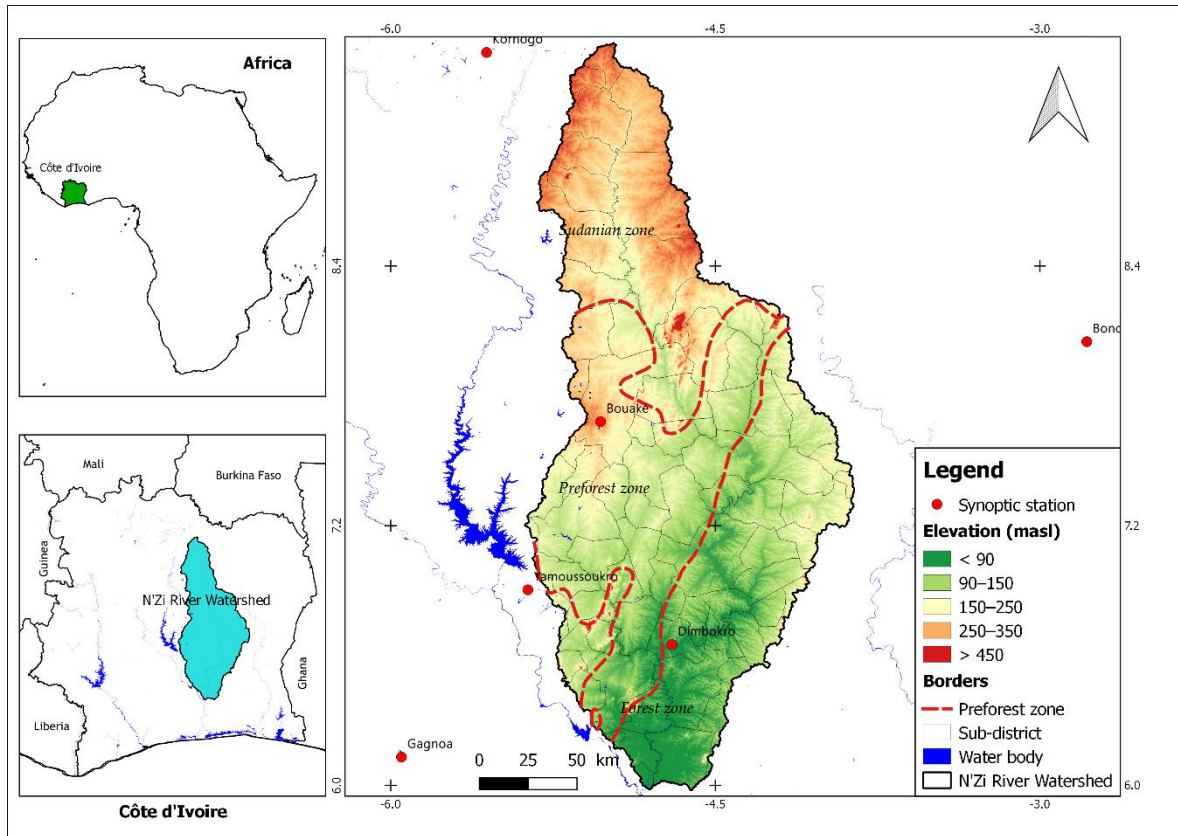


Figure 1. Map of N'Zi River Watershed, showing synoptic stations along with elevation.

2.2. Dataset Description

2.2.1. Meteorological Data

For this study, data were obtained from synoptic weather stations located in the catchment, and within a 100 km radius.

Time series of daily precipitation, maximum air temperature and minimum air temperature, wind speed, relative humidity, sea level pressure, etc. of each selected synoptic station were gathered from the NOAA National Climatic Data Center online data retrieval tool [28]. The data were then pooled and mean values were computed to evaluate long-term trends in terms of climate variables.

In addition to meteorological variables, we used three drought and fire danger indices in order to estimate the impact of these indices in wildfire occurrence in the area. These indices are:

- the Angstrom Index (AI), used primarily in Sweden and its inputs are the air temperature and relative humidity to calculate a numerical index of fire danger [29];
- the Lowveld Fire Danger Index (FDI), widely used in South Africa and providing a reasonably good measure of short-term wildfire risk. The inputs are the maximum temperature, the wind speed and the relative humidity [30];
- the Standardized Precipitation Index (SPI), used to quantify the precipitation deficit and characterize meteorological drought on a range of timescales, and based only on precipitation [31].

2.2.2. Active Fire and Burned Area Data

Spatial and temporal patterns of wildfires occurrence in the area were assessed with a combination of the MODIS MCD14DL active fire products with a resolution of 1 km [32], VIIRS VNP14IMGTDL active fire products with a resolution of 375 m [33] derived from the MODIS and VIIRS sensors respectively, and burned area scars generated from the 500 m resolution MODIS burned area product MCD64A1 [34]. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) is an onboard sensor aboard the Terra and Aqua satellites of the Earth Observing System (EOS) program of the National Aeronautical and Space Administration (NASA), launched in 1999 and 2002, respectively [35].

The MODIS MCD14DL Collection 6 and VIIRS VNP14IMGTDL products contain geographic coordinates, day of detection, brightness temperature, fire radiation power, and detection confidence level for all MODIS/VIIRS fire pixels. These data were produced by the University of Maryland and downloadable from the NASA LANCE FIRMS website [36,37].

The MCD64A1 Burned Area product is a monthly Level 3 MODIS 500 m resolution product, derived from Terra/Aqua MODIS sensor, containing per pixel burn information and metadata [38]. The pixels detected as burned pixels are directly converted to burnt areas. Monthly data from the MODIS subcontinental Windows 9, containing data on West African countries, are available from the University of Maryland server (<ftp://ba1.geog.umd.edu>) and were used for this study.

2.3. Methodology

2.3.1. Seasonal Kendall Test

Seasonal Kendall test is an extension of the Mann–Kendall test, which is used for the detection of significant trend in environmental data series [39–41]. The seasonal Kendall test accounts for seasonality by computing the Mann–Kendall test on each of m seasons separately, and then combining the results. This test, entirely based on ranks, is robust against non-normality and censoring [42]. Kendall’s S_i statistic S_i for each season are summed to form the overall statistic S' Equation (1):

$$S' = \sum_{i=1}^m S_i. \tag{1}$$

Positive (negative) signs of the test S statistics indicate an upward (downward) trend in the data. When the product of number of seasons and number of years is more than about 25, the distribution of S' can be approximated quite well by a normal distribution with expectation equal to the sum of the expectations (zero) of the individual S_i under the null hypothesis, and variance equal to the sum of their variances. The variance of the seasonal Kendall statistics is given by Equation (2):

$$\text{Var}(S') = \frac{1}{18} [n(n - 1)(2n + 5) - \sum_{i=1}^q t_i (t_i - 1) (2t_i + 5)], \tag{2}$$

where t_i is the number of ties present to sample i .

The standardized SK test statistics (Z) can be estimated by Equation (3):

$$Z = \begin{cases} \frac{S' - 1}{\sqrt{\text{Var}(S')}} & \text{if } S' > 0 \\ 0 & \text{if } S' = 0 \\ \frac{S' + 1}{\sqrt{\text{Var}(S')}} & \text{if } S' < 0 \end{cases} \tag{3}$$

The Z statistic follows a standard normal distribution; if its value is positive, it signifies an upward trend and if its value is negative it signifies a downward trend. If the value of Z is greater than $Z_{\alpha/2}$ then it is considered a significant trend (where α is the significance level) and the null hypothesis is rejected.

2.3.2. Sen’s Slope

Although the Kendall statistic indicates the presence of a monotonic trend in the time series, it is often supplemented by the Theil–Sen slope estimator (tau or τ) [43], which gives the trend corresponding linear median. This is a nonparametric method that assumes a linear trend in the time series data and uncorrelated data.

$$\tau = \text{median}\left(\frac{y_j - y_i}{x_j - x_i}\right); j > i \tag{4}$$

The non-parametric seasonal Kendall test and the Sen’s Slope estimator for fire data were calculated using the EnvStats package [44] of the R software [45].

2.3.3. Spearman Correlation

The correlation between meteorological and wildfire variables (number of wildfires NF and burned area SB) was assessed using the Spearman non-parametric correlation test (Spearman rank coefficient denoted by rho) at phytogeographic level using monthly data, in order to select most correlated climatic variables with wildfire variables. A correlation matrix was built at phytogeographic level by crossing the studied wildfire variables to the meteorological variables in Table 1.

Table 1. Selected meteorological variables, drought and fire danger indices.

Type	Code	Signification	Unit
Meteorological variables	PRCP	Total precipitation	mm
	TMOY	Mean temperature	°C
	MAX	Maximum temperature	°C
	MIN	Minimum temperature	°C
	AT	Thermal amplitude	°C
	ET0	Reference evapotranspiration	mm
	WDSP	Wind speed	m/s
	MXSPD	Maximum wind speed	m/s
	RH	Relative humidity	%
	VDP	Vapour-pressure deficit	mbar
	SLP	Sea level pressure	mbar
	DEWP	Dewpoint	°C
VISIB	Visibility	km	
Drought and fire danger indices	SPI1	1-month Standardized Precipitation Index	
	SPI3	3-month Standardized Precipitation Index	
	SPI6	6-month Standardized Precipitation Index	
	SPI9	9-month Standardized Precipitation Index	
	SPI12	12-month Standardized Precipitation Index	
	AI	Angstrom Index	
	FDI	Lowveld Fire Danger Index	

2.3.4. Nonparametric Regression

As the distributions of wildfire variables were not normal, we analysed the relationship between environmental factors and wildfires variables using generalized additive model (GAM) [46]. The GAMs are useful for identifying non-linear relationships and do not require a priori knowledge of the shape of the response curves, which is determined by the data itself [47,48]. A GAM model is constructed by the sum of smoothed functions of the predictor variables, which can identify the types of effects and nonlinear relationships between variables. For this purpose, it is common to use polynomials defined based on intervals known as splines [48,49]. In general, the structure of a GAM according to Wood [48] could be estimated by Equation (5):

$$g(\mu_i) = A_i\theta + f_1(x_{1i}) + f_2(x_{2i}) + f_3(x_{3i}, x_{4i}) + \dots, \tag{5}$$

where $\mu_i \equiv E(Y_i)$ and $Y_i \sim EF(\mu_i, \phi)$. Y_i is a response variable, $EF(\mu_i, \phi)$ denotes an exponential family distribution with mean μ_i and scale parameter, ϕ , A_i is a row of the model matrix for any strictly parametric model components, θ is the corresponding parameter vector, and the f_j are smooth functions of the covariates, x_k .

We used a stepwise approach to determine the model with the optimal set of covariates based on the lowest Akaike Information Criterion (AIC) and lowest generalized cross-validation (GCV) score. Both process and observation error were assumed to have Gaussian distributions. The significance of the spline terms was assessed and fitted with linear interactions when non-significance was detected. The shapes of the functional forms for the selected covariates were plotted. When the slopes of the functional forms are positive, the covariates are related positively to the dependent variables, or vice versa.

For accuracy assessment, we used the 10-fold repeated cross-validation [50] (each model was re-fitted 10 times using 90 % of the data and predictions derived from the fitted models were compared with observations of the remaining 10 %). We derived the coefficient of determination (R^2) and root mean squared error to quantify the goodness of fit of the models. Those with the lowest AIC [51], the highest R^2 (adjusted for number of predictors in the model) and the highest deviance explained were considered. In this study, we performed in the R computing environment [45], GAM regression using the package *mgcv* [47], and 10-fold cross-validation using the package *gamclass* [52].

3. Results

3.1. Wildfire Regime and Trends

In the 2001–2016 period, 19,156 wildfires were detected in the N’Zi River Watershed (NRW), which burnt approximately 71,979.7 km² of vegetative lands. Wildfire occurrence showed strong seasonal dependence within the NRW. This seasonality was similar among ecological zones (Figure 2). Wildfires were most common during the warm season throughout both ecoregions, with moderate wildfire activity extending into the rainy season (March–April). Wildfires typically peaked in terms of both numbers and surface burned (SB) from December to January across the preforest zone. Across the watershed, a high number of wildfires and a large burned area were detected in the preforest zone (Figures 2 and 3). In the study area, December was the hotspot month, with 8116 wildfires detected (42.4 %), and January the most impacted month, with 36,557.77 km² of vegetation burned (50.8 %).

At ecoregion level, the wildfire occurrence has been evaluated at 4443 wildfires, 9536 wildfires and 5177 wildfires for the forest, pre-forest and Sudanian zones, respectively. The damages associated to these wildfires were estimated at 10,488.41 km², 33,211.96 km², and 28,279.33 km² for the forest, pre-forest and Sudanian zones, respectively.

The highest wildfire occurrence and extent of burnt area were registered in 2008 (with 1949 wildfires representing 10.2 % of active wildfires) and 2016 (with 6593.89 km² representing 9 % of total burnt areas), respectively. Their lowest values have been detected 2001 for NF and 2014 for SB (Figure 3). Considering the whole NRW, wildfire activity has increased from 2001 to 2008, and was decreasing in the last decade for both NF and SB. This activity was similar in all the ecoregions, with the exception of the Sudanian zone, where the wildfire activity was intense from 2002 to 2005 and decreased significantly after that date.

Wildfire data trends have been analysed both for the whole NRW and each ecoregion in order to make some inferences about the evolution of wildfires over the years. Table 2 shows the results of the seasonal Kendall test and Sen’s Slope for fire data for Burned Area (SB) and Number of wildfires (NF).

Considering the whole NRW, the SB monthly trend has not shown significance from a statistical point of view. By analysing the SB trend of each ecoregion, it is evident that the preforest and Sudanian zones did not show any significant trend for both tests, while the seasonal Kendall test was significant for the forest zone, with $p < 0.05$. In these ecoregions, the SB showed a negative trend.

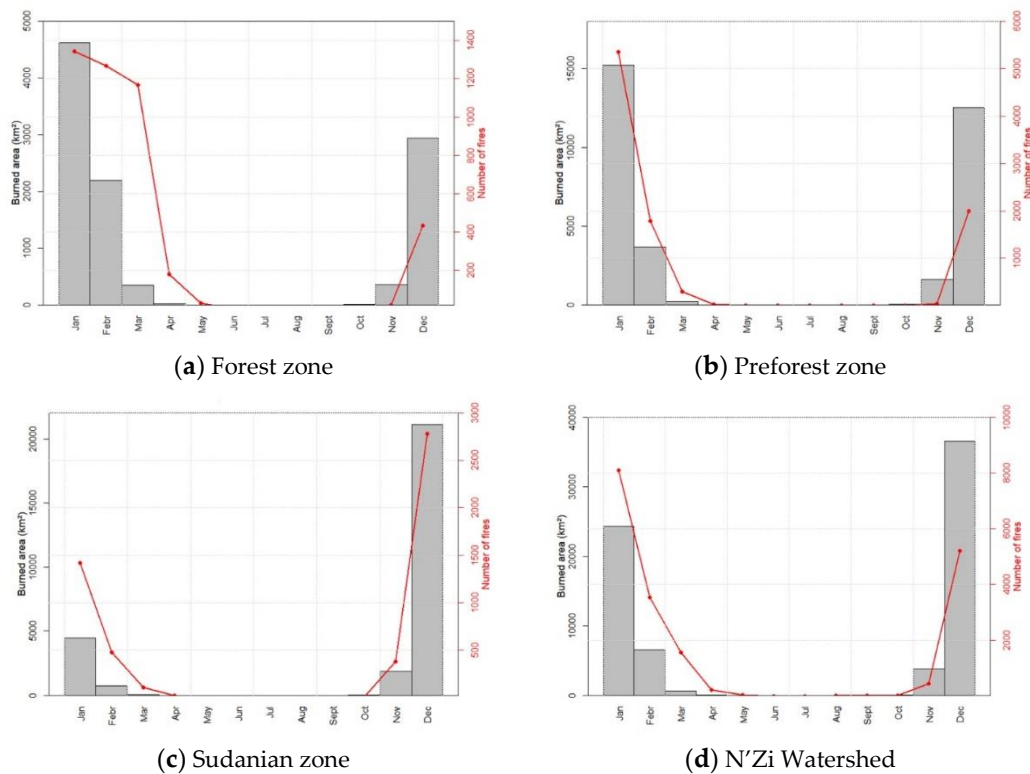


Figure 2. Monthly series of the total annual burned area (SB) and number of wildfires (NF) in the (a) forest zone, (b) preforest zone, (c) Sudanian zone and (d) the whole N’Zi River Watershed.

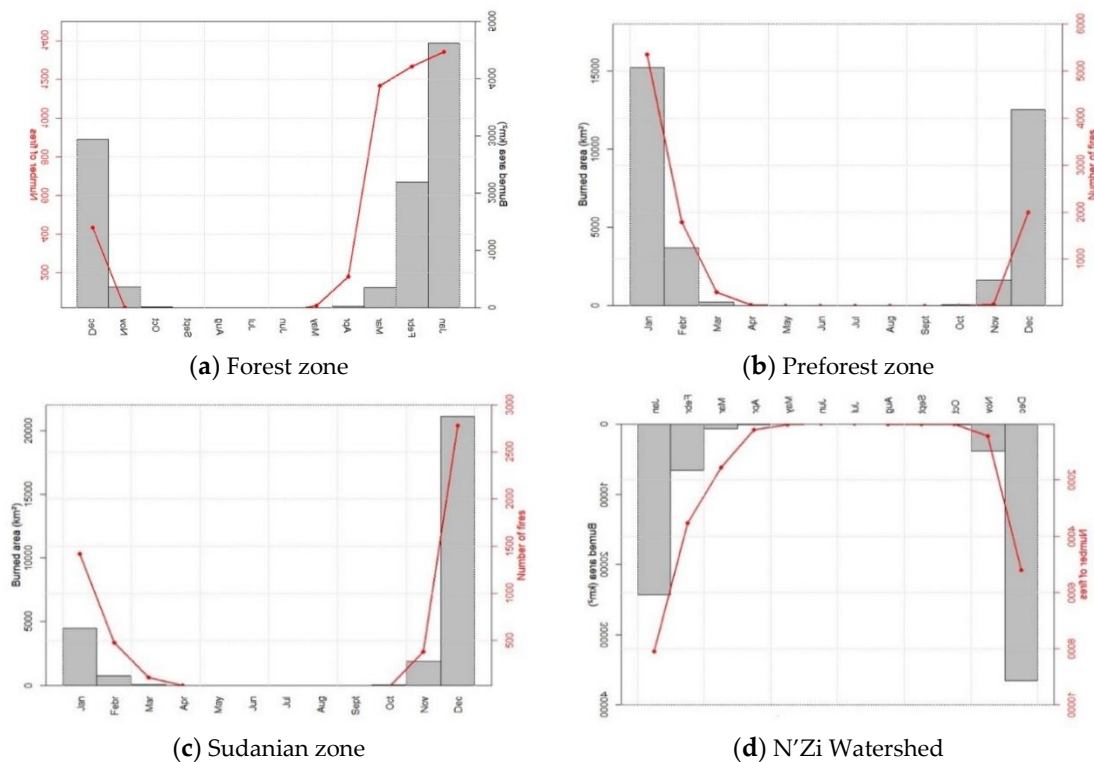


Figure 3. Annual series of the total annual burned area (SB) and number of wildfires (NF) in the (a) forest zone, (b) preforest zone, (c) Sudanian zone and (d) the whole N’Zi River Watershed.

Table 2. Trend analysis of number of wildfires (NF) and burned areas (SB).

Localization	Number of Wildfires				Burned Areas			
	Sen's Slope	Test Z	p-Value	Sign.	Sen's Slope	Test Z	p-Value	Sign.
Forest zone	-0.3401	-7.52	5.50×10^{-14}	***	-0.1326	-3.016	0.002564	**
Preforest zone	-0.2523	-5.567	2.60×10^{-8}	***	-0.0482	-1.106	0.268964	ns
Sudanian zone	-0.1639	-3.697	0.000218	***	-0.0086	-0.199	0.842119	ns
N'Zi Watershed	-0.2631	-5.611	2.01×10^{-8}	***	-0.0807	-1.796	0.0725	ns

Sign.: Significance; ns. : non-significant ($p > 0.05$); ** : $p < 0.01$; *** : $p < 0.001$.

In regard to NF, it showed a negative significant trend for the whole NRW (Table 2). All the ecoregions showed a highly significant downward trend for the seasonal Kendall test ($p < 0.001$).

The trends show that NF and SB were decreasing for the period 2001–2016, and could be seen especially in forest and preforest zone for both NF and SB.

3.2. Spearman Correlation

In order to analyse the relationships between wildfire and climatic parameters, Spearman's correlations between meteorological, fire danger indices and wildfire variables have been computed using correlation matrix at the watershed and ecoregion level by using monthly data (Figure 4); blank cells were not significant at the 5 % significance level.

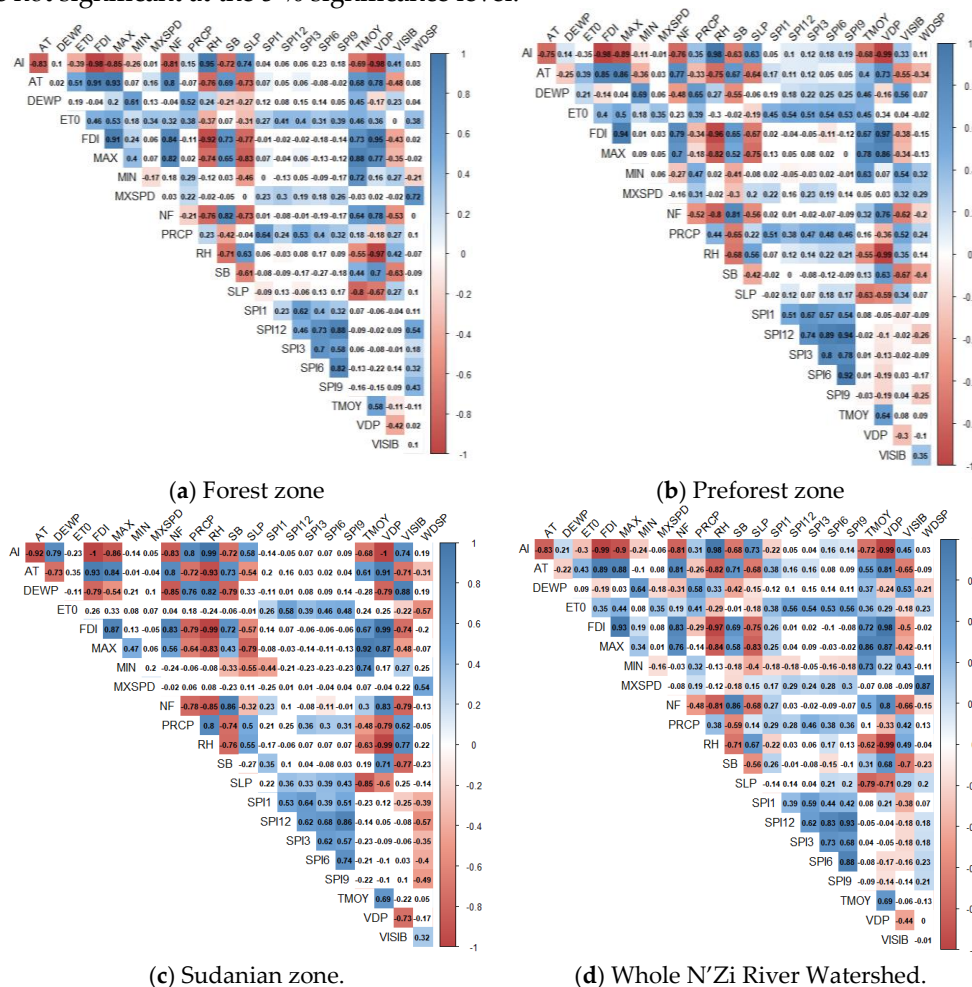


Figure 4. Spearman correlation matrix between wildfire variables and climatic variables in the (a) forest zone; (b) preforest zone; (c) Sudanian zone and (d) the whole N'Zi River Watershed. Significant positive correlations are displayed in blue, significant negative correlations in red and non-significant correlations are in blank ($p > 0.05$). The intensity of the colour is proportional to the correlation coefficients.

Considering the whole NRW, all the weather variables were significant at $p < 0.05$ except reference evapotranspiration (ET0), three-month Standardized Precipitation Index (SPI3), nine-month Standardized Precipitation Index (SPI9), 12-month Standardized Precipitation Index (SPI12) for SB, and minimum temperature (MIN), maximum wind speed (MXSPD), SPI3, SPI6, SPI9 and SPI12 for NF (Figure 4d). The most correlated variable for both SB and NF was the Lowveld fire danger index (FDI), positively correlated with NF and SB, which was followed by the relative humidity (RH), negatively correlated with NF and SB.

In the forest zone, the non-significant variables ($p > 0.05$) were MIN, MXSPD, wind speed (WDSP), Dewpoint (DEWP), SPI1, SPI3, SPI6, SPI9 and SPI12 for NF, and MIN, MXSPD, WDSP, ET0, SPI1, SPI3, SPI6, SPI9, SPI12 for SB (Figure 4a). The other variables were highly significant ($p < 0.001$). The most correlated variable for both NF and SB was FDI, positively correlated to wildfire activity.

In the preforest zone, almost the climatic variables were significant with $p < 0.05$ except ET0, MXSPD, SPI1-12 for NF, and ET0, SPI1-12 for SB. The most correlated variable was RH for both NF and SB, proportionally inverse to them (Figure 4b).

In the Sudanian zone, the non-significant climatic variables found were MIN, MXSPD, WDSP, ET0, SPI3, SPI9, SPI12 for NF, and MXSPD, WDSP, Sea level pressure (SLP), mean temperature (TMOY), ET0, SPI3, SPI6, SPI9, SPI12 for SB (Figure 4c). NF and SB showed better correlation with RH ($\rho < -0.85$) and DEWP ($\rho < -0.79$).

In addition, all the ecoregions and the whole NRW showed proportional negative correlation with rainfall (PRCP) and positive correlation with maximum temperature (MAX).

3.3. Nonparametric Regression

GAM regression was used to investigate the key meteorological and climatic factors affecting fire activity in the watershed. Tables 3 and 4 present results from GAMs of the monthly number of wildfires (NF) and the monthly area burned (SB) for the three ecoregions across the NRW. All variables listed in Table 1 were available for stepwise GAM regression and only the significant terms were kept.

Table 3. Selected GAM-based models for the number of active wildfires (NF) per ecoregion.

Parameter	Location							
	Forest Zone		Preforest Zone		Sudanian Zone		N’Zi River Watershed	
Family	Gaussian		Gaussian		Gaussian		Gaussian	
Link function	Identity		Identity		Identity		Identity	
Adjusted R ²	0.814		0.874		0.995		0.772	
Deviance explained (%)	84.7		89.7		99.8		80.1	
GCV score	315.64		2181.7		10.249		9491.8	
AIC	1336.409		2004.422		201.9355		2277.71	
Covariates	edf	p-Value	edf	p-Value	edf	p-Value	edf	p-Value
PRCP	-	-	-	-	-	-	-	-
TMOY	-	-	3.936	4.66×10^{-5}	-	-	-	-
MAX	-	-	-	-	-	-	-	-
MIN	-	-	4.894	0.040997	9.000	4.29×10^{-9}	-	-
AT	-	-	4.394	0.000145	-	-	1.780	5.44×10^{-14}
ET0	-	-	-	-	-	-	-	-
WDSP	-	-	-	-	-	-	5.587	0.0028282
MXSPD	-	-	-	-	-	-	-	-
RH	-	-	-	-	-	-	-	-
VDP	7.771	2.24×10^{-7}	-	-	-	-	-	-
SLP	-	-	-	-	-	-	-	-
DEWP	-	-	8.740	$<2 \times 10^{-16}$	-	-	6.459	1.71×10^{-11}
VISIB	-	-	8.464	1.05×10^{-7}	7.913	8.68×10^{-12}	-	-
SPI1	-	-	-	-	5.087	0.0127	3.889	0.02521
SPI3	-	-	-	-	-	-	2.018	8.81×10^{-6}
SPI6	4.124	0.002021	-	-	-	-	4.044	5.37×10^{-8}

Table 3. Cont.

SPI9	5.048	0.005825	-	-	-	-	-	-
SPI12	2.710	0.012842	-	-	-	-	-	-
AI	-	-	-	-	-	-	-	-
FDI	8.015	0.000266	4.018	0.003571	8.873	4.55×10^{-14}	-	-

edf: effective degrees of freedom.

Table 4. Selected GAM-based models for the burned area (SB) per ecoregion.

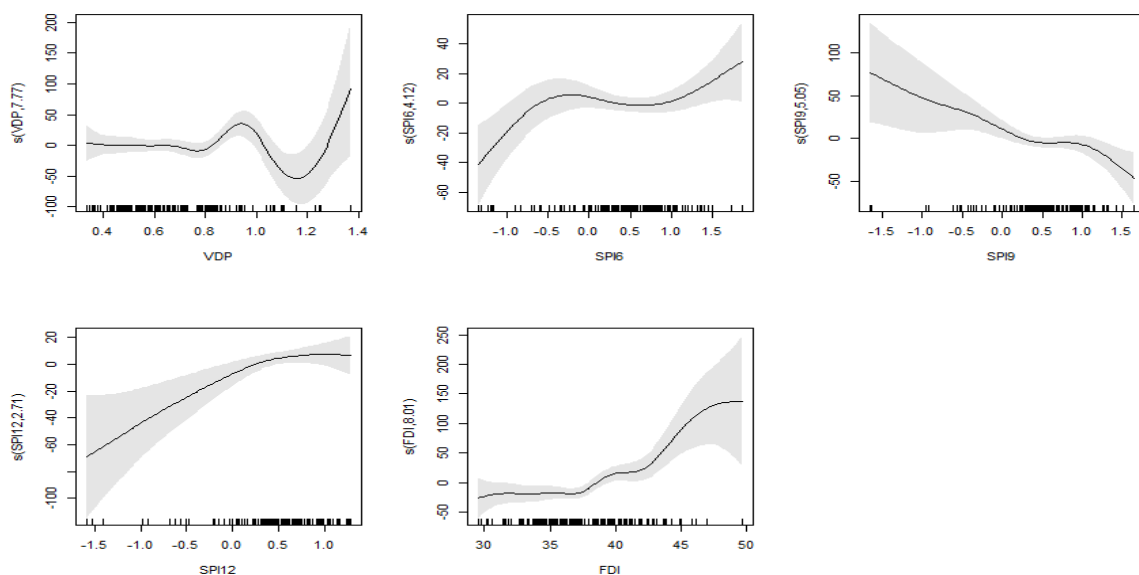
Parameter	Location							
	Forest Zone		Preforest Zone		Sudanian Zone		N’Zi River Watershed	
Family	Gaussian		Gaussian		Gaussian		Gaussian	
Link function	Identity		Identity		Identity		Identity	
Adjusted R ²	0.771		0.869		0.981		0.784	
Deviance explained (%)	84.2		89.3		99.7		81.3	
GCV score	4.73×10^7		2261.7		4.5052×10^7		9088	
AIC	3344.81		2011.501		782.5832		2268.917	
Covariates	edf	p-Value	edf	p-Value	edf	p-Value	edf	p-Value
PRCP	-	-	-	-	-	-	-	-
TMOY	7.236	0.00129	3.719	0.000873	-	-	-	-
MAX	-	-	-	-	-	-	-	-
MIN	2.112	0.00133	5.447	0.001879	-	-	-	-
AT	-	-	4.335	0.001950	8.851	0.00293	2.098	0.00772
ET0	2.101	0.00396	-	-	-	-	-	-
WDSP	-	-	-	-	-	-	-	-
MXSPD	-	-	-	-	3.932	0.00140	-	-
RH	-	-	-	-	-	-	-	-
VDP	-	-	-	-	-	-	-	-
SLP	-	-	-	-	-	-	-	-
DEWP	7.517	0.01403	8.883	$<2 \times 10^{-16}$	-	-	7.175	5.48×10^{-13}
VISIB	8.678	8.26×10^{-7}	8.500	8.25×10^{-9}	9.000	1.59×10^{-5}	1.208	3.99×10^{-10}
SPI1	-	-	-	-	-	-	-	-
SPI3	8.945	3.48×10^{-12}	-	-	-	-	-	-
SPI6	-	-	-	-	-	-	-	-
SPI9	7.289	0.00149	-	-	-	-	-	-
SPI12	-	-	-	-	-	-	-	-
AI	-	-	-	-	-	-	-	-
FDI	6.692	0.01818	4.139	0.039573	7.043	0.01027	-	-

edf: effective degrees of freedom.

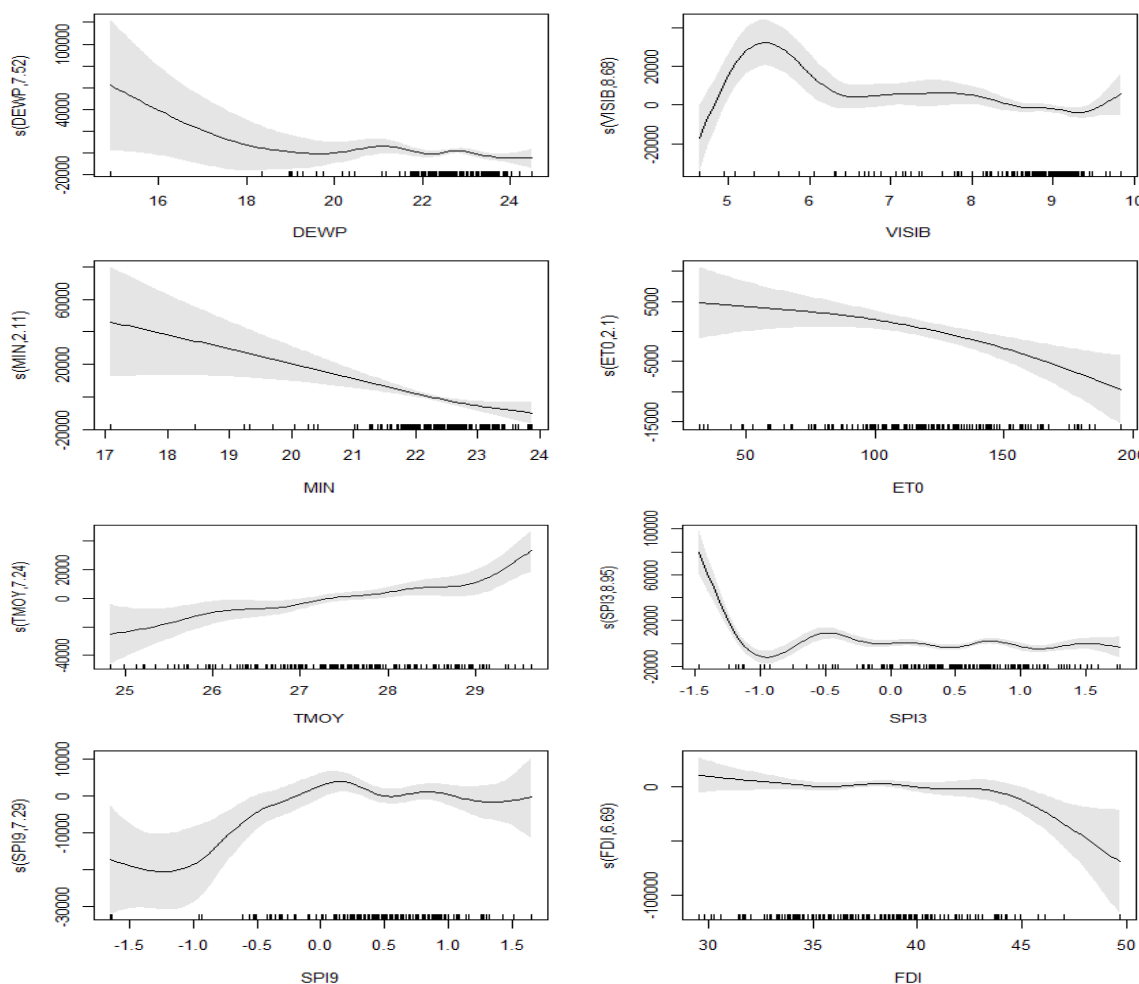
The shapes of the functional forms for selected covariates of the fire activity in each ecoregion are illustrated in Figures 5–8. These indicate that the number of wildfires and the burned area of the three ecoregions and the whole watershed displayed non-linear responses to the covariates.

As far as the whole NRW is concerned, the key predictors in GAM were WDSP, AT, DEWP, SPI1, SPI3, and SPI6 for NF, and AT, DEWP, VISIB for SB. All the covariates included in GAM could explain about 80 % for NF and 81 % for SB. In this region, all the significant covariates had relatively simple nonlinear relationships with the number of wildfires (Figure 8a) and the burned areas (Figure 8b).

The relevant covariates were different according to ecoregions and wildfire variables. For instance, in the forest zone, different covariates were selected for models of NF and SB. For the number of wildfires, they included VDP, SPI6, SPI9, SPI12 and FDI. For the burned area, the relevant factors were TMOY, MIN, ET0, DEWP, VISIB, SPI3, SPI9 and FDI. The deviance explained for NF and SB was 84.7 % and 84.2 %, respectively. For this ecoregion, SPI6, SPI9 and SPI12 had relatively simple nonlinear relationships with the number of wildfires, whereas VDP and FDI had relatively complex nonlinear relationships with the number of wildfires (Figure 5a). By contrast, all the significant covariates had relatively simple nonlinear relationships with the burned areas (Figure 5b).



(a)



(b)

Figure 5. Smoothed fits of covariates modelling (a) the number of wildfires and (b) the burned area in the Forest zone of the N’Zi River Watershed. Central (bold) line show the best fit and the shaded areas show the 95 % confidence intervals of the model. Tick marks on the x-axis represent observations. The y-axis represents the spline function.

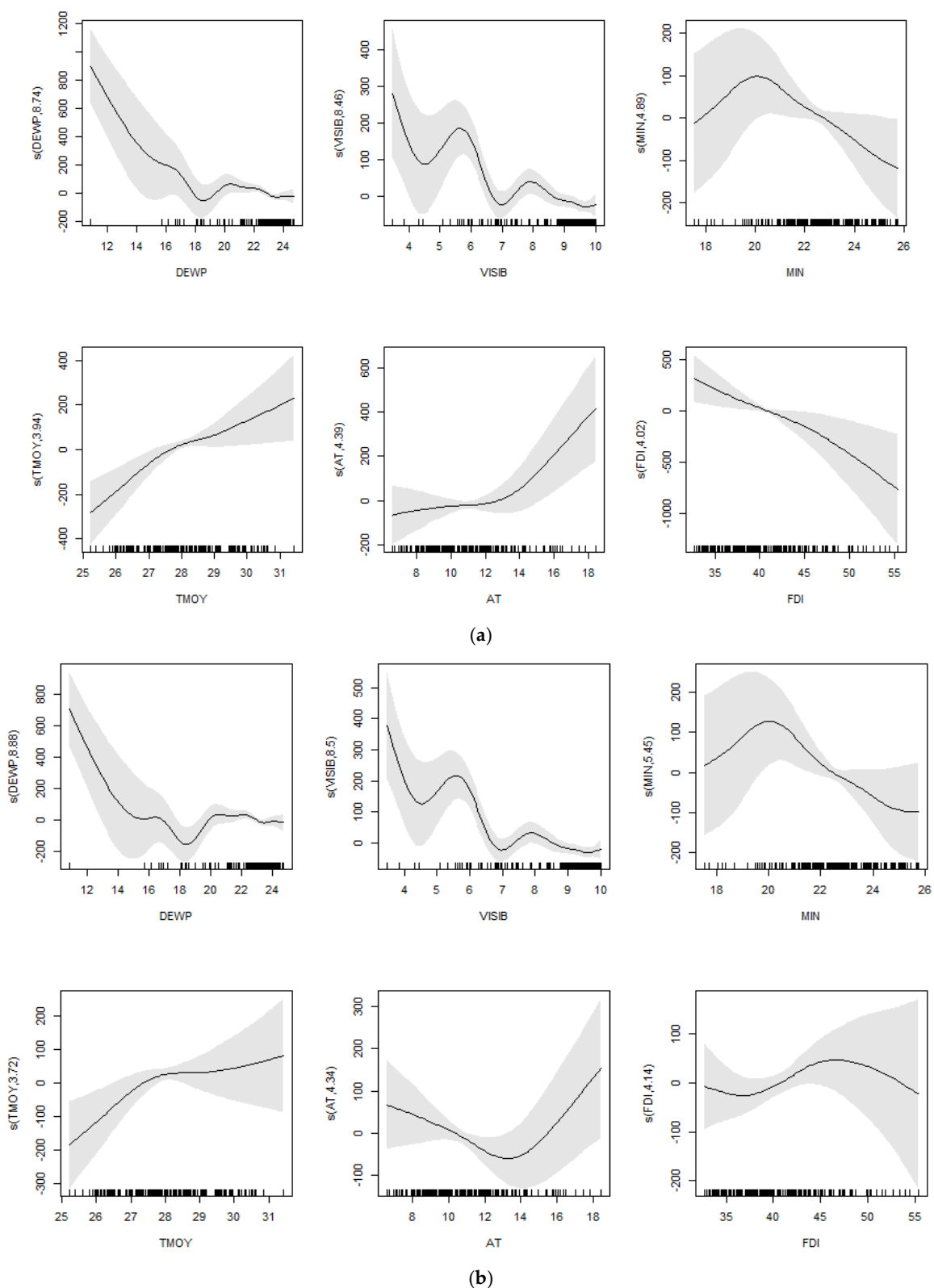


Figure 6. Smoothed fits of covariates modelling (a) the number of wildfires and (b) the burned area in the Preforest zone of the N’Zi River Watershed. Central (bold) line show the best fit and the shaded areas show the 95 % confidence intervals of the model. Tick marks on the x-axis represent observations. The y-axis represents the spline function.

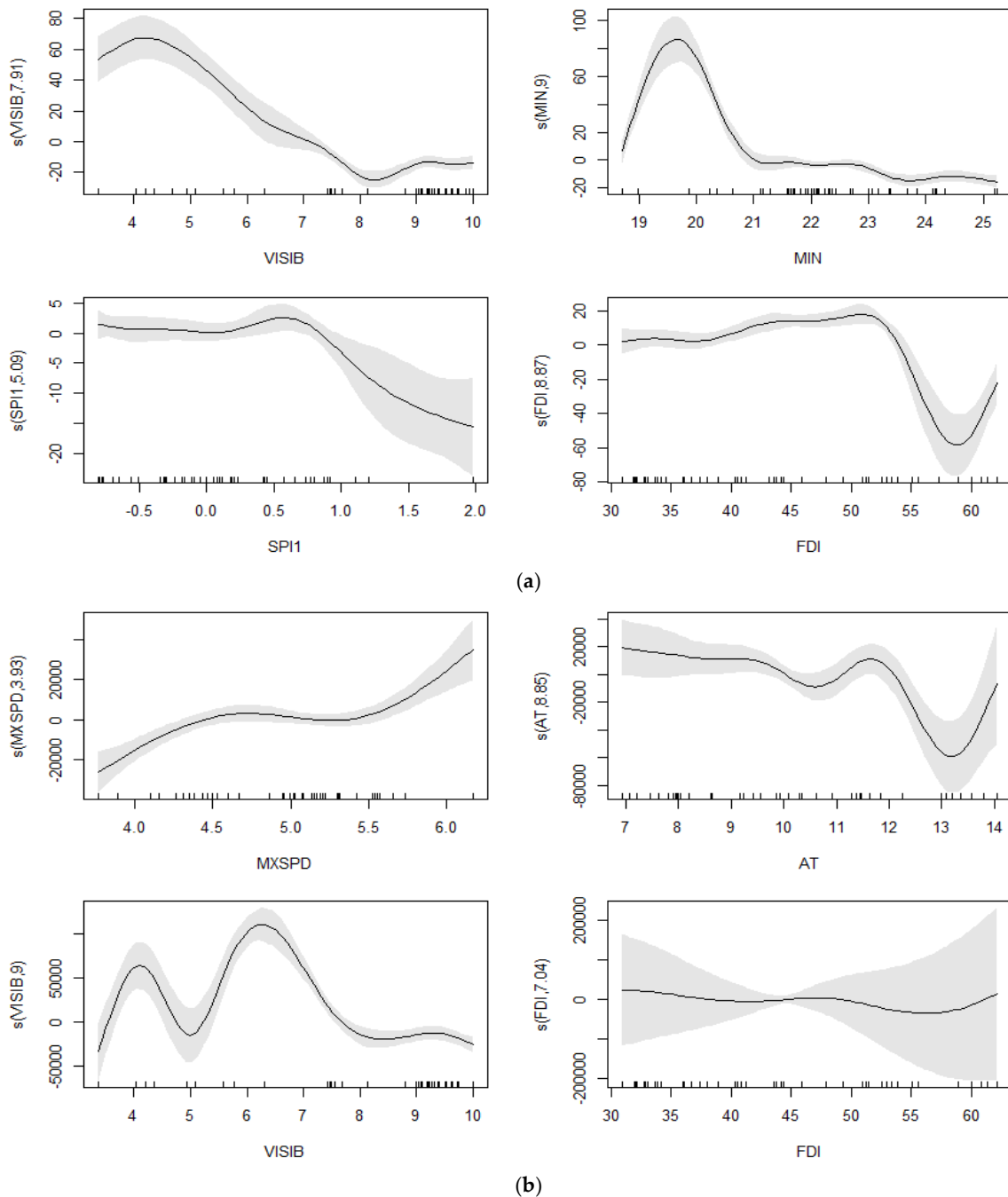


Figure 7. Smoothed fits of covariates modelling (a) the number of wildfires and (b) the burned area in the Sudanian zone of the N’Zi River Watershed. Central (bold) line show the best fit and the shaded areas show the 95 % confidence intervals of the model. Tick marks on the x-axis represent observations. The y-axis represents the spline function.

For the preforest zone, the predictors for both the number of wildfires and burned area included TMOY, MIN, AT, DEWP, VISIB and FDI. The deviance explained by the model for NF and SB was 89.7 % and 89.3 %, respectively. In this area, MIN, TMOY, AT and FDI had relatively simple nonlinear relationships with the number of wildfires and burned areas, whereas DEW and VISIB had relatively complex nonlinear relationships for both the number of wildfires and burned areas (Figure 6a,b).

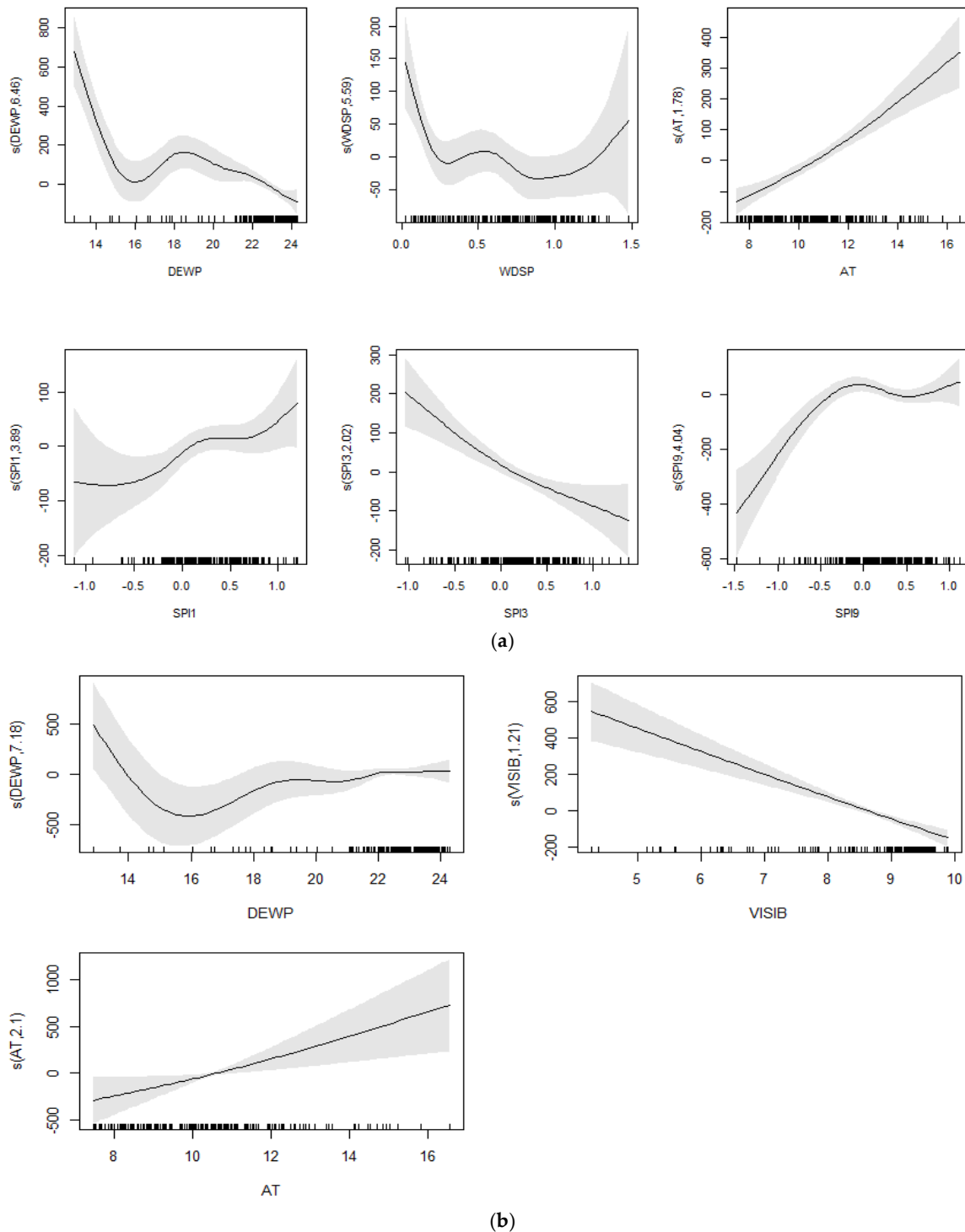


Figure 8. Smoothed fits of covariates modelling (a) the number of wildfires and (b) the burned area in the whole N’Zi River Watershed. Central (bold) line show the best fit and the shaded areas show the 95 % confidence intervals of the model. Tick marks on the x-axis represent observations. The y-axis represents the spline function.

In the Sudanian zone, the deviance explained by the models for NF and SB was, respectively, 99.8 % and 99.7 %. In this area, the key covariates for NF included MIN, VISIB, SPI1, and FDI, while those for SB were AT, MXSPD, VISIB, and FDI. In this zone, all the significant covariates had relatively simple nonlinear relationships with the number of wildfires (Figure 7a) and the burned areas (Figure 7b).

For each significant covariate, the smooth function could be classified into one, two or more rough regions depending to their tendency. A positive (negative) influence region could be followed by a

negative (positive) influence region, and so on. For instance, the smooth function of SPI6 in the Forest zone (Figure 5a) could be classified into one rough positive influence region. This result suggested that SPI6 had strong positive impacts on the number of wildfires within the region. Compared to SPI6, VDP showed a more complex smooth function, which changed directions multiple times (Figure 5a). VDP lowered the number of wildfires in the ranges 0.3–0.8 (region 1) and 0.9–1.2 (region 3) but increased the number of wildfires in the ranges 0.8–0.9 (region 2) and 1.2–1.4 (region 4). However, only a small number of observations were found in regions 3 and 4 and their confidence intervals were relatively wide, suggesting that the direction of the influence of VDP on the number of wildfires might not be highly significant.

4. Discussion

In this study, we used MODIS-derived data to investigate the active wildfires and burned area in the N'Zi River Watershed. The MODIS instruments that are onboard NASA EOS satellite platforms observe the watershed four times per day at approximately 01:30, 10:30, 13:30, and 22:30 local time. It is therefore important to keep in mind that the number of active wildfires detected in this study is only the result of observations made during the four satellite overpasses and only takes into consideration those wildfires that occurred in such conditions that MODIS was able to detect. In fact, wildfires burning outside the overpass times were not detected by MODIS and are therefore not included in the results of this study, just like those that occurred when the sky was covered by clouds or by thick smoke, and those that were masked by a canopy of trees [35,53,54]. The several overpasses of the satellites may cause a double counting of active wildfires. Indeed, a single wildfire can spread over the landscape and burn for several hours or days and be detected by both satellites during their passage [55]. The shortage of burned area for some months under wildfires could be explained by the over-resolution of the satellite, which is approximately 23.5 ha. Wildfires with an area less than this value are not captured by the satellite. Of course, the spatial resolution of the MODIS burned area MCD64A1 is estimated at 500 m. This may overestimate or underestimate the extent of area burned. Wildfire omission errors occur when spatial extension is insufficient or highly fragmented to be discriminated as wildfires [56]; or those hidden by cloud cover and satellite observations [54].

Several studies on wildfire occurrence in sub-Saharan Africa, especially in West Africa, showed that fire activity has increased during the last decades [53,57]. Our study showed different results for the N'Zi River Watershed, underlining an opposite trend for wildfire occurrence. Similar results have been found in West Africa, identifying decreasing trends in both number of wildfires and burnt areas during recent decades [58,59]. Andela et al. [60] showed a significant decreasing trend in the number of fires, size of fires and burnt area in Africa in the period 2003–2015 using MODIS fire data. Declining fire activity supports climate mitigation efforts in the region.

Our study has also showed that the preforest zone was the most impacted in terms of number of wildfires and burned area. This could be explained by the land use and fire-based hunting practices adopted in this area. These observations have been observed by Etienne [61] and Bruzon [62], who observed the use of wildfires for hunting at the beginning or at the end of the dry season. Also, the vegetation composition in this area may have importance in fire dynamics. The vegetation type is a factor that greatly influences the spread of fire by affecting the fuel load and combustion [63]. Fire occurrence analysis showed that fire frequency and intensity were thus related mainly to the herbaceous layer continuity and phytomass. Fire density peaks in December–January; however, fire seasonality depends on vegetation hygrophily: late and very late wildfires burn more intensively (because the vegetative has low moisture content) and tend to be more damaging compared to early wildfires, in accordance with previous observations of Nielsen and Rasmussen [64] and Govender et al. [65]. The low number of wildfires after March was due to the fact that vegetation is regenerating with the first rains and evapotranspiration at this time is low [66].

Due to the high impact of agriculture in the south of the area studied (forest zone), the area burnt annually is relatively limited compared to the other ecoregions. In this area, several cash crops including cocoa and coffee are grown, and peasants are aware of the impact of fire in the dry season.

The number of wildfires increased from 2002 to 2008 in the study area. These observations could be explained by the fact that the sociopolitical crisis experienced by Côte d'Ivoire from 2002 to 2010 has weakened the forest administration, which has led to a relaxation of awareness and policy to combat wildfires at the local level. These observations are close to those of Kull [67], who noted that political instability led to unusual practices in the use of wildfires (protests, land disputes, etc.) that may contribute to increasing fire damage in Madagascar. Also, this situation may be explained by increasing population pressure, which may have led to more wildfires being laid for poaching, converting savannas into agricultural lands and clearing fields [65].

Concerning the analysis of the relationships between climate and fire occurrence, we showed that both the number of wildfires and the burned area were inversely correlated with relative humidity and thermal amplitude, and positively correlated with Lowveld FDI and maximal temperature. This could be explained by the fact that the high variability in temperature may increase fuel load, as suggested by Govender et al. [65]. Also, with a lower relative humidity, fires will start and burn more vigorously due to the lower moisture of the fuel. Similar results have been shown by Guiguindibaye et al. [66], who observed that wildfire intensity is inversely correlated to relative humidity in Tanzania. Holsten et al. [68] also revealed that relative humidity was the best proxy for fire occurrence in Germany. Relative humidity has an important impact on wildfires. Long days of low humidity in a month tend to dry out all forest fuels to a dangerous level. Even a few days of low humidity can increase the risks of wildfires [69]. While the Lowveld FDI is not a proxy for fire activity, it does indicate the potential for uncontrollable fires should ignition occur and thus may provide insight into how changes in the microclimate may influence fire activity [25]. Archibald et al. [70] examined the drivers of burnt area in Southern Africa and indicated that the tree cover percentage, rainfall, dry season length, and grazing density are the most important determinants of burned areas in this region.

In this study, we used GAMs to evaluate wildfire activity and explore the effects of climatic factors at ecoregion level. The effects of climate variables including weather and drought and fire danger indices on wildfire activity (number of wildfires and burned areas) in this study showed nonlinear relationships with the number of wildfires and burned areas, even changing from negative to positive relationships in some cases. The nonlinear effects of climate variables in this study indicate that their influences on wildfire activity are not constant but, rather, vary significantly in terms of the direction and degree of their influences. For example, the influences on the number of wildfires in the whole watershed differed from those at different locations at the same fire site. Therefore, the influences of climate variables on the number of wildfires should not be over-generalized to different studies performed at different geographic locations and other fire sites. The non-linear impacts of climate variables have been reported in several other studies (e.g., [71–73]).

However, we were unable to find many studies on the nonlinear effects of susceptible climate variables on fire activity in Africa. Krawchuk et al. [74] examined world fire occurrence in relation to climate variables, and showed that mean temperature of warmest month, annual precipitation, and mean temperature of wettest month are the most important explanatory variables [72].

In this study, we showed that in the whole watershed DEWP (edf = 6.459), WDSP (edf = 5.587), SPI6 (edf = 4.044) and SPI (edf = 3.889) showed stronger nonlinear patterns, while SPI3 (edf = 2.018) and AT (edf = 1.780) exhibited a weaker nonlinear pattern, which explained about 80.1 % of the number of wildfires. Comparatively, we observed that DEWP (edf = 7.175) exhibited stronger nonlinear patterns, whereas AT (edf = 2.098) and VISIB (edf = 1.208) showed a weaker nonlinear pattern that explained 81.3 % of burned areas. These results were consistent with the findings of Ríos-Pena et al. [73,75], who reported nonlinear distributions. The relatively high deviance could be improved for wildfire activity prediction. The inclusion of different environmental and biophysical covariates might improve the GAM results. For instance, fire activity is most strongly influenced by climate, topography [76], vegetation type and population density [59]. It is therefore important to collect data on potentially influential covariates.

5. Conclusions

The current study investigated the relationship between fire occurrence (number of wildfires and burned area) and weather conditions during the last two decades (2001–2016).

The first main conclusion of this study was that fire occurrence in the N’Zi River Watershed had a downward trend, and the dynamic was different in the ecoregions. The preforest zone was the most impacted by fire in this area. The second conclusion was that weather conditions, coupled with drought and fire danger indices, strongly influence the fire occurrence in the area. The Lowveld fire danger index is the most significant variable to be monitored in fire management. As a powerful and scientific predictive modelling tool to discover the hidden pattern of predictors and improve predictive performance, the generalized additive model (GAM) was used to investigate quantitative relationships between climatic variables and fire activity. Our models have explained up to 80 % of the deviance of fire occurrence in the studied area.

In subsequent studies, the current work will serve as baseline information for preparing an appropriate fire danger index for the region, predicting the magnitude of fire occurrence in the NRW under future climatic scenarios, and evaluating its potential impacts on forest fire emissions.

Author Contributions: Data curation, J.-L.K.K.; Methodology, J.-L.K.K.; Supervision, N.E.W. and C.M.; Writing—original draft, J.-L.K.K.; Writing—review & editing, J.-L.K.K, N.E.W. and C.M.

Acknowledgments: We acknowledge the use of data and imagery from LANCE FIRMS operated by the NASA/GSFC/Earth Science Data and Information System (ESDIS) with funding provided by NASA/HQ. Also, we acknowledge with gratitude the useful contributions of the two anonymous reviewers and the Assistant Editor of this review paper.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Goldammer, J.G.; De Ronde, C. *Wildland Fire Management Handbook for Sub-Saharan Africa*; Goldammer, J.G., de Ronde, C., Eds.; Global Fire Monitoring Center: Freiburg, Germany, 2004.
2. Food Agriculture Organization (FAO). *Fire Management Global Assessment 2006*; FAO: Rome Italy, 2007.
3. Bakirci, M. Negative impacts of forest fires on ecological balance and environmental sustainability: Case of Turkey. *J. Geogr.* **2010**, *5*, 15–32.
4. Dennis, R.A.; Mayer, J.; Applegate, G.; Chokkalingam, U.; Colfer, C.J.P.; Kurniawan, I.; Lachowski, H.; Maus, P.; Permana, R.P.; Ruchiat, Y.; et al. Fire, people and pixels: linking social science and remote sensing to understand underlying causes and impacts of fires in Indonesia. *Hum. Ecol.* **2005**, *33*, 465–504, doi:10.1007/s10745-005-5156-z.
5. Hirschberger, P. *Forests Ablaze: Causes and Effects of Global Forest Fires*; Winter, S., von Laer, Y., Köberich, T., Eds.; WWF Deutschland: Berlin, Germany, 2016.
6. Jolly, W.M.; Cochrane, M.A.; Freeborn, P.H.; Holden, Z.A.; Brown, T.J.; Williamson, G.J.; Bowman, D.M.J.S. Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. *Nat. Commun.* **2015**, *6*, 7537, doi:10.1038/ncomms8537.
7. Laris, P. Integrating Land Change Science and Savanna Fire Models in West Africa. *Land* **2013**, *2*, 609–636, doi:10.3390/land2040609.
8. GIEC. *Changements Climatiques 2014: Rapport de Synthèse*; Contribution des Groupes de Travail I, II et III au cinquième Rapport D’évaluation du Groupe D’experts Intergouvernemental sur L’évolution du Climat; Pachauri, R.K., Meyer, L.A., Eds.; GIEC: Genève, Switzerland, 2014.
9. Paudel, B.; Acharya, B.S.; Ghimire, R.; Dahal, K.R.; Bista, P. Adapting agriculture to climate change and variability in Chitwan: Long-term trends and farmers’ perceptions. *Agric. Res.* **2014**, *3*, 165–174, doi:10.1007/s40003-014-0103-0.
10. Mertz, O.; Halsnæs, K.; Olesen, J.E.; Rasmussen, K. Adaptation to climate change in developing countries. *Environ. Manag.* **2009**, *43*, 743–752, doi:10.1007/s00267-008-9259-3.
11. Tanner, T.; Mitchell, T. Entrenchment or enhancement: Could climate change adaptation help reduce poverty? *Development* **2008**, *39*, 6–15, doi:10.1111/j.1759-5436.2008.tb00471.x.
12. Kull, C.A.; Laris, P. Fire ecology and fire politics in Mali and Madagascar. In *Tropical Fire Ecology: Climate Change, Land Use and Ecosystem Dynamics*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2009; pp. 171–226.

13. Shlisky, A.; Alencar, A.; Nolasco, M.M.; Curran, L. Overview: Global fire regime conditions, threats, and opportunities for fire management in the tropics. In *Tropical Fire Ecology*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2009; pp. 65–83, 10.1007/978-3-540-77381-8_3.
14. Mbow, C.; Nielsen, T.T.; Rasmussen, K. Savanna fires in east-central Senegal: Distribution patterns, resource management and perceptions. *Hum. Ecol.* **2000**, *28*, 561–583, doi:10.1023/A:1026487730947.
15. Levine, J.S. Biomass Burning and the Production of Greenhouse Gases. In *Climate Biosphere Interaction: Biogenic Emissions and Environmental Effects of Climate Change*; Zepp, R.G., Ed.; John Wiley and Sons: New York, NY, USA, 1994; pp. 139–160.
16. Loehman, R.A.; Reinhardt, E.; Riley, K.L. Wildland fire emissions, carbon, and climate: Seeing the forest and the trees—A cross-scale assessment of wildfire and carbon dynamics in fire-prone, forested ecosystems. *For. Ecol. Manag.* **2014**, *317*, 9–19, doi:10.1016/j.foreco.2013.04.014.
17. Etc Terra; RONGEAD; BNETD. Analyse Qualitative des Facteurs de Déforestation et de Dégradation des Forêts en Côte d’Ivoire; MINEDD: Abidjan, Côte d’Ivoire, 2016.
18. Bigot, S. Variabilité Climatique, Interactions et Modifications Environnementales: L’exemple de la Côte d’Ivoire; Université des Sciences et Technologies de Lille: Lille, France, 2005.
19. MINEF. Campagne Nationale de Lutte Contre les feux de Brousse Edition 2016–2017. Available online: <http://www.eauxetforets.gouv.ci/index.php/le-minef/actualites/a-la-une/514-campagne-nationale-de-lutte-contre-les-feux-de-brousse-edition-2016-2017> (accessed on 14 June 2017).
20. N’Guessan, J.A.; Yoboue, K.B.; N’Daoule, R. La variabilité pluviométrique et ses impacts sur l’alimentation en eau des milieux ruraux du département de Dimbokro (Centre-Est de la Côte d’Ivoire). *Eur. Sci. J.* **2015**, *11*, 36–57.
21. Brou, Y.T. Impacts des modifications bioclimatiques et de l’amenuisement des terres forestières dans les paysanneries ivoiriennes: Quelles solutions pour une agriculture durable en Côte d’Ivoire *Cuad. Geogr.* **2009**, *45*, 13–29.
22. Bigot, S.; Brou, T.Y.; Oszwald, J.; Diedhiou, A. Facteurs de la variabilité pluviométrique en Côte d’Ivoire et relations avec certaines modifications environnementales. *Sécheresse* **2005**, *16*, 5–13.
23. Kouassi, A.M.; Kouamé, K.F.; Koffi, Y.B.; Dje, K.B.; Paturel, J.E.; Oulare, S. Analyse de la Variabilité Climatique et de ses Influences sur les Régimes Pluviométriques Saisonniers en Afrique de L’ouest: Cas du Bassin Versant du N’zi (Bandama) en Côte d’Ivoire. Available online: <http://cybergeog.revues.org/23388> (accessed on 1 April 2017)
24. Yao, T.B.; Akindès, F.; Bigot, S. La variabilité climatique en Côte d’Ivoire: Entre perceptions sociales et réponses agricoles. *Cah. Agric.* **2005**, *14*, 533–540, doi:10.13140/2.1.5174.3368.
25. Strydom, S.; Savage, M.J. Potential impacts of climate change on wildfire dynamics in the midlands of KwaZulu-Natal, South Africa. *Clim. Chang.* **2017**, *143*, 385–397, doi:10.1007/s10584-017-2019-8.
26. Eldin, M. Le climat. In *Le Milieu Naturel de la Côte d’Ivoire*. Avenard, J.-M., Eldin, M., Girard, G., Touchebeuf, P., Guillaumet, J.-L., Adjanooun, E., Perraud, A., Eds.; ORSTOM: Paris, France, 1971; pp. 73–108.
27. Goula, B.T.A.; Savané, I.; Fadika, V.; Konan, B.; Kouadio, G.B. Impact de la variabilité climatique sur les ressources hydriques des bassins du N’Zo et N’Zi en Côte d’Ivoire (Afrique Tropicale Humide). *Vertigo* **2006**, *7*, 1–12, doi:10.4000/vertigo.2038.
28. National Centers for Environmental Information. Global Surface Summary of the Day—GSOD. Available online: <https://data.noaa.gov/dataset/dataset/global-surface-summary-of-the-day-gsod> (accessed on 4 January 2017).
29. Ångström, A. Swedish meteorological research 1939–1948. *Tellus* **1949**, *1*, 60–64.
30. Harrison, D.C. Improving Integrated Wildfire Management in the Fynbos Biome of South Africa Using Information on Synoptic-Scale Atmospheric Features That Promote Wildfires. Ph.D. Thesis, University of Cape Town, Cape Town, South Africa, 2015.
31. McKee, T.B.; Doesken, N.J.; Kleist, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim, CA, USA, 17–22 January 1993.
32. Giglio, L.; Schroeder, W.; Justice, C.O. The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products. *Remote Sens. Environ.* **2016**, *178*, 31–41, doi:10.1016/j.rse.2016.02.054.
33. Schroeder, W.; Oliva, P.; Giglio, L.; Csiszar, I.A. The New VIIRS 375m active fire detection data product: Algorithm description and initial assessment. *Remote Sens. Environ.* **2014**, *143*, 85–96, doi:10.1016/j.rse.2013.12.008.

34. Giglio, L.; Boschetti, L.; Roy, D.; Hoffmann, A.A.; Humber, M. *Collection 6 MODIS Burned Area Product User's Guide—Version 1.0*; NASA EOSDIS Land Processes DAAC: Sioux Falls, SD, USA, 2016.
35. Kaufman, Y.J.; Justice, C.O.; Flynn, L.P.; Kendall, J.D.; Prins, E.M.; Giglio, L.; Ward, D.E.; Menzel, W.P.; Setzer, A.W. Potential global fire monitoring from EOS-MODIS. *J. Geophys. Res. Atmos.* **1998**, *103*, 32215–32238, doi:10.1029/98JD01644.
36. LANCE FIRMS. Collection 6 NRT Hotspot/Active Fire Detections MCD14DL. Available online: <https://earthdata.nasa.gov/firms> (accessed on 21 June 2017).
37. LANCE FIRMS. NRT VIIRS 375 m Active Fire product VNP14IMGT. Available online: <https://earthdata.nasa.gov/firms> (accessed on 21 June 2017).
38. Giglio, L.; Justice, C.; Boschetti, L.; Roy, D. *MCD64A1 MODIS/Terra + Aqua Burned Area Monthly L3 Global 500m SIN Grid V006*; NASA EOSDIS Land Processes DAAC: Sioux Falls, SD, USA, 2015.
39. Pohlert, T. Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection. Available online: <https://cran.r-project.org/web/packages/trend/vignettes/trend.pdf> (accessed on 30 July 2018).
40. Mann, H.B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica* **1945**, *13*, 245, doi:10.2307/1907187.
41. Kendall, M. *Rank Correlation Methods*, 4th ed.; Charles Griffin: London, UK, 1970.
42. Hirsch, R.M.; Slack, J.R. A Nonparametric Trend test for seasonal data with serial dependence. *Water Resour. Res.* **1984**, *20*, 727–732, doi:10.1029/WR020i006p00727.
43. Roy, D.P.; Boschetti, L.; Justice, C.O.; Ju, J. The collection 5 MODIS burned area product—Global evaluation by comparison with the MODIS active fire product. *Remote Sens. Environ.* **2008**, *112*, 3690–3707, doi:10.1016/j.rse.2008.05.013.
44. Millard, S.P. *EnvStats: An R Package for Environmental Statistics*; Springer: New York, NY, USA, 2013.
45. R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*; R: The R Foundation: Vienna, Austria, 2017.
46. Wood, S.N. MgcV: GAMs and generalized ridge regression for R. *R News* **2001**, *1*, 20–25.
47. Wood, S.N. Fast stable restricted maximum likelihood and marginal likelihood estimation of semiparametric generalized linear models *J. R. Stat. Soc. Ser. B Stat. Methodol.* **2011**, *73*, 3–36, doi:10.1111/j.1467-9868.2010.00749.x.
48. Wood, S.N. *Generalized Additive Models: An Introduction with R*, 2nd ed.; Chapman & Hall/CRC: Boca Raton, FL, USA, 2017.
49. Hastie, T.; Tibshirani, R. Generalized Additive Models. *Stat. Sci.* **1986**, *1*, 297–310.
50. James, G.; Witten, D.; Hastie, T. *An Introduction to Statistical Learning: With Applications in R*; Springer Science + Business Media: New York, NY, USA, 2014.
51. Lukacs, P.M.; Burnham, K.P.; Anderson, D.R. Model selection bias and Freedman's paradox. *Ann. Inst. Stat. Math.* **2010**, *62*, 117–125, doi:10.1007/s10463-009-0234-4.
52. Maindonald, J. Gamclass: Functions and Data for a Course on Modern Regression and Classification. 2018. Available online: <https://cran.r-project.org/package=gamclass> (accessed on 10 August 2018).
53. Yao, N. Mapping Bushfire Distribution and Burn Severity in West Africa Using Remote Sensing Observations. Ph.D. Thesis, University of Würzburg, Würzburg, Germany, 2010.
54. Giglio, L.; Loboda, T.; Roy, D.P.; Quayle, B.; Justice, C.O. An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor. *Remote Sens. Environ.* **2009**, *113*, 408–420, doi:10.1016/j.rse.2008.10.006.
55. Oliveras, I.; Anderson, L.O.; Malhi, Y. Application of remote sensing to understanding fire regimes and biomass burning emissions of the tropical Andes. *Glob. Biogeochem. Cycles* **2014**, *28*, 480–496, doi:10.1002/2013GB004664.
56. Roy, D.P.; Jin, Y.; Lewis, P.E.; Justice, C.O. Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data. *Remote Sens. Environ.* **2005**, *97*, 137–162, doi:10.1016/j.rse.2005.04.007.
57. Kone, Z. Analyse de la Dynamique Spatio-Temporelle des Feux de Brousse et Leur Relation avec les Facteurs Climatiques dans la Zone Préforestière de la Côte d'Ivoire: Apport de l'Imagerie Satellitaire et des Systèmes d'Informations Géographiques; Mémoire de fin d'Études; Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny: Yamoussoukro, Côte d'Ivoire, 2014.
58. N'Datchoh, E.T.; Konaré, A.; Diedhiou, A.; Diawara, A.; Quansah, E.; Assamoi, P. Effects of climate variability on savannah fire regimes in West Africa. *Earth Syst. Dyn.* **2015**, *6*, 161–174, doi:10.5194/esd-6-161-2015.
59. Dwomoh, F.; Wimberly, M. Fire Regimes and Their Drivers in the Upper Guinean Region of West Africa. *Remote Sens.* **2017**, *9*, 1117, doi:10.3390/rs9111117.
60. Andela, N.; Morton, D.C.; Giglio, L.; Chen, Y.; van der Werf, G.R.; Kasibhatla, P.S.; DeFries, R.S.; Collatz, G.J.; Hantson, S.; Kloster, S.; et al. A human-driven decline in global burned area. *Science* **2017**, *356*, 1356–1362, doi:10.1126/science.aal4108.

61. Etienne, P. *Le Fait Villageois Baoulé*; ORSTOM: Abidjan, Côte d'Ivoire, 1971.
62. Bruzon, Y. Les pratiques du feu en Afrique subhumide : exemples des milieux savanicoles de la Centrafrique et de la Côte d'Ivoire In *Dynamique des Systèmes Agraires, France*; Blanc-Pamard, C., Boutrais, J., Eds.; ORSTOM: Paris, France, 1994; pp. 147–162.
63. Trollope, W.S.W.; de Ronde, C.; Geldenhuys, C.J. Fire behaviour In *Wildland fire management: Handbook for Sub-Saharan Africa*; Goldammer, J.G., de Ronde, C., Eds.; Global Fire Monitoring Center: Freiburg, Germany, 2004; pp. 27–59.
64. Nielsen, T.T.; Rasmussen, K. Utilization of NOAA AVHRR for assessing the determinants of savanna fire distribution in Burkina Faso. *Int. J. Wildl. Fire* **2001**, *10*, 129–135, doi:10.1071/WF01015.
65. Govender, N.; Trollope, W.S.W.; Van Wilgen, B.W. The effect of fire season, fire frequency, rainfall and management on fire intensity in savanna vegetation in South Africa. *J. Appl. Ecol.* **2006**, *43*, 748–758, doi:10.1111/j.1365-2664.2006.01184.x.
66. Guiguindibaye, M.; Belem, M.; Boussim, J. Caractéristiques des feux dans un incendie en savane soudanienne au Tchad. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* **2013**, *7*, 1147, doi:10.4314/ijbcs.v7i3.21.
67. Kull, C.A. Madagascar aflame: landscape burning as peasant protest, resistance, or a resource management tool? *Polit. Geogr.* **2002**, *21*, 927–953, doi:10.1016/S0962-6298(02)00054-9.
68. Holsten, A.; Dominik, A.R.; Costa, L.; Kropp, J.P. How well do meteorological indices explain forest fire occurrence in Germany? In Proceedings of the EGU General Assembly, Vienna, Austria, 7–12 April 2013.
69. Xiao, Y.; Zhang, X.; Ji, P. Modeling forest fire occurrences using count-data mixed models in qiannan autonomous prefecture of Guizhou province in China. *PLoS ONE* **2015**, *10*, e0120621, doi:10.1371/journal.pone.0120621.
70. Archibald, S.; Roy, D.P.; Van Wilgen, B.W.; Scholes, R.J. What limits fire? An examination of drivers of burnt area in Southern Africa. *Glob. Chang. Biol.* **2009**, *15*, 613–630, doi:10.1111/j.1365-2486.2008.01754.x.
71. Sá, A.C.L.; Turkman, M.A.A.; Pereira, J.M.C. Exploring fire incidence in Portugal using generalized additive models for location, scale and shape (GAMLSS). *Model. Earth Syst. Environ.* **2018**, *4*, 199–220, doi:10.1007/s40808-017-0409-6.
72. Pausas, J.G.; Ribeiro, E. The global fire-productivity relationship. *Glob. Ecol. Biogeogr.* **2013**, *22*, 728–736, doi:10.1111/geb.12043.
73. Ríos-Pena, L.; Kneib, T.; Cadarso-Suárez, C.; Klein, N.; Marey-Pérez, M. Studying the occurrence and burnt area of wildfires using zero-one-inflated structured additive beta regression. *Environ. Model. Softw.* **2018**, 1–12, doi:10.1016/j.envsoft.2018.03.008.
74. Krawchuk, M.A.; Moritz, M.A.; Parisien, M.-A.; Van Dorn, J.; Hayhoe, K. Global Pyrogeography: the Current and Future Distribution of Wildfire. *PLoS ONE* **2009**, *4*, e5102, doi:10.1371/journal.pone.0005102.
75. Ríos-Pena, L.; Cadarso-Suárez, C.; Kneib, T.; Marey-Pérez, M. Applying binary structured additive regression (STAR) for predicting wildfire in Galicia, Spain. *Procedia Environ. Sci.* **2015**, *27*, 123–126, doi:10.1016/j.proenv.2015.07.121.
76. Lee, H.-J.; Choi, Y.; Lee, S.-W. Complex Relationships of the Effects of Topographic Characteristics and Susceptible Tree Cover on Burn Severity. *Sustainability* **2018**, *10*, 295, doi:10.3390/su10020295.



© 2018 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Annexe 21 : Liste de publications et communications issues de la thèse

Kouassi, J.-L., Wandan, E., Mbow, C. (2018). Assessing the Impact of Climate Variability on Wildfires in the N’Zi River Watershed in Central Côte d’Ivoire. *Fire*. 1(3), 36. doi: 10.3390/fire1030036

Kouassi, J.-L., Wandan, E., Mbow, C. (2018). Modélisation et prédiction des feux de végétation dans le bassin versant du N’Zi (Centre de la Côte d’Ivoire). Poster présenté aux Doctoriales EDP 2018. 3-6 juillet 2018. Yamoussoukro, Côte d’Ivoire. doi : 10.13140/RG.2.2.23279.12965

Kouassi, J.-L., Wandan, E., Mbow, C. (2018). Impact de la variabilité climatique sur la dynamique des feux de végétation dans le bassin versant du N’Zi (Centre de la Côte d’Ivoire). Communication aux Doctoriales EDP 2018. 3-6 juillet 2018. Yamoussoukro, Côte d’Ivoire

Kouassi, J.-L., Wandan, E., Mbow, C. (2018). Impact de la variabilité climatique sur la dynamique des feux de végétation dans le bassin versant du N’Zi (Centre de la Côte d’Ivoire). Poster présenté à Green Africa Innovation Booster. 26-28 juin 2018. Yamoussoukro, Côte d’Ivoire. doi : 10.13140/RG.2.2.10171.92960