UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



ECOLE DOCTORALE : « Eau, Qualité et Usages de l'Eau »



ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE (ESP)

ANNEE : 2019 N° D'ORDRE : 137

THESE DE DOCTORAT UNIQUE

Spécialité : Climat et Impacts Climatiques

Présentée par

Tamba Nicolas MILLIMONO

TITRE

Contribution à l'étude des feux de brousse en Guinée : approches par observation satellitaire et par modélisation

Soutenue publiquement le 30 novembre 2019 devant le jury composé de :

M. Amadou Thierno	GAYE	Pr/ESP/UCAD	Président
Mme Awa NIANG	FALL	Pr. Assimilée/UCAD	Rapporteur
M. Idrissa	DIABY	Pr/UGAN/Ckry	Rapporteur
M. Alassane	BAH	Pr/ESP/UCAD	Examinateur
M. Jacques André	NDIONE	Dr Habilité /CSE/Dakar	Examinateur
M. Saïdou Moustapha	SALL	Pr/ESP/UCAD	Directeur de thèse
M. Daouda	BADIANE	Pr. Assimilé/ESP/UCAD	Co-directeur de thèse
M. Akoï Massa	ZOUMANIGUI	Dr Habilité /ISSEG/Ckry	Invité

DEDICACE

Je dédie ce travail à la mémoire de mon feu père **Faya Benoit MILLIMONO**, que les écluses des cieux s'ouvrent pour lui, pour qu'il obtienne ce que je ne pourrais lui donner.

A la mémoire de mon ami, feu Abdoulaye **SYLLA**, avec qui j'ai souvent partagé le lit et qui nous a quittés à la fleur de l'âge, que **Dieu** dans sa miséricorde l'ouvre les portes du paradis.

A la mémoire du feu **Siméon FONGANG**, le père fondateur de ce précieux laboratoire **LPAO-SF** qui fait la fierté du monde scientifique.

A ma tendre mère **Sia Fanta TEMESSADOUNO**, symbole de douceur, de tendresse et d'affection. Grâce aux sacrifices immenses qu'elle a consentis au sens du devoir et les valeurs qu'elle m'a inculqué, je suis arrivé à bout. J'espère qu'elle trouvera dans ce document toute ma reconnaissance et tout mon amour.

A ma famille adorée, je veux nommer notre Papa **MILLIMONO Saa Albert**, notre chère maman **Tewa Suzanne TOLNO**, mon oncle **Jérôme TEMESSADOUNO** pour leurs multiples sacrifices en ma faveur depuis ma tendre enfance jusqu'aujourd'hui.

A mes amours, je veux nommer ma tendre femme **Koumba Hélène TENGUIANO**, mes enfants, et mes frères pour tout le soutien moral qu'ils m'ont apporté durant cette épreuve.

A tous mes amis et camarades de classes pour toute la franche collaboration qui a caractérisé nos moments de partage.

REMERCIEMENTS

Ce travail de thèse a été possible grâce à **Dieu** et à la bonne coopération entre la République de Guinée et celle du Sénégal. Ma prière est celle de voir cette coopération s'améliorer pour un futur meilleur.

Tous mes remerciements au Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique de Guinée, par le canal de mon Institution l'ISSEG (Institut Supérieur des Sciences de l'Education de Guinée) et de l'Université Gamal Abdel Nasser pour avoir financé et orienté ma thèse à l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar.

Je remercie tous les responsables de l'ESP et particulièrement ceux de mon laboratoire d'accueil, le LPAO-SF pour toute la diligence qui a caractérisé mon insertion au sein des étudiants du dit laboratoire. Ceci étant, je reviens pour remercier de façon particulière, mes encadrants pour les multiples sacrifices consentis pour coordonner ce travail malgré les difficultés rencontrées tout au long du processus. Je veux nommer mon Directeur de thèse, **Pr. Saïdou Moustapha SALL**, le co-directeur **Pr. Daouda BADIANE**, les encadrants **Pr. Alassane BAH, Pr. Idrissa DIABY**, et **Dr Ibra TOURE** pour les directives, les encouragements, les conseils et tout le soutien moral et financier qu'ils n'ont cessés de m'apporter durant toute cette longue période. Je garde une image particulière du **Pr. Amadou Thierno GAYE, Pr. Amadou Tahirou DIAW** qui ont permis mon acceptation respectivement au LERG et au LPAO-S. F lors de mon stage d'initiation tout au début de cette thèse.

Toute ma gratitude aux Rapporteurs **Prof. Awa Niang FALL** et **Prof. DIABY** pour la qualité des critiques apportées et surtout les bonnes orientations lors de la finalisation de ce travail.

Mes remerciements vont également à l'endroit de **Pr. Mohamed Lamine BAYO** et **Dr Akoï Massa ZOUMANIGUI** respectivement ex et actuel Directeur Général de l'ISSEG, qui ont bien voulu faciliter le processus de financement de cette thèse et surtout la disponibilité de Dr **ZOUMANIGUI** qui a bien pris part à ma soutenance.

Une mention spéciale pour mes compatriotes Diakaria DIALLO, Ibrahima Kalil KANTE, Mamadou Bailo BARRY, Fara Wagbo TEMESSADOUNO, Fara Raymond KOUNDOUNO et mon cousin Emile TOLNO qui m'ont apporté un soutien particulier tout au long de cette thèse. Je remercie très sincèrement mes collègues Docteurs Moussa DIAKHATE, Habib SENGHOR alias *Senghor Solution*, Siny NDOYE, Lahat DIENG, Ibrahima CAMARA, Souleymane SY, Mame Diarra Bousso DIENG, Lala KOUNTA, Aissatou FAYE, Paul PYTHON et Ibrahima DIOUF qui ont toujours accepté de consacrer leur temps précieux pour trouver des solutions aux problèmes que je ne cessais de poser dans le cadre du travail.

La liste pourrait être longue si je dois nommer Gloria JONSHON, Cheikh Noreyni FALL, Khassoum CORREA, Adama BADIANE, Mamadou SADIO pour toute la bonne collaboration et les amitiés qui ont caractérisées mon séjour au Labo. Bref, que tous les Docteurs, Doctorants et Etudiants en master, chacun pour sa contribution en soit remercié.

C'est aussi le lieu de remercier mes collaborateurs du CSE (Centre de suivi écologique), plus particulièrement Monsieur **Ousmane BOCOUM et Dr Jacques André NDIONE** pour toute l'assistance technique qu'ils m'ont apportée pour l'obtention des résultats de ce travail.

Je n'oublierai jamais mes cousins **Emile TOLNO, Mathieu TEMESSADOUNO, Dr Tamba IFFONO, Felix TEMESSADOUNO** pour leur soutien inconditionnel.

Je veux terminer en remerciant encore avec un cœur plein de gratitude, ma chère épouse **Koumba Hélène TENGUIANO**, pour tout son amour, sa patience et la sagesse avec laquelle elle a géré notre modeste famille lors de mes périodes d'absence du pays.

Je n'oublierai jamais que cette thèse est le fruit du soutien d'un grand nombre de personnes dont la générosité, la bonne humeur et l'intérêt manifestés à l'égard de ma recherche m'ont permis de progresser dans cette aventure scientifique.

Que **Dieu** qui est en amont et en aval de toutes choses apporte sa grâce à tous ceux qui, de près ou de loin ont contribué pour l'aboutissement de ce travail. Amen !!

RESUME

Les feux de brousse sont des phénomènes qui impactent négativement les ressources naturelles et contribuent aux changements climatiques. Ce travail porte sur la contribution à l'étude des feux de brousse en Guinée par des observations satellitaires et par la modélisation. Les images satellitaires MODIS bi-journalières et mensuelles (**1km** de résolution pour les feux actifs et de **500m** pour les surfaces brûlées), Landsat et SRTM de **30m** de résolution ainsi que des données météorologiques des stations synoptiques de Guinée et celles en lignes ont été utilisées.

Pour l'analyse de la variabilité des feux, les pixels de feu MODIS classés sur une échelle de fiabilité ou intervalle de confiance de **0** à **100** ont été sélectionnés par seuillage et les valeurs comprises entre **75** et **100** de cette échelle ont été retenues et considérées comme des pixels de feu avéré. Le maillage carré avec transfert de valeur de ces pixels retenus a permis de produire des cartes de densité de feu. Le calcul et la distribution des surfaces brûlées par préfecture ont été faits par superposition des images MODIS avec la carte administrative de la Guinée. Une interpolation des pixels de feu pour la saison **2007-2008** par krigeage ordinaire et une superposition avec des données de pluie sur la période **2003-2013** ont permis d'observer la dynamique saisonnière des feux en Guinée. L'outil de modélisation FARSITE (Fire Area Simulator) a permis de simuler la propagation des feux à Maléa. Le modèle a été calibré en intégrant les paramètres de la végétation, de la topographie et de la météo de Siguiri. Le temps de brûlage et les points d'ignition ont été fixés tout en admettant des scénarios à savoir: la propagation du feu sans vent, ni pente ; avec pente et avec vent.

Les résultats montrent les densités atteignant 100 pixels de feu aux 100 km² par an, avec près de 6000 km² brûlés par an en Guinée. Les occurrences élevées des feux s'observent entre décembre et février et les années 2007, 2008, 2009 et 2014 ont été les plus marquées par ces feux sur la période 2003-2016. Le record sur les occurrences des feux est observé sur les préfectures de la haute Guinée et dépendrait des conditions climatiques et des activités humaines. La modélisation a permis de montrer que les feux dans les savanes de Maléa, sous l'effet du vent atteignent une vitesse de propagation de 8,6m/min, soit 0,516km/h et produisent une chaleur de l'ordre de 3.10⁴ KJ/m² avec une intensité de réaction de l'ordre de 2.10³KW/m.

Les feux étant des phénomènes très dynamiques dans le temps et dans l'espace, leur suivi et l'étude de leurs caractéristiques sur des échelles plus fines seraient nécessaire pour la compréhension de la dynamique des écosystèmes guinéens.

Mots clés : *Feux de brousse, observations satellitaires, FARSITE, modélisation, écosystème, Guinée.*

ABSTRACT

Bushfires are phenomena that negatively impact natural resources and contribute to climate change. This work focuses on the contribution to the study of bush fires in Guinea using satellite observations and modeling. The data used are bi-daily and monthly MODIS satellite images (1km resolution for active fires and 500m for burned surfaces), Landsat and SRTM with 30m resolution. The weather data of the synoptic stations of Guinea and those in lines.

For the analysis of fire variability, MODIS fire pixels classified on a reliability scale or confidence interval of **1** to **100** were selected by thresholding and values between **75** and **100** of this scale were selected and considered as valid fire pixels. The square mesh with transfer of value of these selected pixels made it possible to produce maps of density of fire. The calculation and distribution of surfaces burned by prefecture were made by superimposing the MODIS images with the administrative map of Guinea. An interpolation of the fire pixels for the 2007-2008 season by ordinary kriging and an overlay with rain data over the period 2003-2013 made it possible to observe the intra-seasonal dynamics of the fires in Guinea. The FARSITE (Fire Area Simulator) modeling tool simulated the spread of fires in Maléa. The model was calibrated by integrating the vegetation, topography and weather parameters of Siguiri. The burning time and the ignition points were fixed while admitting scenarios namely: the spread of fire without wind or slope; with slope and with wind.

The results show densities of up to **100** fire pixels per **100km2** per year, with nearly **6000** km2 burned per year in Guinea. The high occurrences of fire are observed between December and February and the years 2007, 2008, 2009 and 2014 were the most marked by these fires over the period 2003-2016. The utmost of fire occurrences is observed in the prefectures of Upper Guinea and would depend on climatic conditions and human activities. The FARSITE simulation has shown that fires in the Maléa savannas, With the wind effect reach a propagation speed of **8,6m/min**, or **0,516km/h** and produce a heat of about **3.10⁴ KJ/m²** with a reaction intensity of the order of **2.10³KW/m**.

As fires are very dynamic phenomena in time and space, their monitoring and the study of their characteristics on finer scales would be necessary to understand the dynamics of Guinean ecosystems.

Key words: Bush fires, satellite observations, modeling, FARSITE, ecosystem, Guinea

ACRONYMES

ACQUA	: Platform for MODIS sensor
ATSR	: Along-Track Scanning Radiometer
AVHRR	: Advanced Very High Resolution Radiometer
BAI	: Burn Area Index
BANBI	: Burn Annual Normalized Brightness Index
BI	: Brightness Index
BISE	: Best Index Slope Extraction
DFF	: Eléments fins et secs de végétation (tas : dry fine fuel)
dGPS	: differential Global Positioning System
EOS	: Earth Observing System
ЕТМ	: Enhanced Thematic Mapper Plus
EVI	: Enhanced Vegetation Index
FAO	: Food and Agriculture Organization of the United Nations
FARSITE	: Fire Area Simulator
FIRMS	: Fire Monitoring System
FRP	: Fire Radiative Power
GEMI	: Global Environment Monitoring Index
GIS	: Geographic Information System
GLM	: Generalized Linear Model
GTZ	: Agence d'assistance technique allemande
HDF	: Hierarchical Data Format
IPCC	: Intergovernmental Panel on Climate Change
LST	: Land Surface Temperature

MDC 45	: MODIS burned area product
MERIS	: MEdium Resolution Imaging Spectrometer
MIR	: Moyen Infra Rouge
MOD	: MODIS Terra product
MODIS	: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MTDA	: Bureau d'études spécialisé dans la protection de l'environnement et, plus précisément, dans l'aménagement des espaces naturels.
NBR	: Normalized Burn Ratio
NDVI	: Normalized Difference Vegetation Index
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
VESTA	: Logiciel simulateur du feu à grande échelle
SEVIRI	: Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager
SPOT	: Système probatoire d'observation de la Terre ou Satellite pour l'observation de la Terre)
SRTM	: Shuttle Radar Topography Mission
UTM	: (Universal Transverse Mercator)
WGS 1984	4 : (World Geodetic System 1984)
WEE	· Elémente fine et humides de vécétation (tes · wet fine fuel)

WFF : Eléments fins et humides de végétation (tas : wet fine fuel)

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Traces de feu dans le monde avec les pourcentages élevés en Afrique3
Figure 2. Février 2019, un feu de brousse incontrôlé touche le village Souleymania (Faranah)
et près de 100 cases et leurs contenus partis en fumée selon le site Guineenws.org4
Figure 3. Limites des régions naturelles et préfectures de la Guinée
Figure 4. Carte des écosystèmes terrestres potentiels de Guinée en fonction des conditions
abiotiques
Figure 5. Présentation du relief de la Guinée. La moyenne Guinée et la Guinée forestière sont
des zones de montagnes 14
Figure 6. Les origines des feux de brousse les plus connues en Guinée
Figure 7. Principes et limites de détection des feux actifs par MODIS
Figure 8. Exemple de simulation avec un modèle probabiliste
Figure 9. Évolution du front de feu du modèle de Rothermel 1973
Figure 10. Modèle théorique de propagation du feu
Figure 11. Simulation numérique du modèle hybride de propagation du feu
Figure 12. Modèle théorique de propagation des feux
Figure 13. Test de validation du modèle FIRETEC
Figure 14. Calcul des densités de feux par la procédure du maillage carré avec transfert de
valeur, la zone contenant des pixels de feux est en grilles de 100x100 km
Figure 15. Schéma conceptuel de la simulation FARSITE. La végétation et la topographie
sont des paramètres obligatoires, la météo rassemble les paramètres de forçage du modèle 48
Figure 16. Carte d'Elévation en mètre de la zone pour le réglage adiabatique de la température
et l'humidité dans FARSITE
Figure 17. Cartes des pentes en pourcentage, pour le calcul des effets directs sur la
propagation du feu
Figure 18. Exposition pour la détermination de l'angle de rayonnement solaire incident 50
Figure 19. Modèle combustible (FM) ou description physique du combustible de surface 52
Figure 20. La canopée ou couvert forestier du site de Maléa53
Figure 21. Distribution des densités de feu en Afrique subsaharienne, année 200357
Figure 22. Densité des feux actifs en Afrique et zoom sur la Guinée (2003, 2009 et 2014) à
partir des images MODIS
Figure 23. Densité de feu en Guinée sur la période 2003-2016 à partir des images MODIS 60

Figure 24. Traces de feu au sud-est de la Guinée à partir des images MODIS, 500mx500m de
février 2016
Figure 25. Traces de feux au sud-est de la Guinée à partir des images Landsat 8, 30 m de
résolution de février 2016
Figure 26. Anomalies standardisées des feux actifs (en haut) et des surfaces brûlées (en bas)
par préfecture sur la période 2003-2016 à partir des données MODIS63
Figure 27. Variabilité spatiale des surfaces brûlées en Guinée sur la période 2003-2016 à
partir des données, 500m de résolution MODIS)65
Figure 28. Variabilité annuelle des feux actifs sur la période 2003-2016
Figure 29. Feux actifs annuel sur la période 2003-2013 à partir des données MODIS
Figure 30. Précipitations annuelles de 2003 à 2013 à partir des données des stations
synoptiques
Figure 31. Humidité relative moyenne sur la période 2003- 2016 à partir des réanalyses ERA-
Interim 0.25°x0.25°
Figure 32. Variabilité annuelle des surfaces brûlées 2003-2016
Figure 33. Variabilité saisonnière des feux et des précipitations au nord-est de la Guinée,
observations aux stations synoptiques de Faranah, Kankan et Siguiri sur la période 2003-
2013
Figure 34. Variabilité saisonnière des feux et des précipitations au sud de la Guinée, aux
stations synoptiques de Kissidougou, Macenta et N'zérékoré sur la période 2003-2013 72
Figure 35. Dynamique saisonnière des feux de brousse de novembre 2007 à mai 2008 et le
contraste du couvert végétal en 2008 en NDVI (Indice de végétation normalisé)
Figure 36. Feu de champ dans la réserve des monts Nimba
Figure 37. Puissance radiative (FRP) en Kilowatt (KW/Km2) émise par les feux en Guinée en
2004
Figure 38. Puissance radiative (FRP) en Kilowatt (KW/Km2) émise par les feux en Guinée en
2014. Les fortes valeurs sont comprises entre mars-avril-mai, période des feux tardifs76
Figure 39. Délimitation de la zone de Maléa située dans la préfecture de Siguiri
Figure 40. Distribution mensuelle des précipitations à Siguiri sur la période 1961-2012 à
partir la station synoptique
Figure 41. Variation mensuelle moyenne des températures à Siguiri, à partir des données
d'observation journalières de la station synoptique sur la période 2001-2010
Figure 42. Variation des humidités maximales à Siguiri de 1981 à 2009 à partir des données
d'observations de la station synoptique

Figure 44. Le triangle de feu explique les trois éléments nécessaires pour l'éclosion du feu. 91 Figure 45. Départ d'un feu de brousse contrôlé par les paysans pour des travaux champêtres. Figure 46. Schéma des trois modes de transfert de chaleur : la conduction, la convection et le Figure 47. Propagation des feux en l'absence de vent dans une zone de plaine. Légende : 1= herbes courtes d'environ 30 cm de hauteur ; 2= arbustes et herbes sous-bois ; 4= champ d'arbuste, 9= litière en bois dur, 98= eau ; 99= pas de données. Les traits blancs courbés Figure 50. Temps de propagation du feu. Les nuances de couleurs caractérisent les intervalles de temps du front de feu dans les trois cas de figures. La partie en bleu correspond à la zone d'ignition ou zone de départ du feu et en rouge, la zone d'arrivée......97 Figure 51. Intensité du feu en Kilowatt par mètre dans les scénarios sans vent, avec vent et Figure 52. Taux ou vitesse de propagation du feu dans les scénarios sans vent, avec vent et Figure 53. Intensité de la réaction du feu en KW/m² dans les scénarios sans vent, avec vent et Figure 54. Quantité de chaleur émise par unité de surface suivant les trois scénarios (effet des Figure 55. Prédiction directionnelle de la propagation du feu suivant les trois scénarios 103 Figure 56. Simulation de la propagation du feu sous les effets du vent et des pentes 1= herbes courtes d'environ 30cm de hauteur ; 2= arbustes et herbes sous-bois ; 4= champ d'arbuste, 9= litière en bois dur, 98= eau ; 99= pas de données. 104 Figure 57. Courbe d'évolution du périmètre de brûlage en fonction du temps, environ 72km Figure 58. Courbe d'estimation de la surface brûlée en fonction du temps......105 Figure 59. Savane herbeuse à Balizia, une zone à risque dans la préfecture de Macenta Figure 60. Zone brûlée dans la préfecture de Gueckédou, ex-zone forestière. Photo prise lors des travaux de validation des images MODIS en mars 2015......109

Figure 61. Animal victime du feu de brousse.	110
Figure 62. Ensablement du lit du fleuve Sankarani en 2014, photo prise lors de la v	isite de
terrain dans le cadre du projet MODEV (Kouroussa)	111
Figure 63. Sol appauvri dans la contrée de Siguiri suite au passage répété des feux	de brousse
(2012)	112

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. Fonctions des paramètres d'entrée FARSITE (Khalil et al., 2012) 3	8
Tableau II: Caractéristiques des capteurs ETM+ 4	4
Tableau III Modèles combustibles selon Anderson (1982)	;1
Tableau IV. Vitesses moyennes et directions du vent du 26, 27 et 28 janvier 2009 utilisées	
pour la modélisation	;4
Tableau V. Moyennes journalières des températures en °C et de l'humidité en % du 26, 27 et	-
28 janvier 2009 utilisées pour la modélisation	;4
Tableau VI. Récapitulatif des estimations en hectare des surfaces brûlées par préfecture et pa	r
an, de 2003 à 2016	54
Tableau VII. Classification des taux de propagation (Scott et al. 2005))1

TABLE DES MATIERES

DEDICACEi
REMERCIEMENTSii
RESUMEiv
ABSTRACTv
ACRONYMESvi
LISTE DES FIGURESviii
LISTE DES TABLEAUXxii
TABLE DES MATIERESxiii
INTRODUCTION GENERALE1
Chapitre I Généralités sur les feux de brousse7
Introduction7
I-1 Présentation générale de la Guinée7
I-1-1 Situation géographique7
I-1-2 Contexte physique
I-1-2-1 Végétation
I-1-2-2 Relief
I-1-2-3 Réseau hydrographique interne
I-1-2-4 Sols
I-1-3 Contexte climatique15
I-1-4 Aspect socio-économique16
1-1-5 Limites des travaux sur les feux de brousse en Guinée
I-2 ETAT DE L'ART18
I-2-1 Observation et suivi des feux de brousse par imagerie satellitaire
I-2-1-1 Bases théoriques de la télédétection des feux de brousse
I-2-1-2 Systèmes de capteurs utilisés24
I-2-2 Modélisation de la propagation des feux de végétation27
I-2-2-1 Les modèles statistiques
I-2-2-2 Les modèles semi-empiriques
I-2-2-3 Les modèles théoriques ou physiques
I-2-3 Présentation de FARSITE

Chapitre II D	onnées, outils et méthodes	
Introducti	on	
II-2 Donn	lées	
II.1.1.	Données MODIS feux actifs	
II.1.2.	Données MODIS de surfaces brûlées	
II.1.3.	Les images Landsat	
II.1.4.	Données météorologiques	
II-2 Outil	s de traitement	
II-3 Méth	odes de traitement	
II-3-1 I	Détection des feux actifs et des surfaces brûlées	
II-3-2 N	Modélisation de la propagation du feu par FARSITE	47
Chapitre III	Analyse des variabilités spatio-temporelleS des feux de brousse	en Guinée
•••••		
Introducti	on	
III-2 Dist	ribution spatiale des feux	
III-3 Vari	abilité temporelle des feux en Guinée	
III-3-1	Variabilité annuelle des feux actifs	
III-4 Dyn	amique saisonnière des feux actifs	71
III-4-1	Variabilité saisonnière	71
III-5 Con	clusion du chapitre	77
Chapitre IV I Introducti	Modélisation de la Propagation du feu A MaLEA (Siguiri)	
IV-1 Prés	entation de la zone de Siguiri	
IV-2 Rap	ppel de la structure d'un feu	
IV-3 Rap	pel des mécanismes de propagation de la chaleur	
IV-4 Sim	ulation de la propagation spatiale du feu par FARSITE à Maléa	
IV-4-1	Propagation spatiale des feux à Maléa	

IV-4-1-1 Ignition et propagation sans vent, dans un milieu sans pente ou scénario 1
93
IV-4-1-2 Ignition et propagation sans vent dans un milieu de pentes ou scénario 2.94
IV-4-1-3 Ignition et propagation du feu sous l'effet du vent ou scénario 395
IV-5 Analyse des caractéristiques du feu sur Maléa96
IV-6 Conclusion du chapitre
Chapitre V Discussions de quelques formes d'impacts du feu sur la vegetation, la faune,
les sols et les cours d'eau107
V-1 Discussions
V-1-1 Impact du feu sur la végétation guinéenne108
V-1-2 Effets du feu sur la faune forestière110
V-1-3 Impact du feu sur les cours d'eau110
V-1-4 Impact du feu sur les sols111
V-1-5 Analyse du problème et propositions de méthode de gestion des feux 112
CONCLUSION GENERALE
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 117
GLOSSAIRE

INTRODUCTION

INTRODUCTION GENERALE

La compréhension de la récurrence des feux de brousse dans le monde et surtout en Afrique est un sujet très complexe et passionnant qui exige des investigations sur plusieurs aspects (scientifique, technique, sociologique, économique et politique). Si le monde entier s'émeut face aux incendies sans précédent qui ravagent actuellement la forêt amazonienne, de l'autre côté du globe, la situation est tout aussi inquiétante en Afrique.

Les images actuelles des systèmes satellitaires de surveillance des feux de forêt indiquent que le nombre de foyers est encore plus important en Afrique subsaharienne [(1)*http://curioso-por-naturaleza.blogspot.com/2017/07*]. Si les causes de ces incendies sont bien différentes de celles en Amazonie, les conséquences n'en restent pas moins catastrophiques pour les pays d'Afrique, sanctuaires d'une faune et d'une flore endémiques.

La Guinée, un pays côtier d'Afrique subsaharienne est victime de ces feux de brousse qui dégrade l'environnement et qui sont pour la plupart d'origine humaine, liés aux activités pastorales, agricoles (feux de défrichements), de braconnage, d'apiculture, de production du charbon, de chasse et autre. Ces pratiques abusives ont décimé, au fil des ans, la faune sauvage et accentué la déforestation [(2)<u>https://www.mediaterre.org/actu</u>].

Cependant, le code forestier guinéens [(3) <u>https://www.a-mla.org</u>] stipule en son Article 71 : le Domaine Forestier doit être protégé contre toute forme de dégradation ou de destruction causée, notamment, par la surexploitation, le surpâturage, les incendies, les brûlis, les défrichements abusifs, les maladies, l'introduction d'espèces inadaptées ainsi que la désertification.

Plus loin, dans le cadre de la réglementation des feux de brousse, ce code stipule en son Article 82 : les mises à feu contrôlées, à des fins agricoles, pastorales ou pour le débroussaillement, ainsi que les mises à feu précoce, ne peuvent être pratiquées que dans les limites et selon les modalités prévues par le présent Code et ses textes d'application.

Pour clore sur cette question des feux de brousse, ce code envisage des sanctions en son Article 120 : quiconque aura mis le feu dans le Domaine Forestier en violation des dispositions du présent Code ou de ses textes d'application sera puni d'un emprisonnement de 1 à 2 ans et d'une amende de 200.000 à 500.000 francs guinéens.

Malheureusement, l'on se rend compte que ces textes n'ont aucune incidence lorsqu'on observe le nombre de foyer de feux en Guinée. La mise en œuvre d'une politique forestière ne

peut être que progressive du fait des nombreuses contraintes administratives, budgétaires, techniques, humaines et sociales. Malgré ces difficultés, elle ne doit pas attendre, car chacun sait que la destruction d'une forêt et la ruine d'un sol tropical sont aisés, tandis que leur reconstitution ne peut être que très lente et progressive, parfois même impossible à l'échelle humaine.

La période de jachère des zones cultivables étant complétement perturbée par les feux de brousses incontrôlés, les excès de brûlage accentueront l'appauvrissement des sols, réduisant ainsi le rendement des productions agricoles. Nos constats lors d'une mission de terrain dans le cadre de l'exécution du projet MODEV (Modélisation et Développement durable) en 2014, montrent que le niveau d'ensablement de la plupart des cours d'eau guinéens est inquiétant et se poursuivra si les feux de brousse qui contribuent à l'érosion des sols ne s'attenus. Les feux apparaissent sous cet angle, comme une contrainte majeure à la conservation durable des ressources naturelles en Guinée.

Malgré ces multiples conséquences, peu de travaux en matière de recherche sont encore réalisés en Guinée, notamment sur la compréhension de la distribution spatio-temporelle et les caractéristiques des feux sur les écosystèmes. La mise en place d'une efficace stratégie de gestion des feux de brousse consisterait d'abord à la maîtrise de leur distribution en utilisant les images satellitaires, puis à la connaissance des facteurs qui conditionnent leur éclosion (Poilecot, 2008). La poursuite des travaux sur les feux en vue de parvenir à leur atténuation s'avère donc indispensable pour une gestion durable des ressources naturelles. Cela devra obligatoirement passer par le choix et la maîtrise des techniques d'observation satellitaire et de modélisation en fonction des écosystèmes, puis une analyse socio-économiques intégrants les données de terrain.

Le présent travail de recherche est une contribution à la complexe question de la compréhension de la distribution spatiale et temporelle des feux de brousse en Guinée depuis la période 2003 pendant laquelle les satellites TERRA et AQUA ont commencé à fournir des données *MODIS* bi-journalières sur les feux dans le monde, jusqu'en 2016 période limite de nos observations. Il s'agit bien avant de comprendre la distribution des densités des feux de brousse et les statistiques des surfaces brûlées sur toute l'étendue du territoire guinéen sur la période 2003-2016 en utilisant des données d'observation satellitaires et ensuite, à l'aide du simulateur FARSITE, étudier les caractéristiques des feux dans les savanes de Maléa (Préfecture de Siguiri), l'une des zones beaucoup affectées par les feux de brousse. La disponibilité des données de télédétection et l'existence des modèles sont deux atouts pour un

tel travail. C'est d'ailleurs l'une des raisons qui nous ont conduit dans cette thèse, à formuler ce thème intitulé : "Contribution à l'étude des feux de brousse en Guinée : approches par observation satellitaire et par modélisation".

1- Problématique de recherche

1-1 Contexte

On observe depuis quelques décennies à l'échelle mondiale, une hausse des températures avec certaines incertitudes autour de ces augmentations [(4)IPCC, 2007]. Dans ce contexte, les risques d'apparition de phénomènes météorologiques extrêmes partout sur la planète entraîneront une vulnérabilité des écosystèmes ayant pour conséquences des effets défavorables. On constate notamment une augmentation des sécheresses, des vagues de chaleur ainsi que des inondations [(5)IPCC srx, 2014]. Un climat chaud et sec pourrait donc contribuer à une augmentation des incendies de végétation de même que des superficies brûlées dans les forêts et les savanes partout dans le monde (Fig. 1).





[(1)http://curioso-por-naturaleza.blogspot.com/2017/07]

Les feux de brousse qui affectent chaque année les savanes africaines sont des phénomènes anciens dont la présence remonterait au Néolithique selon plusieurs auteurs (Schnell et al.,1952 ; Ramade et al.,1977 ; Valéa, 2005). La plupart des études réalisées sur ces feux sont plus ou moins axées sur les origines, leurs utilisations et leurs rôles dans la conservation des savanes (Mbow, 2004 ; Valéa, 2005 ; Sow, 2012). Ces incendies souvent

provoqués par les populations constituent un risque naturel important aux répercussions diverses, notamment économiques et environnementales. En résumé, bien que les feux dans les savanes soient généralement causés par les hommes, le climat a un impact sur leur distribution et leur dynamique dans l'espace et dans le temps, notamment en régulant la quantité de combustibles disponibles et « prédisposés » à brûler.

En Guinée, bien que peu d'études soient encore réalisées sur les feux, les constats effectués par plusieurs journaux nationaux en ligne attirent l'attention des environnementalistes et des chercheurs [(6)*lexpressquinee.com*]; Guineematin.com ; guineeactu.com...). En plus de la végétation qui part en fumée, des animaux sauvages qui fuient ou qui meurent, ces feux majoritairement incontrôlés débordent parfois sur des villages et causent des dégâts matériels important et même des pertes en vies humaines (figure 2).



Figure 2. Février 2019, un feu de brousse incontrôlé touche le village Souleymania (Faranah) et près de 100 cases et leurs contenus partis en fumée selon le site Guineenws.org.

Aujourd'hui, au-delà d'une simple approche théorique, les problèmes environnementaux, qui mettent en péril le devenir de la faune et de la flore guinéenne exigent des réponses pratiques à la hauteur des enjeux et des menaces. La compréhension des variabilités spatiales et temporelles des feux de brousse, leurs modes de propagation et leurs impacts aussi bien sur les différentes composantes des milieux (végétation, sol, atmosphère) que sur les aspects humains reste problématiques en matière de gestion des ressources naturelles. En d'autres termes, il est nécessaire de comprendre la dynamique spatio-temporelle des feux pour espérer minimiser leur ampleur et leurs impacts sur les milieux. Aussi, ces aspects entrent pour une grande part dans les politiques actuelles d'aménagement et de gestion des ressources naturelles.

Ce travail de recherche met donc un accent particulier sur l'analyse de la dynamique spatio-temporelle et des caractéristiques des feux de brousse en Guinée au cours de la période 2003-2016. En effet, si les feux sont parfois considérés en Guinée comme outils d'aménagement et de nettoyage pour les populations rurales, leur ampleur et leurs impacts sur les écosystèmes sont de nos jours peu évalués. Les études exhaustives actualisées et fiables faisant recours aux données d'observations satellitaires pour le suivi des feux de brousse sur l'étendue du territoire sont minimes (Poilecot et al.,2009 ; Barry et al., 2015 ; Millimono et al., 2017).

I-2 Objectifs et questions de la recherche

L'objectif général poursuivi dans ce travail est l'analyse de la distribution spatiale et temporelle des feux de brousse et leurs impacts sur les écosystèmes forestiers sur la période 2003-2016. Plus spécifiquement, il s'agira :

- 1- d'étudier la variabilité spatiale et temporelle des feux de brousse en Guinée sur la période 2003-2016
- 2- de simuler la propagation et les caractéristiques de ces feux dans les savanes du Nord Est de la Guinée
- 3- d'identifier quelques impacts de ces feux sur les écosystèmes.

L'atteinte de ces objectifs permettra de répondre aux questions suivantes :

- Quelles sont les variabilités spatio-temporelles des feux de brousse en Guinée et quels sont des facteurs dont dépendent la distribution de ces feux?

- Comment se propage ces feux et quelles sont ses caractéristiques dans une zone de savane guinéenne ?

-Quelles dispositions faut-il prendre pour juguler ces feux en Guinée qui impactent les structures écosystémiques de Guinée ?

La démarche méthodologique utilisée pour répondre à ces questions combine travaux de terrain, télédétection satellitaire et simulation de la propagation du feu. Elle a permis de faciliter la compréhension de la dynamique des feux sur l'étendue du territoire guinéen sur la période 2003-2016. Notre approche consiste à analyser les produits MODIS afin d'estimer les feux actifs et les surfaces brûlées à l'échelle du territoire national. Le produit MODIS Surfaces Brûlées (MCD45) est bien adapté au suivi des surfaces brûlées pour des échelles globale, continentale ou nationale (Roy et al., 2008) et le système opérationnel de suivi des feux actifs

« Système d'Alerte Feu » (FIRMS), développé par l'Université du Maryland et la NASA est utile pour le suivi des feux actifs dans les écosystèmes à grande échelle.

Pour la simulation de la propagation de ces feux de brousse au Nord-Est de la Guinée, précisément à Maléa (Siguiri), le logiciel FARSITE (*Fire Area Simulator*) a été utilisé. Le calibrage a été fait avec les données de vent, température, humidité, pluie, topographie et combustible. La procédure de calibrage consiste à procéder au traitement d'images Landsat ETM+ et des SRTM pour caractériser la végétation et la topographie, les données climatiques de la zone et produire des scénarios de propagation et des caractéristiques des feux à l'aide de FARSITE et les SIG.

Pour restituer l'essentiel des travaux, nous avons subdivisé ce manuscrit en cinq chapitres. Au chapitre I, nous abordons les généralités qui englobent la présentation de la Guinée et la revue bibliographique. Nous caractérisons la Guinée du point de vue climat, végétation, écologie et topographie. La revue de la littérature sur l'observation et la modélisation des feux a été fait et les raisons du choix des données MODIS et du simulateur FARSITE ont été justifiée. Cette revue de la littérature a permis aussi de mettre en exergue, l'insuffisance des travaux sur l'observation des feux en Guinée.

Au chapitre II, nous détaillons les données utilisées dans ce travail tout en décrivant les méthodes adoptées pour les différentes analyses.

Le chapitre III présente les résultats des observations satellitaires des feux en Guinée, ce qui a permis d'identifier les périodes de feu et les zones à risques. La dynamique saisonnière et interannuelle a été clairement montrée dans ce chapitre.

Les travaux sur la modélisation de la propagation des feux sont présentés au chapitre IV et ont permis de prédire quelques éléments caractéristiques du feu comme le taux (ou vitesse) de propagation, l'intensité de la réaction, la chaleur émise et la direction de propagation.

Les résultats des chapitres III et IV ont permis de publier respectivement un article en 2017 et un autre en 2019 (voir annexe). Nous avons consacré le chapitre V à la discussion des résultats, la conclusion générale et aux perspectives pour la poursuite de la recherche dans le domaine des feux de brousse en Guinée.

Dans le chapitre Généralité qui suit, après une brève présentation de la Guinée, nous aborderons l'état de l'art sur l'observation et la modélisation des feux de brousse en mettant l'accent sur les limites des travaux existants et l'intérêt de la compréhension de la thématique des feux en Guinée.

CHAPITRE I GENERALITES SUR LES FEUX DE BROUSSE

CHAPITRE I GENERALITES SUR LES FEUX DE BROUSSE

Introduction

Ce chapitre présente la zone d'étude qui est la Guinée en mettant un accent sur le relief, la végétation et le climat qui sont des facteurs influents pour l'étude des feux de brousse. Une revue de la littérature sur les feux de brousse incluant les méthodes d'observations et de modélisations a été fait.

Nous fournissons les raisons du choix des données MODIS pour l'analyse de la variabilité des feux de brousse en Guinée et de FARSITE (*Fire Area Simulator*) pour la simulation de la propagation et des caractéristiques de ces feux à Siguiri précisément dans la sous-préfecture de Maléa.

I-1 Présentation générale de la Guinée

I-1-1 Situation géographique

La Guinée est située au Sud-Ouest de l'Afrique Occidentale, elle est comprise entre 7° 05" et 12° 51" de latitude Nord et de 7° 30" et 15° 10" de longitude Ouest, à mi-chemin de l'équateur et du tropique du Cancer. Elle couvre une superficie de 245 857 km². C'est un pays côtier avec 300 km de littoral atlantique ouest et un relief varié allant des plaines du littoral à basse altitude aux zones montagneuses de l'intérieur du pays atteignant dans certains endroits une altitude de plus de 1500 m.

La Guinée est limitée par la Guinée-Bissau à l'Ouest (386 km de frontières), le Sénégal au Nord (330 km), du Mali au Nord (858 km) et Nord-Est, par la Côte d'Ivoire à l'Est (610 km), le Libéria (563 km) et la Sierra Leone (652 km) au Sud et par l'Océan Atlantique à l'Ouest (Figure 1). Sur le plan administratif, le pays est découpé en 7 régions en dehors de la ville de Conakry qui constitue une zone spéciale avec 5 communes. Elle compte 33 préfectures et 345 sous-préfectures. Les sous-préfectures sont subdivisées en districts et quartiers urbains. Le pays compte quatre régions naturelles (Figure 3), la Haute Guinée, la Basse Guinée, la Moyenne Guinée et la Guinée Forestière.



Figure 3. Limites des régions naturelles et préfectures de la Guinée.

I-1-2 Contexte physique

I-1-2-1 Végétation

Les travaux statistiques sur la situation actuelle de la végétation guinéenne dans son ensemble, même s'ils existent, sont difficiles d'accès et nous faisons donc une synthèse des travaux de Bah et al. (1997) dans le cadre de l'étude monographique de Guinée sur chacun de ces quatre régions naturelles.

En Basse Guinée, la dégradation du potentiel forestier, suite à l'extension des terres agricoles (y compris la riziculture dans les mangroves) et l'exploitation de bois de chauffe (due à une forte demande à Conakry) est très accentuée. Actuellement, les forêts couvrent seulement environ 8% de la superficie. Au nombre de ces forêts il faut compter les 50 000 ha de reste de la forêt dense mésophile (forêt relique de Kounounkhan à Forécariah) et les 250 000 ha au plus de formation de mangrove dont à peine 120 000 ha susceptibles d'une gestion forestière.

En Moyenne Guinée, il n'existe plus réellement de massifs forestiers en dehors de quelques petites forêts classées relativement conservées et des 450 ha de plantations de pins de Dalaba.

En Haute Guinée, la forêt dense sèche couvre 8,3% de la région, soit 800.000 ha, mais la situation forestière de cette région présente deux aspects contrastés. D'une part, dans les zones d'anciennes fortes occupations agricoles, c'est à dire autour de certaines villes comme Kankan ou Faranah et le long des fleuves, la forêt a complètement disparu, créant de graves problèmes d'érosion des sols, d'origine tant pluviale qu'éolienne, d'ensablement des lits des fleuves, et des difficultés d'approvisionnement en bois de feu et de service et autres produits de la forêt (médicaments, gibiers...). D'autre part, dans les zones peu peuplées car soumises à l'onchocercose ou peu accessibles, on peut rencontrer des massifs relativement intacts de forêts denses sèches, de 50 à 200 ha de superficie moyenne, dont la richesse dépend fortement de la profondeur du sol. Ces massifs occupent une grande place à l'intérieur d'un quadrilatère limité par Dinguiraye, Siguiri, Faranah et Kankan. Ils sont nécessaires à l'équilibre écologique de cette région soudanienne. Mais ils sont fortement menacés par l'expansion agricole qui suit l'éradication progressive de l'onchocercose et par l'intensité des incendies.

En Guinée Forestière, un diagnostic rapide réalisé en1986 par le département des eaux et forêts, a fait apparaître le mauvais état de la forêt et la faible superficie résiduelle des forêts denses qui a diminué d'environ un tiers depuis la fin des années 1970 suite aux défrichements agricoles principalement dans les zones de colonisation récente (migrations, réfugiés). Les principales raisons de ces défrichements sont la croissance démographique, la reprise des cultures de rente, et la considération insuffisante de l'administration et des populations pour la conservation des ressources forestières.

Les superficies boisées de la région, évaluées en 1988 sont estimées à 470.000 ha de forêts moyennes et 660.000 ha de forêts claires sans compter les massifs forestiers classés de Ziama et de Diécké, qui couvrent 170.000 ha dont seulement 81.000 ha de forêt dense.

En Guinée, il n'y a pas de carte de végétation suffisamment précise et disponible pour connaître l'état de l'occupation du sol, il y a 100 ans par exemple (Aussel, 2018). Certains textes (Monénembo 2008) proclament par exemple que le Fouta-Djalon était couvert de forêts au moment de la colonisation, quand aujourd'hui c'est un massif montagneux comportant de nombreuses jachères ou pâturages. Les galeries forestières présentes dans les régions de paysages ouverts peuvent néanmoins être un indice de la composition initiale de la forêt. La carte la plus pertinente pour estimer la couverture initiale de la végétation en Guinée est celle présentée en figure 4 ci-dessous.



Figure 4. Carte des écosystèmes terrestres potentiels de Guinée en fonction des conditions abiotiques (Sayre, et al. 2013).

Sites écologiques et éco-géographiques

Le rapport du ministère de l'environnement sur la politique nationale de l'environnement 2011-2012 a permis d'identifier les sites écologiques et éco-géographiques du pays (<u>https://www.undp.org/content/dam/guinea/docs/Ficheprojets/politique-nationale-de-l-environnement-2011-nov-2012.pdf</u>):

1- **Parc national du haut Niger** : il s'étend sur 1 247 000 ha et inclut la réserve de Biosphère du Haut Niger, une partie des sites RAMSAR Niger-Mafou et Niger-Niandan-Milo. Le parc porte le nom du fleuve Niger qui le traverse. Le parc est situé dans la zone de végétation soudano-guinéenne. Les savanes du parc sont caractérisées par un tapis herbacé où dominent les graminées.

2- **Parc national du Badiar** : la réserve spéciale de faune dénommée « parc national du Badiar », d'une étendue de 38 000ha, a été créée le 30 mai 1985. La réserve de Biosphère du Badiar a été créée en 2002. Elle couvre une superficie totale de 284 300 ha. Elle est constituée de trois aires centrales, à savoir : le parc national du Badiar (38 200 ha), la forêt classée de Badiar Sud (8 600 ha) et la forêt classée de Ndama (67 040 ha) couvrant une

superficie totale de 113 800 ha, de trois zones tampons (32 800 ha), et d'une aire de transition (137 700 ha).

3- La réserve de la biosphère de Ziama : la forêt de Ziama a été classée le 12 septembre 1942 (112 300 ha. La réserve de Biosphère a été classée le 17 février 1981. Sa superficie totale est de 116 700 ha, dont 42 547 ha désignés comme zone centrale (zone montagneuse) où l'extraction du bois et la chasse sont prohibées, 27 233 ha de zone tampon et 46 390 ha comme « aire de transition » ou zone à usages multiples comprenant une concession forestière de 30 000 ha.

4- **Forêt classée de Diéké** : la forêt classée de Diéké couvre une superficie de 64000 ha. Elle est située à une altitude étagée entre 400 et 595 m. Elle est composée de trois forêts humides de plaine à canopée fermée et de forêts pluviales denses sempervirentes. Les forêts denses primaires et secondaires représentent environ 70% de la superficie de la réserve, le reste étant constitué de forêt semi-dense et de jachères.

5- Réserve naturelle intégrale des Monts Nimba (12 540 ha Reserve de la biosphère sur 145 200 ha) : le massif du Mont Nimba, inscrit dans la dorsale guinéenne qui assure le prolongement du Fouta Djallon, marque les frontières entre le Libéria, la Guinée et la Côte d'Ivoire. Il dresse sa silhouette rectiligne au-dessus de la zone forestière à près de 1 300 mètres. La réserve fut désignée en 1980 réserve de Biosphère de l'UNESCO. D'une superficie de 145 200 ha, elle a été zonée en 1993 : la zone centrale de 21 780 ha inclut la forêt de Déré (8 920 ha) et les collines de Bossou (320 ha), à quoi il faut ajouter une zone tampon (35 140 ha) et une zone de transition (88 280 ha).

6- **Réserve de faune de Kankan- Folonigbè (531 448 ha) :** la réserve partielle de faune de Kankan (environ 530 000 ha) est située à l'Est de la Guinée, à la frontière de la Côte d'ivoire.

7- L'Aire protégée transfrontalière Bafing-Falémé : Guinée-Mali (1 777 333 ha en Guinée dont 132 868 ha de forêt classée). L'aire protégée transfrontalière Bafing Falémé (APT/BF) entre la Guinée et la République du Mali est intimement liée au Programme Régional d'Aménagement Intégré du Massif du Fouta Djallon (PRA/MFD) conduit de 1981 à 1986 et au Programme Régional d'Appui à la gestion Intégrée des Ressources naturelles (AGIR) de 2000 à 2005. Elle s'étend sur 2 660 000 ha dont les 2/3 sont en Guinée soit 1 777 333 ha et comprend 132 868 ha de forêts classées. Elle aurait été classée par arrêté, mais cela doit être confirmé par un décret 8- Réserve naturelle de Manden Woula- Warandogba (136 000 ha) : le Manden Woula-Warandogba est le domaine des collectivités décentralisées ; les confréries de chasseurs ont mis en place une aire de conservation communautaire au profit des communautés rurales de développement (CRD) de la Préfecture de Siguiri. La réserve est située dans le domaine des savanes soudaniennes avec comme principales espèces ligneuses Combretum glutinosum, Vène (Pterocarpus erinaceus), Néré (Parkia biglobosa) et Lohira alata.

9- L'Aire protégée transfrontalière des Rio Kogon, Korubal et Nunez : Guinée-Guinée Bissau (1 700 000 ha dont 800 000 ha en Guinée, 51 849 ha protégés). L'aire couvre une vaste superficie d'environ 1 700 000 ha en Guinée.

10- L'Aire Marine Protégée de Tristao : en cours de création, site Ramsar (85 000 ha) de l'archipel des Iles Tristao, situé dans le delta du fleuve Kogon, comprend deux îles principales, l'île Katrak (41 770 ha) et l'île kapken (23 000 ha) ; il comprend aussi l'îlot Fori souri (12,95ha), habité presque exclusivement par l'ethnie Ballanta et l'îlot Nyène Souri, non habité et spécifiquement réservé à la riziculture de mangrove. Chaque district compte, en son sein, plusieurs villages et campements. Le site a été classé site RAMSAR en 1992 (85 000 ha) et c'est une zone d'importance pour les oiseaux.

11- L'Aire marine protégée de l'île d'Alcatraz: le processus de création de l'AMP a démarré en Mai 2003 pour l'île d'Alcatraz, connue aussi sous le nom « d'île aux oiseaux » est située dans une mer de faible profondeur. Elle a été classée site Ramsar, en 1992 car elle abrite la plus importante colonie de Fous bruns (une espèce d'oiseaux marins de la famille des Sulidae, Sula leucogaster) d'Afrique de l'ouest (3000 couples).

12- Le Sanctuaire de faune des îles de Loos (ou île blanche) (site Ramsar, 10ha): le Sanctuaire comprend trois îles principales inhabitées : île blanche (8,75), îlot cabri (0,65) et île corail (3,75) ainsi que plusieurs autres petits îlots (îlot de la bouteille, île poulet, île Fousset).

I-1-2-2 Relief

Les données du relief mises en ligne par le site diakadi.com (7) montre que la Guinée a un relief très hétéroclite qui se répartit entre les quatre régions naturelles : la Guinée Maritime, la Haute Guinée, la Moyenne Guinée et la Guinée Forestière (Fig. 5).

La Guinée Maritime ou Basse Guinée s'étend sur 36.133km². C'est une plaine côtière (d'où son nom) large de 50 à 90 kilomètres ; elle s'étend en bordure de l'océan au pied de la falaise du Fouta Djallon. Cette région se caractérise par une côte basse, marécageuse et

verdoyante qui est découpée par les larges estuaires des rivières du sud qui inondent fréquemment les terres. Elle est jalonnée de belles îles et de nombreuses plages tapissées de sable fin, des estuaires envasés et des plaines littorales dominées par des falaises et par la chaîne montagneuse du Kakoulima avec son pic de 1007 m situé à 50 Km au Nord-Est de Conakry.

La Moyenne Guinée ou zone du Fouta Djallon s'étend sur 63.683km2 et couvre environ un tiers du pays. Le relief y est constitué d'une série de plateaux entre 500 et 1500 mètres d'altitude.

La moyenne Guinée est dominée par la chaîne montagneuse du Fouta Djallon dont l'altitude moyenne dépasse partout 700m. La chaine du Fouta djallon se divise en massifs compacts, dominant les plateaux, le tout entre-coupé de profondes vallées. Les sommets les plus élevés de cette chaîne sont : le mont Tinka qui domine sur les plateaux de Dalaba (1425 m) et mont Loura (1515 m) à Mali, point culminant du Fouta Djallon, dominant les falaises qui surplombent la vallée du fleuve Gambie.

Les massifs du Fouta Djallon se prolongent vers l'Ouest, en Basse Guinée et vers l'Est, en Haute Guinée. De nombreux cours d'eau y prennent leur source dont les fleuves internationaux comme le Niger, la Gambie, le Bafing-Sénégal ; ce qui lui a valu le nom de château d'eau de l'Afrique occidentale.

Le relief du Fouta conditionne avec les monts Nimba de la région Forestière, le système hydrographique de la Guinée. Au nord du Fouta, existent de basses plaines qui forment avec les vastes plaines de la Haute Guinée, un prolongement des plaines soudaniennes.

La Haute Guinée ou région de savanes s'étend sur 96.667 km2 et couvre également un tiers du territoire. C'est une immense savane marquée de légères ondulations et de plaines creusées par le fleuve Niger et ses nombreux affluents. On y trouve de hautes herbes de 2 à 4 mètres, des arbustes et des arbres. En Haute Guinée, les plaines sédimentaires (plaines des fleuves Niger, Milo, Fié, Banié-Tinkisso) bordent les cours d'eau et occupent de vastes superficies. Les plaines de la Haute Guinée, généralement alluvionnaires, sont drainées par le fleuve Niger et ses affluents.

La Guinée Forestière (49.374 km2) à l'extrémité sud-est de la Guinée, est une région de montagnes inhospitalières couvertes de forêts culminant à 1752 m au mont Nimba.

La Guinée Forestière est occupée par la dorsale Guinéenne qui prolonge vers le sud-est, le massif du Fouta Djallon. Les plaines situées à une altitude moyenne de 500 à 600 mètres sont extrêmement rares et situées au pied de massifs montagneux. En raison de son climat pluvieux presque toute l'année, la végétation y est luxuriante et la forêt dense.



Figure 5. Présentation du relief de la Guinée. La moyenne Guinée et la Guinée forestière sont des zones de montagnes.

I-1-2-3 Réseau hydrographique interne

Les chaînes de montagnes du Fouta Djallon et de la Dorsale Guinéenne constituent une véritable ligne de partage des eaux qui traversent le territoire guinéen du nord-ouest au sudest. Elles sont la source d'importants cours d'eau.

Du Fouta Djallon, considéré comme le château d'eau de l'Afrique occidentale, naissent le Cogon, la Tinguilinta, la Fatala, le Konkouré, la Melakoré qui se jettent en mer à partir des côtes Guinéennes. En direction du nord et vers le nord-est nous avons le Koliba (Corubal en Guinée Bissau), la Gambie et son principal affluent, la Koulountou vers le Sénégal ; le Bafing et le Bakoy vers le Mali qui forment le fleuve Sénégal. Vers l'Est nous avons le Tinkisso qui est le principal affluent de la rive gauche du fleuve Niger. Vers la Sierra Leone, au Sud nous avons la Kaba et la Kolenté. De la dorsale guinéenne, naissent et coulent en direction du Nord-est le Niger et ses principaux affluents de la rive droite (Mafou, Niandan, Milo et Sankarani) et en direction du Sud, les fleuves de la Guinée Forestière (Makona, Lofa, Diani, Mani et Cavally).

I-1-2-4 Sols

En général, les sols sont pauvres en éléments fertilisants sur les hauts plateaux du Fouta et en Haute Guinée. En Basse Guinée, le long du littoral, dans les vallées au Fouta, le long des fleuves en Haute Guinée et en Guinée forestière, les sols noirs ont une bonne structure et sont fertiles.

D'après la carte des sols de la Guinée éditée par la F.A.O. (1984) on peut distinguer huit types de sols : les lithosols qui couvrent l'intérieur de la Basse Guinée, tout le Fouta et toute la partie Nord de la Haute Guinée, viennent ensuite les acrisols au centre et à l'Est du pays. Les sols ferralitiques couvrent une partie de la Basse Guinée et la zone frontalière de la Sierra Leone et du Liberia. Les autres types de sols, de moindre importance, sont les fluvisols le long des côtes et la vallée du Niger ; les cambiosols, les nitosols et les planosols.

I-1-3 Contexte climatique

La circulation atmosphérique en Guinée à l'instar de tout l'Ouest Africain est dominée par l'oscillation interannuelle de la dépression équatoriale. Celle-ci est liée d'une part au contraste thermique entre la masse continentale et le vaste domaine maritime et d'autre part, à la variation des pressions entre les anticyclones subtropicaux boréals (Açores et Libye) et austral (Sainte-Hélène). La Zone de Convergence intertropicale (Z.C.I.T) appelée encore Front intertropical (F.I.T) au centre de cette dépression, sépare les flux des alizés nord et sud en provenance de ces anticyclones (Hisard, 1980).

La dépression équatoriale atteint sa position la plus au sud en Janvier-Février. A ce moment le FIT occupe la position 5° Nord en moyenne. Les pluies pendant cette période sont rares et les alizés du nord-est appelés harmattan (Vent chaud et sec soufflant du continent vers l'océan), balaient tout le pays. C'est la saison sèche pour l'ensemble du territoire Guinéen.

En été boréal, la dépression tropicale atteint la position 20° Nord, en moyenne aux mois de Juillet-Août. On observe une importante pénétration des alizés riches en vapeur d'eau en provenance de l'océan Atlantique sud. Ce flux d'alizé de direction sud-est au départ, prend la direction sud-ouest en traversant l'équateur. En traversant le continent relativement chaud et accidenté, des perturbations génératrices d'importants amas nuageux se forment et se déplacent

d'Est en Ouest. De ces nuages tombent d'importantes quantités de précipitations, le plus souvent, sous forme de pluie. C'est la saison des plues pour toute l'Afrique de l'Ouest. Elle dure en Guinée de Février à Novembre. Ce phénomène de pénétration de flux des alizés fortement humidifiés en provenance de l'hémisphère sud est qualifié de mousson par analogie avec la mousson indienne.

La migration interannuelle au-dessus du continent de la dépression équatoriale est à l'origine de l'alternance des saisons. Ainsi Chaque fois qu'une localité se retrouvera au Nord ou au Sud de cette dépression, celle-ci sera en période sèche ou pluvieuse respectivement.

Le climat Guinéen est du type tropical soudanien marqué par l'alternance de 2 saisons : une saison sèche qui débute aux mois de Novembre au nord et Décembre au sud du territoire. Et une saison pluvieuse qui débute aux mois de Février au Sud et Juin au Nord du pays.

En Guinée, les 2 chaînes de montagnes du Fouta Djallon et de la Dorsale Guinéenne constituent une véritable barrière au flux de mousson qui souffle suivant les directions Ouest et Sud-ouest. Ce flux d'air fortement humidifié aborde perpendiculairement les chaînes de montagnes. Les conséquences sont une ascension de l'air humide du côté au vent et une descendance de l'air appauvri en vapeur d'eau du côté opposé. Ce phénomène, connu sous le nom d'effet de foehn (*phénomène météorologique créé par la rencontre de la circulation atmosphérique et du relief quand un vent dominant rencontre une chaîne montagneuse*), explique les précipitations exceptionnellement élevées, du côté au vent et Basse Guinée et dans la zone de Macenta. Du côté opposé, sous le vent (Nord du Fouta et Haute Guinée), c'est la subsidence avec une diminution significative de la pluviosité.

Dans les régions de la Haute Guinée et de la Moyenne Guinée tout comme dans les régions sahéliennes, hors mis les mois de Juillet et Août, la quantité de pluie enregistrée provient pour la plupart des perturbations migratoires de type ligne de grains.

I-1-4 Aspect socio-économique

Malgré ses importantes ressources potentielles, l'économie de la Guinée est restée très fragile et dépendante de la bauxite et de l'agriculture.

La Guinée est un pays d'environ 12,9 millions d'habitants en 2016 (OMS) qui possède les plus grandes réserves mondiales de bauxite (25 milliards de tonnes exploitables) et les plus grandes réserves inexploitées de minerai de fer à haute teneur (gisement de fer de Simandou, dans le mont Nimba, considéré comme un des plus grands au monde avec une réserve estimée *à 2,5 milliards de tonnes et une teneur en fer de 65 %.*), ainsi que de l'or et des diamants [(8) <u>https://p.dw.com/p/3Ptsa</u>]. En outre, la Guinée a un sol fertile, de fortes précipitations. Le potentiel hydroélectrique de la Guinée est énorme et le pays pourrait être un grand exportateur d'électricité. Le pays a également un énorme potentiel agricole. L'or, la bauxite et les diamants sont les principales exportations de la Guinée.

La majeure partie de la population étant paysanne, la mise à feu de la végétation est une pratique ancestrale très familière en agriculture. Mais, au-delà de certaines normes, l'aspect utilitaire des feux est supplanté par des conséquences dommageables à l'environnement. Un des impacts des feux incontrôlés est la perte de ressources végétales réduisant sa disponibilité pour les besoins humains et l'équilibre écosystémique. Face au risque d'incendie de plus en plus élevé dû aux dérèglements climatiques et à la pression anthropique sur les écosystèmes forestiers, il devient urgent de mieux comprendre l'impact des feux sur la biomasse végétale.

1-1-5 Limites des travaux sur les feux de brousse en Guinée.

En Guinée, malgré l'existence et la disponibilité des produits de l'imagerie satellitaire, la plupart des travaux des agents forestiers sur les feux de brousse se limitent généralement aux simples constats sporadiques et n'ont jamais fait l'objet d'une investigation scientifique approfondie. L'impact négatif de ces feux sur les écosystèmes guinéens reste problématique.

Les précédentes études faisant usage d'imagerie satellitaire, menées par le BCTT (Bureau de Cartographie Thématique et de Télédétection) (1995) ainsi que les travaux de R. Kane (1998) ont permis de lancer des campagnes de sensibilisations via les radios communautaires.

En effet rien que pour le Nord-Est de la Guinée qui couvrent les 11 Préfectures les plus sensibles (Siguiri, Dinguiraye, Mandiana, Kouroussa, Dabola, Kankan, Faranah, Kérouané, Kissidougou, Guéckedou et Beyla), le rapport d'octobre 1995 du BCTT, volet suivi des feux de brousse, de la Direction Nationale des Forêts et Faune (DNFF), note que de novembre à mai une moyenne de **3 094 400** ha de savane a été brûlée.

D'autres études faisant usage de la télédétection se succèdent comme celle du projet de Gestion des ressources en Eau et de l'environnement du bassin du fleuve Sénégal (GEF/BFS) en 2004; les travaux du CSE (Centre de Suivi Ecologique) du Sénégal depuis 2005, le long du fleuve Sénégal, du côté nord-est de la Guinée ayant fait l'objet d'usage des images NOAA-AVHRR et MODIS).

En 2009, dans le cadre des travaux du DEA, nous avons pu utiliser les images MODIS pour montrer la dynamique saisonnière des feux. Cette étude avait pour perspective, d'estimer les surfaces brûlées sur une échelle de temps appréciable. Dans le rapport synthèse sur le suivi des feux de brousse en Afrique occidentale paru dans son bulletin N°14, le Centre régional AGRHYMET par son projet MESA montre que la Guinée, pour la saison 2013-2014, a comptabilisé 18000 à 19000 cas de feu entre janvier février¹. Ces études ont fourni des informations importantes sur la menace des écosystèmes ainsi que les problèmes liés aux campagnes de sensibilisation dans le cadre de la lutte contre les feux de brousse.

Dans le cadre de l'estimation des surfaces brûlées, Barry et al., (2015) sont parvenu à estimer les surfaces brûlées en Guinée en utilisant les images MODIS. Cette étude s'est effectuée sur une très courte période (2009-2010) et donc très limitée en termes de conclusions générales sur l'occurrence des feux en Guinée. Dans le cadre de cette thèse, nous abordons une analyse plus approfondie de la variabilité spatio-temporelle des feux de brousse en Guinée sur une période de quatorze (14) ans pour fournir beaucoup plus d'information sur l'occurrence des feux sur une échelle pluriannuelle en croisant d'autres données à celles de MODIS.

Dans le sous chapitre état de l'art qui suit, nous rappelons quelques travaux déjà effectués sur la surveillance des feux par imagerie satellitaire et l'analyse de leurs caractéristiques par les modèles. Ce qui nous permettra de comprendre l'enjeu des questions liées aux feux de brousse en Guinée.

I-2 ETAT DE L'ART

I-2-1 Observation et suivi des feux de brousse par imagerie satellitaire

Il est connu que le recours au feu comme outil et son corollaire, le risque d'incendie incontrôlé, soient très anciens. Allumés pour la chasse il y a déjà 100 000 ans (Ramade., 1978), puis ultérieurement pour l'extension des aires d'élevage, les feux de brousse africains remontent comme l'admet Schnell (1952), au moins au début du néolithique, il y a quelques 6 000 ans. Le feu a également été couramment utilisé au cours des guerres et permettait de retarder l'avancé de l'ennemi ou protéger le repli des combattants ou la fuite des vaincus.

Dans le contexte des changements climatiques, on observe au niveau du fonctionnement des écosystèmes du monde, une rupture des équilibres environnementaux (GIEC., 2007, M.

¹ http://www.agrhymet.ne/PDF/BMesa/bulletin_MESA_feux_2013_2014.pdf
SOW., 2011). A cet égard, on note divers évènements (inondations, cyclones, feux de brousse, etc.) notamment en zones arides et semi-arides caractérisées par une grande fragilité écologique qui entraine une modification des habitats naturels et des pertes de la diversité biologique.

De nombreuses régions intertropicales africaines subissent des transformations radicales de plus en plus rapides de leur paysage (FAO, 2006). Ces changements sont principalement dus aux systèmes agricoles inadaptés, à l'exploitation anarchique des ressources naturelles et à la forte pression démographique et secondairement, au désir d'industrialisation des pays entraînant une augmentation des surfaces anthropisées et une réduction des paysages naturels (Wright, 2005 ; FAO, 2006). Avec les changements climatiques, on peut donc s'attendre à une augmentation de la fréquence et de l'ampleur des feux de brousse surtout dans les savanes africaines.

Les savanes présentent souvent une structure spatiale très hétérogène, résultante de la répartition spatiale des arbres (densité) et des caractéristiques du sol (capacité de rétention en eau et richesse en matière organique). Cela a des conséquences sur l'intensité des facteurs environnementaux qui présentent également une grande variabilité spatiale.

Des avancées récentes de la télédétection à travers les satellites aéroportés ont permis d'avoir des informations plus claires sur les feux à l'échelle du monde. Des estimations sur la période 1960-2000 montrent que les superficies brûlées dans le monde varient entre 273 et 567 millions d'hectares, avec une moyenne de 383 millions d'hectares (Schultz et al., 2008). Ces résultats ont été confortés par des travaux de van der Werf et al. (2006) et Tansey et al. (2008) pour qui les superficies annuellement brûlées varient entre 300 et 450 millions d'hectares. Mouillot et Field (2005) estiment une réduction globale des superficies annuellement brûlées (de 535 à 500 millions d'hectares) à la fin du 20^{ième} siècle. Cette réduction est attribuée aux facteurs humains tels que la lutte contre les feux, l'efficacité des méthodes de lutte, les politiques d'interdiction de feu, etc. Cependant, cette tendance baissière s'est renversée durant la seconde partie de la dernière décennie, avec une augmentation des superficies brûlées de l'ordre de 608 millions d'hectares par an (Marlon et al., 2008). Ce changement notable des superficies brûlées n'est pas uniforme à travers les différentes régions du globe.

En effet, les régimes régionaux de feu ont montré de grandes différences dans l'amplitude de leurs changements. Mouillot et Field (2005) et Marlon et al. (2008) attribuent une bonne partie de ces changements aux facteurs anthropiques. Les feux de savane continuent d'augmenter (Flannigan et al., 2009). Les savanes sont les formations végétales les plus fréquemment brulées au monde (Hoffmann et al., 2002).

Globalement 80 à 85% des superficies brûlées dans le monde se produisent dans les savanes principalement en Afrique et en Australie, mais aussi en Asie du sud et en Amérique du sud, alors que le reste des feux se produit dans les régions forestières du monde (Mouillot and Field, 2005 ; van der Werf et al., 2006). En Afrique, 2,9 Gt (Giga tonne) de biomasse sont consumées chaque année. Parmi les différents types de feu, les feux de savane (d'origine naturelle ou anthropique) dominent largement avec 2,5 Gt de biomasse consumées par année (Delmas et al., 1991 ; Dwyer et al., 2000).

Nous rappelons sur la figure 6 ci-dessous, les origines des feux les plus connues de manière générale en Afrique et en Guinée.



Figure 6. Les origines des feux de brousse les plus connues en Guinée.

En d'autre terme, le rôle néfaste du feu dans la dynamique des écosystèmes constitue un réel problème. Compte-tenu de la grande hétérogénéité de structure et de fonctionnement des savanes, ce problème doit être traité à l'échelle des écosystèmes en faisant recours à la télédétection. La télédétection regroupe l'ensemble des techniques capables de fournir à distance les informations relatives à un objet en utilisant l'étude de l'émission et de la réflexion des rayonnements électromagnétiques de l'ensemble du spectre par leur vision synoptique répétitive et leur forme numérique.

I-2-1-1 Bases théoriques de la télédétection des feux de brousse.

La base physique de la détection de feux actifs a fait l'objet d'une synthèse par Robinson (1991) ; MBOW (1997) ; Crackenell (1997) ; Garcia et al. (1997), Giglio et al. (1999) ...Il est cependant important de rappeler quelques notions sur l'utilisation de la télédétection pour l'étude des feux. D'après Kennedy et al. (1994), la température d'un corps au-dessus de zéro absolue détermine les valeurs d'énergie électromagnétique émise par une longueur d'onde particulière. Ce principe est tiré de la loi de Planck-Lambert :

$$M_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{ch}{\lambda kT}} - 1)}$$
(1) où.... M (W.m⁻²) est l'émittance de la

radiation considérée ; c(m/s) est la constante d'Einstein (2,99792458 $.10^8$ m/s) ; h, constante de Planck (6,62606876 $.10^{-34}$ J-s) ; λ (m) est la longueur d'onde de la radiation, T est la température absolue (Kelvin) du corps et k est la constante de Boltzmann (1,3806 $.10^{-23}$ J/K),

Autrement dit, tout objet ayant une température au-dessus du zéro absolu émet une radiation électromagnétique. L'émissivité est un coefficient caractéristique d'un objet ou un corps qu'il est important de connaître ou d'évaluer pour pouvoir mesurer la température réelle de la surface. Elle décrit un « corps gris » par comparaison à un corps noir, c'est à dire qu'elle est le rapport entre l'énergie émise par le corps observé et celle qu'émettrait le corps noir dans les mêmes conditions. Celui-ci est un corps théorique qui met en évidence la relation entre la longueur d'onde incidente qu'il absorbe totalement et l'énergie maximale qu'il émet à chaque température et pour chaque longueur d'onde. La loi de Planck décrit la distribution de l'émittance ou réflectance- (M) du corps noir en fonction de la température absolue. Dans l'infrarouge thermique, l'équation de Stefan Boltzmann donne la relation entre la température et le flux d'énergie total (de l'ensemble du rayonnement) émis par le corps noir, elle est obtenue par l'intégration de la loi de Planck sur toutes les longueurs d'onde.

$$Mcn = \sigma T^4$$
 (2)

où *Mcn* est l'émittance du corps noir (W.m-2), T est la température absolue (K) et σ est la constante de Stephan-Boltzmann et vaut 5,67.10⁻⁸ W.m⁻².K⁻⁴.

La détection des feux se base donc sur deux lois physiques fondamentales, la loi de Stéphan Boltzmann et celle de Wien. Il a été constaté à partir de ces lois que plus la température d'un corps s'élève, plus l'énergie en radiation augmente : loi de Boltzmann M= σ T⁴ où M est la quantité d'énergie émise par unité de temps ; T, la température absolue du corps en K, et σ , la constante de Boltzmann) et plus les longueurs d'onde maximales de l'émission sont courtes, loi de Wien : $\lambda max = \frac{\rho}{T}$ (3) où ρ =2898µmK.

Le rayonnement infrarouge dégagé par les feux actifs (800K) est utilisé pour les identifier. Considérant la température diurne moyenne de la terre qui est autour de 300K (Langaas,1993 ; Kennedy,1994), le plus grand flux de radiation émise se situe entre 9,7 μ m et 11 μ m. Cependant, en considérant la loi de Wien, une source chaude qui émet une radiation à des températures comprises entre 800 et1000K (cas des feux de brousse) aura son maximum d'émission dans le domaine spectral entre 2,9 et 3,6 μ m.

L'identification des feux actifs et des traces de feux a fait donc l'objet d'élaboration de plusieurs modèles (modèles de DOZIER, 1981 ; KAUFMAN et al., 1988-1994 ; MBOW,1997) basés sur des algorithmes utilisant des seuils de température, pour faire une discrimination entre les températures pouvant être considérées comme feu et celles comme non feu. C'est le cas l'algorithme contextuel (Gigolo et al. 2003) utilisé par l'Université de Maryland. L'algorithme explore la forte émission de la radiation infrarouge qui émane des feux, examine chaque pixel de MODIS et attribue une étiquette à chacune des six classes suivantes: données manquantes, nuages, eau, non feu, feu, inconnu (Mbow, 2004).

Ces données traduites sous formes de couches cartographiques sont accessibles gratuitement sur le site de la NASA (http//:maps.geog.umd.edu/.) Cependant, notons que les résolutions spatiale et temporelle de ces données comportent des biais. Les feux qui se déclarent avant ou après le passage des satellites ne sont pas enregistrés. Mais par contre, les feux peuvent être sous-estimés ou surestimer par MODIS en fonction de leur position, de leur taille (Fig. 7) et des conditions de détection. Toutes fois, les statistiques fournis par MODIS sont assez importantes pour la compréhension de la distribution des feux à grande échelle.



Figure 7. Principes et limites de détection des feux actifs par MODIS (sources : FIRMS_web).

La figure 4 montre le principe de comptage des points de feux actifs, le nombre de foyer est soit minimisé, soit maximisé en fonction de la position du point dans le pixel du capteur. Une fois extraits, ces points de feu actif sont classés sur une échelle de fiabilité ou intervalle de confiance de 1 à 100. A l'inverse de la détection des points chauds (pour la détection des feux actifs), le produit « surfaces brûlées (MCD45, MCD64) » n'est pas dépendant de l'heure de passage du satellite et est moins sensible aux nuages ou aux fumées, car les marques de la combustion sont plus persistantes que les feux qui les causent. Les surfaces brûlées sont un moyen de suivre la période, la localisation et l'étendue des feux, mais elles ne sont pas forcément proportionnelles au nombre de feux.

L'identification des traces de feu est relativement complexe et se base sur la réflectance, la température de surface et les brusques modifications dans la couverture végétale de la zone brûlée (indices de végétation). Généralement après les feux, la trace sombre donne un albédo très bas qu'on peut facilement identifier sur une image, pourvu que la résolution spatiale soit bonne. Seulement toutes les tâches sombres ne sont pas les feux, il convient de voir si la surface considérée a été touchée auparavant par un feu.

Les approches récentes utilisent les changements brusques dans les valeurs de NDVI (ou d'un autre indice de végétation) pour déterminer les limites des feux (Roy et al., 2005, 2008 ; Boschetti et al., 2013). Partant de l'intensité de l'activité photosynthétique, le NDVI peut rendre compte des différences entre la situation avant et la situation après les feux.

Les mesures radiométriques de terrain sont également utilisées n'ont pas pour un suivi systématique des feux, mais pour améliorer la compréhension des caractéristiques spectrales des traces de feu. Cette méthode est destinée à faciliter la cartographie des traces de feux par capteurs embarqués à bord des satellites (Sharman, 1987 ; Yergeau, 1983).

I-2-1-2 Systèmes de capteurs utilisés

Depuis les années 70, la compréhension des relations qui gouvernent les phénomènes environnementaux, à petite échelle, a été enrichie grâce aux mesures répétées des différentes ondes émises et réfléchies depuis la surface terrestre par les nombreux satellites qui gravitent autour de la Terre (Prihodko et Goward, 1997). Les satellites se sont succédés et les nouveaux capteurs embarqués atteignent toujours de meilleures résolutions spectrale et spatiale permettant l'amélioration de la discrimination entre les différents objets observés. Des analyses temporelles de l'évolution des surfaces terrestres aux échelles globale comme régionale sur plusieurs années sont désormais permises.

La détection des feux par les satellites répond à un certain nombre de caractéristiques variables liés aux capteurs et à la réponse physique des feux. Les mesures à partir des bandes de l'infrarouge ont commencé en 1978 quand le *Heat Capacity Mapping Mission* (HCMM) a été lancé pour observer l'inertie thermique des composants de la surface de la terre. Son radiomètre HCM est désigné avec une résolution au sol de 600m et une bande dans le canal thermique ; le satellite est placé en orbite polaire à 620Km d'altitude. Sa répétitivité est de 12 heures et permet de suivre et de localiser des températures élevées.

Administré à l'origine par la NASA (*National Aeronautic and Space Administration*), le programme Américain de télédétection spatiale LANDSAT (*Land Satellite*) est exploité depuis 1978 par EOSAT (*Earth Observation Satellite Company*). Ce programme a débuté sous le nom d'ERTS (*Earth Ressources Technology Satellite*) en 1972 avec un lancement à une altitude de 900Km du premier satellite de la série LANDSAT 1, celui-ci avait à bord un système de balayage multi bandes MSS (*Multi Spectral Scanner*), comportant quatre bandes spectrales dans le visible et le proche infrarouge avec une empreinte/fauchée au sol de 80 m.

En 1975, LANDSAT2 est lancé et est identique à LANDSAT1 ; la date de lancement a été choisie de sorte que les deux satellites soient déphasés de 9 jours. Ceci a doublé la résolution

temporelle des images avec les mêmes caractéristiques. En 1978, LANDSAT3 fut lancé et diffère de ses prédécesseurs par l'addition dans le balayeur MSS, d'une bande sensible à l'infrarouge thermique (avec une empreinte de 240m) et par une résolution spatiale améliorée des caméras (environ 40m) lesquelles ne comportent plus qu'une bande spectrale panchromatique. LANDSAT4 (Juillet 1982), LANDSAT5 (Mars 1985) présentant respectivement des caractéristiques plus ou moins améliorées (empreinte élémentaire « pixel » de 30m) furent lancés.

Les coûts élevés, l'intervalle d'observation de 9 jours et la probabilité que même les petits feux puissent saturer les 30m de résolution d'un pixel sont autant de facteurs qui font que les données de LANDSAT en temps réel ne sont pas appropriées pour le suivi des feux.

Le satellite SPOT initié depuis 1977 n'a été opérationnel qu'à partir de 1986 avec le lancement de SPOT1 équipé de senseurs HVR (Haute résolution dans le visible) qui peuvent opérer en deux modes : Panchromatique ($0,5\mu$ m à $0,73\mu$ m) pour une résolution spatiale de 10m et multi spectrale(XS) à résolution spatiale de 20m et comportant trois bandes spectrales : Bande1 (0,5 à $0,59\mu$ m vert) Bande2 (0,61 à $0,68\mu$ m rouge, absorption de la chlorophylle) et Bande3 (0,79 à $0,89\mu$ m, proche infrarouge). Ces caractéristiques permettent une observation détaillée des surfaces brûlées grâce à la bonne résolution spatiale et spectrale. L'inconvénient de SPOT est lié à son coût.

La succession de la série des satellites de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) dont le capteur AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) a permis l'observation de l'évolution de la croissance de la végétation globale (Myneni et al., 1997) et régionale (Zhou et al., 2001). Le premier satellite de la série des satellites de NOAA ayant été lancé en 1979, les températures de surface sont acquises par les capteurs AVHRR sur plus de vingt années. Cette accumulation de données permet l'étude de l'évolution climatique passée des deux dernières décennies telle que celle des tendances de réchauffement dans l'Arctique (Comiso, 2003).

Les orbites des satellites NOAA ont été choisies pour éviter que la lumière du soleil arrive directement sur les instruments (Jin et Treadon, 2003), le nombre d'orbites par jour n'est pas un entier (14.1) induisant une trace sous-orbitale qui ne se répète pas sur une base quotidienne bien que l'heure (non avancée) du passage du satellite soit essentiellement inchangée. Cependant au cours des années les satellites NOAA voient leur orbite dériver (Price, 1991) progressivement induisant jusqu'à 4h de décalage et entraîne une variation importante des LST en particulier dans l'après-midi (Traoré et al.,1997) et qui se traduit par un refroidissement significatif dans les mesures de LST (*Land Surface Temperature*); (Gleason et al., 2002; Jin et Treadon, 2003).

En revanche, bien que les satellites Terra et Aqua soient seulement en activité depuis 2000 et 2002, respectivement, leurs mesures ne souffrent pas de cette dérive orbitale. Le satellite européen ENVISAT, qui a aussi été lancé en 2002, porte à son bord, en plus de 9 capteurs, le capteur AATSR (*Advanced Along Track Scanning Radiometer*) succédant ainsi aux deux précédents capteurs ATSR1 et ATSR2 embarqués respectivement sur ERS1 et ERS2. Ces capteurs ont aussi pour mission de récupérer les LST. L'ensemble des LST récupérés par ces capteurs remonte jusqu'à 15 ans. AATSR a aussi l'avantage de regarder une surface au sol selon deux angles différents, soit au nadir et à 55°. Grâce à ce double angle de prise de vue, il est possible de réaliser des corrections très précises des effets de l'atmosphère sur la propagation des émissions terrestres.

La résolution spatiale de 1 km de ces trois capteurs AVHRR, MODIS et AATSR permet de couvrir des portions très larges de la terre avec une bonne précision. La fréquence de passage au-dessus du même point pour les satellites qui les supportent est de 35j pour AATSR, quotidienne pour AVHRR, et biquotidienne pour MODIS. Ce dernier, puisqu'il est embarqué sur deux satellites, Aqua et Terra, permet d'obtenir des données jusqu'à quatre fois par jour, leur combinaison permet alors d'avoir une LST moyenne quotidienne plus proche de la réalité du terrain. Les heures de passage localement de ces deux satellites sont fournies dans le produit téléchargé.

La télédétection par satellite a ouvert beaucoup de portes à la cartographie et à la surveillance du feu à des échelles importantes. Les outils de télédétection sont capables de caractériser l'ampleur et le régime des feux selon le domaine écologique affecté (Parnot., 1987-1988) ; Grégoire et al., 1988 ; Malingreau, et al., 1990).

Le satellite géostationnaire Météosat Seconde Génération (MSG) lancé en 2005, y compris le radiomètre imageur principal SEVIRI avec les douze canaux spectraux, fourni des images du disque complet de la terre d'une période de répétition de 15 minutes. Ce satellite est utilisé principalement pour le suivi du climat. Belabbes et al., 2009, ont exploité le taux élevé de mise à jour du MSG pour développer un algorithme de détection des feux actifs. La méthode est basée sur la sensibilité des canaux de SEVIRI désignés pour la détection des incendies, en

appliquant des tests de seuillage pour les canaux infrarouges IR3.9 et IR10.8 plus une classification des régions non feu afin d'éviter les fausses alarmes.

L'algorithme développé est capable de détecter les feux actifs et a abouti à des résultats discutables avec une certaine précision et un minimum de fausse alarme (Belabbes et al., 2009). Les satellites MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) ont été conçus pour améliorer la surveillance de la terre, des océans et de l'atmosphère pour la recherche. Les satellites Terra et Aqua ont été lancés respectivement en 1999 et 2002. La conception de la composante terre combine certaines caractéristiques de NOAA-AVHRR et de LANDSAT Thematic Mapper, en ajoutant des bandes spectrales dans le moyen et lointain infrarouges (IR) et fournissant une résolution spatiale de 250 m, 500 m et 1 km. Les deux composantes réunies acquièrent des données dans 36 bandes spectrales dont certaines sont idéales pour la détection des incendies (Kaufman et al., 1998). Un grand nombre de produits issus des données MODIS sont disponibles gratuitement sur internet. La plupart des données sont prétraitées et disponibles directement téléchargement sur le Data Pool de LPDAAC par à [(9)<u>https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/get_data/data_pool</u>].

En résumé, nous retenons que les techniques d'observation spatiale (Télédétection passive) sont vraisemblablement à même de répondre au problème de suivi et de la cartographie des feux de brousse. Les données MODIS avec une haute résolution temporelle (2 données par jours) et une moyenne résolution spatiale (500 à 1000 m²) sont utiles pour l'analyse de la distribution des feux en Guinée et seront utilisées dans ce présent travail. Par contre ces données satellitaires ne fournissent aucunes informations précises sur la propagation des feux. Cet aspect fera donc l'objet de recours aux modèles pour simuler les caractéristiques du feu en fonction d'un certains nombres de paramètres liés au départ et à la propagation des incendies.

I-2-2 Modélisation de la propagation des feux de végétation

Le recours aux modèles permet de simuler la propagation du feu et comprendre ses caractéristiques en fonction des paramètres biophysiques, climatiques et topographiques. Les paramètres qui interviennent dans la propagation du feu sont le type de végétation, la distribution de ce combustible végétal, son humidité, la température ambiante, la pente du terrain et la vitesse et la direction du vent (Jonathan et al., 2003). La connaissance de ces paramètres reste approchée et conditionne la qualité de la prédiction de tout code de propagation du feu.

La modélisation des incendies a fait appel à plusieurs approches (Sullivan, 2009 ; Pastor et al., 2003 ; Mohamed et al., 2013). Suivant la classification proposée par Perry (1998), trois types de modèles peuvent être définis à savoir : *empirique, semi-physique et physique*.

Un modèle empirique est un modèle simple qui ne prend pas en compte les mécanismes physiques du phénomène étudié. Il est donc déterminé à partir de données expérimentales et de calculs statistiques (McArthur, 1966).

Un modèle semi-empirique est basé sur le principe de conservation de l'énergie mais ne fait pas la distinction entre les différents modes de transfert de la chaleur (Rothermel, 1972).

Un modèle physique, prend en compte les différents modes de transfert de la chaleur (Albini, 1986 ; Basiliu, 2016). Parmi les modèles physiques l'approche dite « multiphasique » fournit les modèles les plus complets développés jusqu'à présent (Morvan et al., 2009 ; Mell et al., 2007 ; Porterie et al., 2007 ;Larini et al., 1998 ; Grishin, 1997).

Nous décrivons brièvement quelques modèles avant de préciser les raisons de choix du simulateur FARSITE conçu à base du modèle semi-empirique pour notre étude.

I-2-2-1 Les modèles statistiques

Ce sont des automates cellulaires sur la base d'algorithmes temporels récursifs sous forme de règles logiques simples appliquées à des grandeurs, dites variables d'état, qui ne peuvent prendre que des valeurs discrètes. Ces règles logiques simples forment la fonction dites de transition.

Les automates cellulaires ont été inventés par J. Von Neumann en 1957. Celui-ci se proposait, d'étudier si les lois d'évolution dans la nature peuvent provenir des règles logiques simples. La première utilisation des automates cellulaires pour modéliser la propagation des feux de forêt est due à Kourtz en 1971. Ce type de modèle est parfois nommé modèle de contagion. Il a l'intérêt d'être bidimensionnel, de nécessiter un faible temps de calcul et de pouvoir modéliser la propagation du feu dans une forêt hétérogène et peu dense (Fig. 8). L'existence d'une densité d'occupation de la forêt critique en dessous de laquelle le feu ne peut pas se propager est alors mise en évidence. Cette densité critique est un indice très important de risque pour la forêt. La forêt apparaît alors comme un milieu percolant.



Figure 8. Exemple de simulation avec un modèle probabiliste (Brunelle et al., 2007). La végétation en cours de préchauffage en vert, en rouge le feu et en noir, fin de combustion.

Cependant, ces études d'automates dits de *feux de forêts* ne font pas le lien entre les règles logiques simples et les mécanismes physiques fondamentaux de la propagation du feu. Les valeurs des coefficients qui interviennent dans la règle logique simple de l'automate ne peuvent qu'être calées pour une forêt particulière par des campagnes de mesures. La prédiction est bonne de manière qualitative mais la quantification de la propagation est difficile.

I-2-2-2 Les modèles semi-empiriques

Les modèles de type semi-empirique utilisent des outils théoriques ainsi que des résultats expérimentaux pour trouver la vitesse de propagation du front de feux (Rothermel, 1972). Un exemple de ces modèles est celui de Rothermel (Fig. 9).



Figure 9. Évolution du front de feu du modèle de Rothermel 1973 (Ali, K., Ali, S., 2012)

Ces modèles ont été obtenus en utilisant un bilan thermique stationnaire global afin de trouver la vitesse de propagation d'un front de feu dans une forêt. Ces modèles se basent sur la loi de la conservation de l'énergie et sur des mesures prises en laboratoire. Les coefficients de ce modèle sont calés par des campagnes d'expériences pour chaque type de forêt particulière. L'avantage d'un tel modèle est qu'il est quantitatif par nature. Le calcul de la vitesse est en plus très rapide, car, cette vitesse est donnée par une relation algébrique qui peut se programmer à l'aide d'un ordinateur. L'inconvénient est que ces modèles sont basés sur des expériences en laboratoire. Ainsi, ils deviennent moins réalistes lorsqu'on est en présence d'un feu de grande intensité, car un tel feu ne peut pas être reproduit en laboratoire.

I-2-2-3 Les modèles théoriques ou physiques

Ils utilisent des lois de bilan. Ces lois sont des équations aux dérivées partielles qui tiennent compte des mécanismes physiques tels que la convection et le rayonnement thermique. Les modèles développés correspondent à un bilan d'énergie de la phase végétale pour un front de feu rectiligne qui se propage à vitesse constante dans une forêt uniforme. L'avantage de tels modèles est qu'ils distinguent des mécanismes physiques élémentaires, ils sont quantitatifs, leurs domaines de validité peuvent être déterminés selon les hypothèses qui sont faites pour l'obtenir et ils sont adaptables à plusieurs types de forêts. L'inconvénient est que la complexité de ceux-ci conduit à ne traiter et à ne tenir compte que d'une partie seulement des mécanismes physiques qui interviennent dans la propagation des feux. C'est essentiellement le transfert de chaleur en avant du front du feu qui est étudié. Comme exemple de ces modèles, nous pouvons citer :



a) Le modèle théorique de propagation de feu (Figure 10).

Figure 10. Modèle théorique de propagation du feu (Dupuy, 1997).

Le temps de résolution numérique de tels modèles est long par rapport aux modèles statistiques et semi empiriques. De plus, la restriction à la propagation d'un front du feu rectiligne n'est pas représentative de la propagation d'un feu réel. C'est une limitation importante de ces modèles physiques, car il n'est pas certain qu'un front rectiligne est stable. Ces modèles ne sont donc pas complets, car ils nécessitent des données d'expériences comme la hauteur des flammes et que les aspects de combustion chimique dans la zone en feu ne sont pas pris en compte. Ils ne peuvent donc pas être utilisés par les pompiers pour prédire la propagation du feu.

b) Le modèle hybride de propagation.

C'est un modèle dit théorique, il n'est pas basé sur des observations de feux ou de simulations en laboratoire, mais plutôt sur les lois de la mécanique des fluides, les principes de la thermodynamique et les bilans de réactions chimiques (Fig. 11).



Figure 11. Simulation numérique du modèle hybride de propagation du feu (La végétation en couleur verte et cendre, la zone brûlée en couleur noir, et le feu en rouge ; les chiffres 0 ; 8 ;16 et 25 sont des pas de temps (Margerit, 1998).

Dans ce modèle, la présence d'un vent ambiant dominant conduit à un développement du feu de forme elliptique caractéristique des feux observés expérimentalement dans le cas d'incendie d'une strate végétale de densité d'occupation importante.

En résumé, ce modèle prend en considération les phénomènes liés à la combustion à quatre échelles déférentes : microscopique, mésoscopique, macroscopique et gigascopique. Les principaux outils utilisés sont les équations de bilan de masse, d'énergie et de quantité de mouvement pour les différents constituants présents, afin d'arriver aux équations du niveau macroscopique.

c) Modèle théorique dite d'homogénéisation.

Le modèle en trois dimensions globale dérivé, bien que complexe tient compte de la variété d'échelles et de phénomènes physiques de la combustion de la végétation (Margerit et al., 2002). Cette approche fournit un moyen d'estimer les paramètres physiques tels que la conductivité thermique ou la perméabilité, en utilisant la théorie d'homogénéisation (Fig. 12).



Figure 12. Modèle théorique de propagation des feux (Margerit et al., 2002). La végétation initiale en vert, la végétation préchauffée en blanc, le feu en jaune et rouge et la couleur grise indique les zones brûlées.

Beaucoup d'autre travaux de modélisation des feux furent entrepris par les chercheurs Brunelle, 2007 ; Chuvieco, 2009 ; Y.Billaud et al.,2011 ; Margerit et al., 2011; Drissi, 2013 ; Sébastien, 2014 ; Basiliu, 2016...).

Ces modèles soient hybrides ou d'homogénéisation simulent avec une bonne approximation l'évolution des feux en tenant compte des paramètres biophysiques et climatiques. Cependant, leur mise en œuvre demande un dispositif performant de calcul et leur validation est encore en cours ; aucun test n'a encore été fait pour des conditions de feu très contrasté et pour des végétations de types tropicales.

FIRETEC est un exemple de ces modèles en cours de validation. Il permet de modéliser en 3D l'interaction entre le feu, le vent, le relief et la végétation (Fig.13). Il permet ainsi, sur des bases scientifiques solides, de calculer l'intensité du feu, sa vitesse de propagation, ou encore, la température et les flux de chaleur à différents endroits, à l'échelle de petits paysages (Sebastien, 2014).



Figure 13. Test de validation du modèle FIRETEC, les feux réels à droite et les simulations à gauche (Escalon, 2014).

Il est à noter que d'autres classifications des modèles décrivant le comportement d'un feu de forêt existent (Albright et al., 1999; Pastor et al., 2003 ; Johnston et al., 2005). Dans ce présent travail, nous utilisons un simulateur du groupe des modèles semi-empiriques qui prend en compte, les paramètres biophysiques et climatiques de propagation des feux. C'est le simulateur FARSITE (Fire Area Simulator). Il est basé sur le modèle de propagation du feu de Rothermel, qui décrit la propagation de l'incendie et ses caractéristiques en fonction des relations entre les combustibles, la topographie et les conditions météorologiques

Pour effectuer la calibration FARSITE, le choix des types appropriés de combustible sont nécessaires. En outre, les capacités de FARSITE peuvent être affectées par d'autres caractéristiques environnementales comme la complexité des terrains et la variabilité spatiale et temporelle qui affecte la vitesse et la direction du vent. FARSITE a déjà fait l'objet de validation pour simuler la propagation et les caractéristiques du feu sur plusieurs écosystèmes (Ali et al., 2012).

I-2-3 Présentation de FARSITE

FARSITE est un modèle déterministe de croissance de feu bidimensionnel qui permet une représentation spatio-temporelle explicite à l'échelle du paysage. La description détaillée du modèle fut l'objet des travaux de Rothermel (1972) et Finney, (2004). Nous rappelons néanmoins quelques équations utiles qui ont été à la base de la formulation du modèle de propagation du feu FARSITE et nous faisons une brève description littérale de FARSITE permettant de cerner sont avantage dans la simulation des caractéristiques du feu.

FARSITE utilise le modèle de Rothermel qui a été développé à partir d'une base théorique solide pour rendre son application aussi large que possible (Margerit, 2003). Cette base a été fournie par Frandsen en 1971 qui a appliqué le principe de conservation de l'énergie à un volume unitaire de combustible en amont d'un feu en progression dans un lit de combustible homogène (Rothermel, 1972). Son analyse a conduit à ce qui suit :

$$R = \frac{I_{xig} + \int_{-\infty}^{0} (\frac{\partial I}{\partial Z})_{zc} dx}{\rho b_e Q_{ig}} \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots (4) \qquad \text{où}$$

R est le taux de propagation quasi-stable (ft/mn avec ft=0,3048m) ; I_{xig} est le flux de chaleur horizontal absorbé par un volume unitaire de carburant au moment de l'allumage (B.t.u/ft².mn avec *B.t.u* =1055,055J) ; ρ_{be} , la densité apparente effective (quantité de combustible par unité de volume du lit de combustible à l'allumage devant l'incendie), exprimée en lb/ft³ avec lb=1/2,20462 kg, Q_{ig} , la chaleur de préallumage (quantité de chaleur nécessaire pour allumer une unité de combustible) exprimée en Btu/lb ; $(\frac{\partial I}{\partial z})_{zc}$, le gradient de l'intensité verticale évalué sur un plan à une profondeur constante (Btu/ft².mn).

zc = profondeur constante du lit de combustible. Les coordonnées horizontales et verticales sont respectivement x et z.

La chaleur reçue pour l'allumage dépend de la température d'inflammation, de la teneur en humidité du combustible et de la quantité du combustible utilisée dans le processus d'allumage. Après l'allumage, le flux de propagation de la chaleur, qui est le numérateur de l'équation (1) s'écrit.

$$I_p = I_{xig} + \int_{-\infty}^{0} \left(\frac{\partial I_z}{\partial z}\right)_{zc} dx \dots (5) \quad \text{s'exprime en Btu/ft^2.mn}$$

Le flux de propagation est composé de deux termes : le flux horizontal et le gradient du flux vertical. En supposant que le flux vertical est faible pour les feux sans vent, et des pentes négligeables, on peut écrire : $I_p = I_{xig} = Ip_0 \dots (6)$

Ce qui conduit à $R=R_{\theta}$ et d'où de l'équation (4), il vient :

$$I_p = (I_p)_0 = R_0 \rho_b \, \varepsilon Q_{ig} \, \dots (7)$$

Dans le modèle, $(I_p)_0$ est la composante du flux thermique de base auquel sont associés tous les effets supplémentaires du vent et de la pente.

Le vent et la pente changent le flux de propagation de la chaleur par exposition du combustible potentiel aux effets de convection et de la radiation de la chaleur.

Tenant compte des difficultés de trouver une solution analytique aux équations de propagation en raison de l'existence de certains paramètres inconnus ; Rothermel a introduit la formulation expérimentale et analytique obtenue comme suit:

$$I_p = (I_p)_0 (1 + \phi_w + \phi_s) \dots (8)$$

où \emptyset_w et \emptyset_s sont les flux de propagation additionnel produit par le vent et la pente (*Rothermel,* 1972). L'équation du taux de propagation fourni par Frandsen prend alors la forme suivante :

$$R = \frac{(l_p)_0 (1 + \phi_w + \phi_s)}{\rho_b \varepsilon Q_{ig}} \dots (9), \text{ avec}$$
$$\varepsilon = \frac{\rho_{be}}{\rho_b} \text{ et } \varepsilon = e^{\left(\frac{-138}{\sigma}\right)} \quad (9a)$$
$$\sigma = \frac{48}{d} \qquad (9b)$$

d étant le diamètre du brin du combustible. Le taux de propagation est modélisé comme constant pour des vitesses de vent supérieurs à la valeur :

$$U = 96.8I_R^{1/3}$$
 (10) (Andrews et al., 2013).

Pour introduire le vent et la pente dans le modèle, il faut évaluer les coefficients \emptyset_w et \emptyset_s En supposant : $\emptyset_s = 0$ (11) dans l'équation 5, on obtient,

Si les paramètres du combustible dans l'équation (6) sont supposés constants, la propagation du flux est proportionnelle au taux de propagation et l'équation (12) devient :

$$\emptyset_w = \frac{R_w}{R_0} - 1 \dots (13)$$

où R_w est le taux de propagation en présence de vent. De façon similaire,

$$\emptyset_s = \frac{R_s}{R_0} - 1 \dots \dots (14)$$

où **Rs** est le taux de propagation sous l'effet des pentes.

L'intensité de réaction d'un feu de surface se réfère à la production d'énergie thermique (c'est-à-dire le taux d'énergie libérée par unité de surface) au front enflammé. Il a été défini par Rothermel et réaménagé par la suite par Wilson (Wilson, 1980):

$$I_R = (\frac{1}{60})\Gamma' W_n h \eta_M \eta_S \quad \dots \dots \quad (15)$$

Où: I_R = Intensité de réaction (kW / m2); Γ '= Vitesse de réaction optimale (min⁻¹)

Wn = Charge carburant nette (kg / m²); h = Teneur en chaleur du combustible (kJ/kg);

 η_M = Coefficient d'amortissement de l'humidité (de 0 à 1) ; η_S = Coefficient d'amortissement minéral (de 0 à 1).

Le temps de propagation est fonction du diamètre du combustible :

$$t = 8d \dots (16)$$

où d est le diamètre du brin de combustible. Le modèle de Rothermel utilise le ratio surface/volume : $\sigma = \frac{48}{d}$ (17)

Le temps de propagation devient : $t = \frac{384}{\sigma}$ (18)

La chaleur émise par unité de surface est alors déduite :

$$H_{PA} = I_R \cdot t \dots (19)$$

L'intensité des lignes de feux est telle que :

$$FLI = I_B = H_A.R....(20)$$

Et la longueur de la flamme est telle que :

$$FML = 0, 45I_B^{0,46}$$
.....(21)

FARSITE simule, les caractéristiques du feu dans une couche continue de combustible contigüe au sol. Il utilise en entrée, un modèle de carburant qui décrit les types et caractéristiques physiques des combustibles avant l'ignition ; les paramètres topographiques et météorologiques qui conditionnent la propagation (Tabl.I).

Type d'entrée	Entrée de données	fonction		
	Elévation	Pour le réglage adiabatique de la température et l'humidité		
	Pente	Pour le calcul des effets directs sur la propagation du feu		
Paysage	Aspect	Collaboration avec la pente et la latitude pente et la latitude, détermine l'angle de rayonnement solaire incident		
	Modèle de combustible	Fournit une description physique du combustible de surface		
	Couvert forestier	Détermine l'ombrage moyen des combustibles de surface qui affecte les calculs d'humidité du combustible, et le facteur de réduction du vent		
-	Température	Influe l'humidité du combustible		
	Humidité relative	Influe les conditions d'humidité et le taux de propagation		
Climat	vitesse et direction du vent	Influe la propagation du feu		
	Précipitation	Influe les conditions d'humidité et le taux de propagation		

Tableau I. Fonctions des paramètres d'entrée FARSITE (Khalil et al., 2012)

Le paysage regroupe les paramètres obligatoires du modèle tandis que le climat forme le groupe des paramètres de forçage du modèle encore appelés paramètres optionnels.

Les sorties de FARSITE qui nous permettent d'analyser les caractéristiques du feu sont : le temps d'arrivée (*Time of Arrival .TOA*) en heure ; l'intensité de ligne de feu *Fire line Intensity* .*FLI*) en KW/m ; la longueur de la flamme (*Flame Length .FML*) en m ; la vitesse ou taux de propagation (*velocity or Rate of Spread .ROS*) en m/mn ; la chaleur par unité de surface (*Heat per unit area .HPA*) en KJ/m² ; l'intensité de la réaction (*Reaction Intensity .RCI*) en KW/m² ; la direction de propagation (*Spread Direction .SDR*) en degré azimut et le types de feux de cime (*Crown Fire.CFR*), les unités sont : 1 pour un feu de surface, 2 pour un feu de cime passive, et 3 pour un feu de cime actif).

Dans le modèle de propagation du feu « FARSITE », des modèles de carburant standards ou modèles de carburant personnalisés peuvent être utilisés. Le modèle de carburant personnalisé est appliqué lorsque le modèle standard de carburant ne correspond pas aux caractéristiques de la végétation dans une zone d'étude.

Dans cette étude, le modèle de combustible standard a été retenu pour deux raisons :

1- La végétation de la zone d'étude choisie a beaucoup de similitudes aux types de végétations correspondant aux modèles standards d'Anderson.

2- La mise en place d'un modèle de combustible personnalisé demande de gros moyens pour l'étude détaillée des types de végétation (cas des formations végétales du centre et du sudest et sud-ouest de la Guinée). Nous nous sommes donc focalisés sur cette zone de Siguiri pour cette première étape de l'étude dans la zone guinéenne.

Le chapitre suivant est consacré à la présentation des données et des méthodes utilisées pour l'observation et la modélisation des feux de brousse en Guinée.

CHAPITRE II

DONNEES, OUTILS ET METHODES

CHAPITRE II

DONNEES, OUTILS ET METHODES

Introduction

Ce chapitre nous présentons les types de végétation affectées par les feux en Guinée, quelques aspects climatiques de la Siguiri, avant de fournir la liste détaillée des données et méthodes utilisées pour cette étude.

II-1 Présentation des formations végétales victimes de feux de brousse en Guinée selon l'Herbier national (<u>www.herbierquinee.org</u>).

Forêts claires (Nord Est et au centre de la Guinée)

Les forêts claires concernent les nombreux peuplements qui présentent une ouverture du couvert plus ou moins importante en fonction de l'impact humain. Les différents stades d'ouverture ou de dégradation sont floristiquement semblables et constitués d'un cortège relativement modeste d'espèces composant la futaie (Kokou, 2009).

La forêt claire regroupe donc un certain nombre de profils de végétation qui vont de la forêt presque totalement fermée avec un mince tapis graminéen jusqu'à la formation herbeuse boisée et qui par la pratique ancestrale des feux ont été floristiquement réduits à un cortège restreint d'espèces présentant divers degrés de résistance au feu.

Structurellement parlant, il s'agit de formations mixtes, ligneuses et herbeuses, de hauteur dominante variant entre 12 et 18 mètres et dont le couvert ligneux dépasse généralement 50 %. La strate herbacée est largement dominée par de grandes graminées vivaces, plutôt sciaphiles ou mésophiles.

Quelques espèces caractéristiques : Pterocarpus erinaceus, Parkia biglobosa, Danellia oliveri, Holarrhena floribunda, Hyparrhenia spp, Andropogon spp, Sterculia tragacantha, Terminalia macroptera, Spondias mombin...

Fourrés (vers l'ouest surtout en Guinée maritime)

Il s'agit d'un peuplement fermé de buissons et de plantes grimpantes de hauteur comprise généralement entre 3 et 7 mètres. C'est une formation arbustive, à couvert fermé,

ordinairement peu pénétrable, souvent morcelée, constituée d'espèces à feuillage sempervirent ou décidu. Le tapis graminéen et herbacé est généralement absent.

Quelques espèces caractéristiques : Chromolaena odorata, Combretum micranthum, Anthonotha crassifolia, Landolphia heudoletii, Dichrostachys cinerea, Allophylus africanus Uvaria chamae, Holarrhena floribunda. Mezoneuron benthamianum Landolphia dulcis...

Savanes arborées ou boisées (Au centre et en Moyenne Guinée)

Elles sont formées d'herbes parsemées de petits et grands arbres. Le sous-bois par endroit connait la faible fréquence des feux de brousse et une bonne régénération naturelle qui permet le passage progressif de l'étape savane arborée vers celle du type boisé. Ces formations constituent par ailleurs la zone de récolte du bois d'œuvre services, d'énergie, d'artisanat et des produits forestiers non ligneux : plantes médicinales : *Combretum micranthum*, alimentaires : *Parkia biglobosa* (fruit alimentaire), *Daniellia oliveri* (bois d'œuvre), du miel.

Quelques espèces caractéristiques : Erythrophleum guineensis, Combretum micranthum, Andropogon spp, Pterocarpus erinaceus, Holarrhena floribunda, Lannea acida, Terminalia macroptera, Parkia biglobosa, Terminalia glaucescens, Daniellia oliveri...

Savanes arbustives (Le nord-est le nord-ouest)

Ces formations forestières ouvertes ou fermées sont composées d'arbuste atteignant 2 à 5 m. Le sous-bois connait une fréquence moyenne des feux de brousse.

L'essentiel des produits forestiers récoltés au niveau de ces formations forestières se limitent au bois de chauffe, fruits sauvages, et plantes médicinales. Quelques espèces caractéristiques : Lannea velutina, Grewia sp, Pterocarpus erinaceus, Combretum spp, Allophylus africanus, Nauclea latifolia Landolphia spp, Sorindeia juglandifolia...

Savanes herbeuses (le nord-est)

Les savanes herbeuses sont en majeure parties composées d'espèces floristiques des genres *Hyparrhenea*, *Andropogon*, *Panicum et pennicetum*. Ces formations végétales parsemées de mosaïques d'arbustes, sont des zones de prédilection des feux de brousse. Bien qu'improductive à toutes activités agricoles, elles constituent des zones de pâturage et de

fauchage de la paille pour le recouvrement des cases d'habitation. Elles constituent également des zones de transhumances du bétail.

Les jachères (le sud-est, et le sud-ouest)

En dehors des formations naturelles de la flore, il existe également les milieux biologiques exclusivement façonnés par l'intervention de l'homme, il s'agit des jachères par exemple. Les jachères résultent d'un degré poussé de dégradation des forêts dont les différents stades successifs variant selon la durée de temps de repos, d'un à quatre ans en moyenne. Elles représentent également la première étape de la recolonisation du terrain par les plantes ligneuses après l'abattage de la forêt. Ces formations végétales portent des cortèges floristiques à faibles strates (2 à 5 m environ) et constituent des refuges pour des petits animaux contre les prédateurs ; il faut signaler que les jachères sont des écosystèmes généralement fragiles. À jeune âge, elles peuvent être dangereusement affectées par les feux de brousse.

Les jachères sont composées en majeures partie de rejets de souches, des ligneux épargnés lors des opérations d'abatages, de quelques herbacées et des recrus ligneux.

II-2 Données

II.1.1. Données MODIS feux actifs

Pour cette étude, des données de points de feu (hotspots) acquises de janvier 2003 à décembre 2016, ont été utilisées (Giglio, 2010 ; Csiszar et al., 2006). Elles proviennent du capteur MODIS monté à bord des satellites Terra et Aqua. Ce capteur est équipé d'un système de détection thermique qui permet de mesurer les températures sur la surface terrestre. Si la température ambiante d'un lieu dépasse un certain seuil, ce lieu précis est considéré par MODIS comme un point actif de feu qui constitue un ''événement feu'' (Langner et Siegert, 2008; Csiszar et al., 2006).

Il y a plusieurs produits MODIS concernant la détection des feux actifs. C'est la série de produit MOD14 réalisée à partir des données du capteur Terra et MYD14 à partir des données du capteur Aqua. Il y a trois types de produits tous ayant une résolution spatiale de 1km².

- Un produit journalier MOD14/MYD14 comprend entre autres le masque du feu, la qualité de l'algorithme, la force de radiation du feu FRP (*Fire Radiative Power*) ainsi que de nombreuses couches décrivant les attributs du pixel de feu.

- Le produit MOD14A1/MYD14A1 inclut 8 jours de données dans le même fichier. Pour chaque jour un masque de feu est fourni, la force de radiation du feu maximal (max FRP) est enregistrée ainsi que la qualité de l'algorithme.

- Le produit MOD14A2/MYD14A2 est une synthèse sur 8 jours avec uniquement le masque de feu et la qualité de l'algorithme. Nous nous intéresserons au produit MOD14A1. En effet, ce produit propose des informations synthétiques qui comportent néanmoins suffisamment de détail sur chaque pixel de feu. MOD14A1est disponible gratuitement en ligne sur la période de novembre 2000 à maintenant.

II.1.2. Données MODIS de surfaces brûlées

Le produit MCD45A1 de MODIS fournit une détection des surfaces brûlées tous les mois avec une précision de 500m. L'algorithme développé pour ce produit utilise un modèle de réflectance bidirectionnelle (BRDF) basé sur l'approche de détection de changement ; il détecte la date approximative du feu en localisant des changements rapides dans les séries de données journalières de MODIS. L'algorithme cartographie les zones brûlées récemment et pas celle issues de feux des saisons ou d'années précédentes. Le produit surfaces brûlées MODIS est un produit de Niveau 3 sur une maille de 500m, dans le format standard tuilé de *MODIS Land* dans une projection sinusoïdale. Chaque tuile est localisée de manière fixe sur la surface du globe, couvrant approximativement 1200 x 1200 km. Le produit définit pour chaque pixel de 500m le jour approximatif du feu. C'est un produit mensuel obtenu en combinant les données de réflectance de la surface du sol de MODIS Terra et Aqua à **500m**. Chaque produit contient les informations suivantes :

- information par pixel comportant de la surface brûlée
- la date approximative du feu (1-366) ou 0 (pas de feu détecté)

• un code indiquant si aucune décision n'a été prise pour cause de données manquantes, mauvaise qualité ou données sous les nuages.

- Information de qualité de la décision
- des métadonnées obligatoires et spécifiques au produit.

Pour ce travail, les images MODIS de la période 2003 à 2016 ont été collectées par accès gratuit aux liens pour les feux actifs [(10)https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/firms/] et pour les surfaces brûlées) .<u>ftp://ba1.geog.umd.edu/</u>

II.1.3. Les images Landsat

Les capteurs TM et ETM+

Le satellite Landsat 7 est constitué par le radiomètre à balayage ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus), lui-même dérivé du capteur TM (Thematic Mapper) qui équipait les satellites Landsat 4 et 5.Ces scanners à haute résolution possèdent 7 bandes spectrales et couvrent toujours une zone de 185 km sur 185 km et sont disponible en ligne.

[(11)<u>https://earthexplorer.usgs.gov/.]</u>

Ce scanner est une évolution des TM précédents. Il comporte maintenant une large bande panchromatique à haute résolution.

Ba	Bande spectrale	Résolution	Utilisation	
nde		spatiale		
1	0,441 - 0,514 μm (Blue)	30 m x 30 m	Différenciation sol /	
			végétaux, zones côtières	
2	0,519 - 0,601 (Green)	30 m x 30 m	Végétation	
3	0,631 - 0,692 μm (Red)	30 m x 30 m	Différenciation des	
			espèces végétales	
4	0,772 - 0,898 μm (NIR)	30 m x 30 m	Biomasse	
5	1,547 - 1,749 μm (SWIR-1)	30 m x 30 m	Différenciation	
			neige/nuage	
6	10,31 - 12,36 μm (TIR)	60 m x 60 m	Thermique	
7	2,064 - 2,345 μm (SWIR-2)	30 m x 30 m	Lithologie	
PAN	0,515 - 0,896 μm	15 m x 15 m		

Tableau II. Caractéristiques des capteurs ETM+

L'USGS a commencé à distribuer les données d'élévation du radar topographique SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) à une résolution d'une seconde d'arc (~ 30 m). Auparavant, les données SRTM de cette résolution n'étaient disponibles que pour les États-Unis et leurs territoires. Ces nouvelles données peuvent affiner la modélisation à petite échelle et les calculs de rayonnement solaire, améliorer l'écologie du paysage et les classifications, et aider à produire de meilleurs graphismes 3D.

Dans le cadre de la prédiction des caractéristiques des incendies, les SRTM et ETM+ de 30 mètres de résolution couvrant notre zone, ont servi pour la conception des cinq paramètres

d'entrées obligatoires (la pente, l'aspect, l'élévation, le carburant et la couverture de la canopée) du simulateur FARSITE.

II.1.4. Données météorologiques

Les données météorologiques utilisées sont celles des vents à l'échelle horaire, des températures et humidités minimales et maximales à l'échelle journalière et de pluie à l'échelle mensuelle. Ces données ont été obtenues à partir des stations météorologiques nationales et sur le site (https://www.meteoblue.com/fr/meteo/semaine/siguiri_guin%c3%a9e_2415703).

II-2 Outils de traitement

Dans le cadre de l'observation des feux par imagerie satellitaire, plusieurs outils informatiques ont été utilisés comme les logiciels SIG qui ont été d'un apport indispensable. Arc-GIS et QGIS nous ont permis d'organiser les images et en extraire des informations nécessaires pour l'analyse de la variabilité spatiotemporelle des feux actifs et des surfaces brûlées. Le tableur Excel et l'environnement de programmation *MATLAB (Matrix Laboratory)* ont beaucoup servi pour la suite des analyses statistiques. Dans le cadre de la modélisation, FARSITE, ArcGIS et QGIS ont été les principaux outils informatiques utilisés pour simuler la propagation du feu dans notre zone d'étude. Les paramètres d'entrée pour commencer la simulation FARSITE ont été organisés grâce aux SIG et au tableur WordPad.

Les raisons du choix de ces outils informatiques reposent sur leur disponibilité et leur performance dans le cadre de cette étude.

II-3 Méthodes de traitement

II-3-1 Détection des feux actifs et des surfaces brûlées

Les données satellitaires MODIS de feux actifs et de surfaces brûlées ainsi que celles des précipitations de 11 stations synoptiques de la Guinée ont été échantillonnées.

A l'aide des SIG, une reprojection en UTM WGS 1984 des données de feux actifs a été faite. Ces données sont classées sur une échelle de fiabilité ou intervalle de confiance de 0 à 100. Ces valeurs sont basées sur un ensemble de quantités d'algorithmes intermédiaires utilisées dans le processus de détection. Il est destiné à aider les utilisateurs à évaluer la qualité des pixels de points d'accès / d'incendie individuels. Pour ce travail, nous avons uniquement gardé pour notre étude, les pixels de valeurs comprises entre 75 et 100, afin d'établir une base ne contenant que les points de feu avérés.

La détermination de la densité moyenne des feux a été effectuée par la procédure du maillage carré avec transfert de valeur de tous les pixels de feux actifs, ce qui a permis de produire les cartes de densité de feux par unité de surface pour la zone d'Afrique subsaharienne maillée en cellules de 100 km² (Fig. 14) et celle guinéenne en cellules de 10 km². Le nombre de pixels de feu tombé dans chaque cellule de grille est donc comptabilisé.



Figure 14. Calcul des densités de feux par la procédure du maillage carré avec transfert de valeur, la zone contenant des pixels de feux est en grilles de 100x100 km.

Le produit MODIS surfaces brûlées en format shapfile (fichier de forme) a permis de calculer les superficies des traces de feu ou surfaces brûlées. Une intersection avec la carte administrative de la Guinée a permis de faire la distribution par préfectures de ces surfaces. Pour visualiser la dynamique intra-saisonnière des feux en Guinée, une interpolation des pixels de feux pour la saison 2007-2008, mois par mois par krigeage ordinaire a été faite.

L'observation de cette dynamique intra-saisonnière des feux actifs a été complétée en superposant les données mensuelles de précipitation (pluie) observées sur une période de 13

ans à celles des feux MODIS de la même période. Les résultats obtenus sont largement discutés aux chapitres III.

II-3-2 Modélisation de la propagation du feu par FARSITE

La plupart des modèles d'incendie sont basées sur le modèle de propagation du feu de Rothermel (Rothermel, 1972), qui simule la propagation du feu. Ces modèles prédisent les caractéristiques du feu à l'aide la charge de carburant, des informations topographiques et les variables climatiques (Forghani et al., 2007).

Pour la simulation de la propagation du feu dans les savanes du nord-est de la Guinée, nous avons échantillonné une parcelle de la sous-préfecture de Maléa, préfecture de Siguiri, placée au nord-est de la Guinée. Notre souhait était de choisir un espace plus vaste pour cette modélisation, mais ne disposant pas suffisamment de ressource pour l'acquisition complète des données, nous avons réduit le paramétrage sur une zone de la sous-préfecture de Maléa, préfecture de Siguiri. L'idée est d'évaluer les caractéristiques des feux dans un domaine expérimental; et extrapoler ensuite ces résultats sur l'ensemble des domaines présentant les caractéristiques plus ou moins identiques. Toutefois, la poursuite d'un tel travail reste une perspective.

La modélisation de la dynamique du feu avec FARSITE n'est possible que lorsque les paramètres obligatoires et optionnels sont conséquemment préparés en suivant la logique tel qu'indiquée dans le schéma conceptuel ci-dessous (Fig.15).

L'utilisation de FARSITE sur des zones différentes de celles où le simulateur a été développé nécessite une calibration locale afin de produire des résultats fiables.



Figure 15. Schéma conceptuel de la simulation FARSITE. La végétation et la topographie sont des paramètres obligatoires, la météo rassemble les paramètres de forçage du modèle.

Pour les entrées de la topographie, une image SRTM de Maléa, de résolution de 30m a été utilisée pour établir les cartes d'élévation (Fig. 16), pente (Fig. 17) et aspect (Fig. 18) de la zone d'étude en utilisant l'outil d'analyse spatiale dans le logiciel ArcGIS 10.0. Ces paramètres du relief sont des constantes pour une zone donnée. Ils influencent la propagation de façon significative et leur connaissance est indispensable pour toute simulation de la propagation du feu avec FARSITE.



Figure 16. Carte d'Elévation en mètre de la zone pour le réglage adiabatique de la température et l'humidité dans FARSITE.



Figure 17. Cartes des pentes en pourcentage, pour le calcul des effets directs sur la propagation du feu.

D'après Drouet (1982), la pente du terrain produit le même effet que le vent. En général, comme la pente s'accroît, la vitesse de propagation s'accroît, et les feux brûlent plus rapidement sur les pentes accidentées.

P < 15%: Pente faible sans incidence sur la propagation

15% < P < 30% : Pente moyenne provoquant une accélération modérée du front de feu

30% < P < 60%: Pente forte provoquant une accélération forte du front de feu

P > 60%: Pente très forte avec risque de turbulence, saute de feu, embrassement général par tâches.





La prévision des caractéristiques du feu par simulation nécessite la connaissance du combustible de façon détaillée, c'est le paramètre clé pour toute activité de simulation avec FARSITE. Les caractéristiques de celui-ci ne pouvant pas être appréhendées avec précision en chaque point de la zone étudiée, il est utile d'utiliser une typologie de combustible en procédant donc à une classification. A cet effet, on utilise un modèle de combustible qui fournit une description physique du combustible de surface soumis au feu.

Pour la préparation du modèle combustible et de la canopée, une image Landsat ETM+ de résolution spatiale 30mx30m couvrant la zone, a fait l'objet d'une classification supervisée en utilisant l'algorithme du « maximum de vraisemblance » qui a permis de catégoriser les types de végétation qui sont les combustibles (Fig. 19).

Fuel loading						Moisture of extinction	
Fuel mod	el Typical fuel complex	1 hour	10 hours	100 hours	Live	Fuel bed depth	dead fuels
	Tons/acre			Feet	Percent		
Grass and grass-dominated							
1	Short grass (1 foot)	0.74	0.00	0.00	0.00	1.0	12
2	Timber (grass and understory)	2.00	1.00	.50	.50	1.0	15
3	Tall grass (2.5 feet)	3.01	.00	.00	.00	2.5	25
	Chaparral and shrub fields						
4	Chaparral (6 feet)	5.01	4.01	2.00	5.01	60	20
5	Brush (2 feet)	1.00	.50	.00	2.00	2.0	20
6	Dormant brush, hardwood slash	1.50	2.50	2.00	.00	2.5	25
7	Southern rough	1.13	1.87	1.50	.37	2.5	40
	Timber litter						
8	Closed timber litter	1.50	1.00	2.50	0.00	0.2	30
9	Hardwood litter	2.92	41	.15	.00	.2	25
10	Timber (litter and understory)	3.01	2.00	5.01	2.00	1.0	25
	Slash						
11	Light logging slash	1.50	4.51	5.51	0.00	1.0	15
12	Medium logging slash	4.01	14.03	16.53	.00	2.3	20
13	Heavy logging slash	7.01	23.04	28.05	.00	3.0	25

Tableau III Modèles combustibles selon Anderson (1982).

Dans une forêt, il existe plusieurs espèces végétales. Chaque espèce végétale a des influences différentes dans un incendie. La comparaison se fait suivant l'espèce de végétation (graminées, ligneux).

Pour des combustibles totalement différents de ceux du modèle combustible standard (Tabl. 3), un modèle de combustible personnalisé est conseillé pour espérer produire de bonnes simulations. Le choix de Maléa prend en compte ces critères et le modèle standard a été retenu.

Les informations fournies par l'image Landsat et la connaissance du terrain nous ont permis en se référant à la classification des combustibles d'Anderson (Tbl. III), de ressortir six classes d'éléments numérotés (Fig. 19) à savoir :

1= herbes courtes d'environ 30cm de hauteur ;

2= arbustes et herbes sous-bois ;

4= champ d'arbuste ;

9= litière en bois dur ;

98= eau ;

-999= pas de données.

Ces numéros ont été codés en FM (*Fuel Model*), eau, données manquantes pour permettre leur lecture par FARSITE (Figure 19).



Figure 19. Modèle combustible (FM) ou description physique du combustible de surface. Suivant la légende, on a : 1=FM1; 2=FM2; 4=FM4; 9=FM9; 98=eau; 999=pas de données (voir légende).

En écologie des feux, la canopée ou couverture forestière. Elle détermine l'ombrage moyen des combustibles de surface qui affecte les calculs d'humidité du combustible, et le facteur de réduction du vent. Elle est généralement estimée en pourcentage et regroupée en quatre catégories (Nelson, 1997).

0= pas de canopée ; 1= 1à 20% de canopée ; 2= 21 à 50% de canopée ; 3= 51 à 80% de canopée et 4= 81 à 100% de canopée.

Le modèle combustible a permis de dresser la carte de la canopée de notre site en se basant sur deux considérations:

- 1- toutes les zones herbeuses n'ont pas de canopée ;
- 2- les couches de savane arbustive et arborée ont 1 à 20% de canopée.

Les résultats de cette classification sont visualisés sur la figure 20.



Figure 20. La canopée ou couvert forestier du site de Maléa. 0=0% pas de canopée, 1= 1à 20% de canopée (voir légende).

Les vents dans la zone sont très variables. Le vent est un facteur essentiel qui apporte de l'oxygène, transfère la chaleur par inclinaison de la flamme, transporte le feu sur une grande distance.

Trois jours ont été choisis durant la période 2009 et au courant du mois de janvier pour créer une base de données des vents, température et humidité suivant les exigences du logiciel. Les valeurs de précipitation n'ont pas été intégrées étant donné qu'elles sont nulles en cette période sur Siguiri.
jrs	Hrs	V (lune (h)	Directi	jrs	Hrs	V (lung (la)	Direction	jrs	Hrs	V (lung (la)	Direction
		(Km/n)	on(*)			(Km/n)	()			(Km/n)	()
	1	1	54		1	2	255	3	1	2	315
	2	2	67		2	2	207		2	2	231
	3	2	102		3	3	206		3	2	335
	4	1	166		4	3	276		4	2	107
	5	3	319	2	5	2	225		5	2	214
	6	4	251		6	7	229		6	1	236
	7	3	245		7	2	1		7	1	40
	8	2	15		8	1	310		8	1	101
	9	4	116		9	3	263		9	3	202
	10	6	91		10	7	281		10	3	243
	11	9	89		11	6	250		11	3	199
1	12	9	96		12	6	294		12	4	283
	13	12	103		13	6	310		13	3	218
	14	9	96		14	6	322		14	5	66
	15	5	141		15	8	313		15	2	120
	16	6	291		16	8	300		16	3	96
	17	11	241		17	9	306		17	6	97
	18	10	243		18	10	297		18	5	130
	19	12	216		19	7	290		19	3	24
	20	8	254		20	3	215		20	4	89
	21	4	105		21	4	50		21	8	117
	22	3	265		22	1	200		22	4	267
	23	1	288		23	2	201		23	0	00
	24	4	190]	24	1	195		24	0	00

Tableau IV. Vitesses moyennes et directions du vent du 26, 27 et 28 janvier 2009 utilisées pour la modélisation.

Tableau V. Moyennes journalières des températures en °C et de l'humidité en % du 26, 27 et 28 janvier 2009 utilisées pour la modélisation.

Jours	Tmin	Tmax	Hmax	Hmin
1	27	37	78	14
2	25	32	74	14
3	29	34	86	19

Ces données de vent, de température et d'humidité de la station de Siguiri ont été complétées par des données en ligne. [(12)https://www.meteoblue.com/fr/meteo/semaine/siguiri].

Ces cinq paramètres obligatoires (Elévation, pente, aspect, modèle combustible et canopée) de même résolution (30 m) ont été convertis en format ASCIIGRID (fichier texte) avec l'outil ArcGIS avant de les intégrer à FARSITE pour l'élaboration du « Landscape », suivi

de l'intégration des autres paramètres optionnels (vent, température humidité). Ces nouveaux fichiers en format ASCIIGRID sont tous lisibles par WordPad qui a d'ailleurs servi pour leur vérification. Le temps et les points d'allumage ont été choisis en fonction des scénarios envisagés. Les résultats obtenus sont présentés au chapitre IV et ont fait l'objet d'analyse et d'interprétation.

Conclusion;

CHAPITRE III

ANALYSE DES VARIABILITES SPATIO-TEMPORELLES DES FEUX DE BROUSSE EN GUINEE

CHAPITRE III

ANALYSE DES VARIABILITES SPATIO-TEMPORELLES DES FEUX DE BROUSSE EN GUINEE

Introduction

Dans ce chapitre, nous rappelons d'abord l'intérêt de l'étude des feux de brousse en Guinée tout en identifiant les origines de ces feux qui sont généralement anthropiques et les types de végétations affectés. Nous présentons par la suite la situation des feux pour toute la région d'Afrique subsaharienne avant de faire un zoom sur la Guinée pour apporter plus de détails.

Sur la période d'étude 2003-2016, nous présentons les cartes de densité de feu des années 2003, 2009, 2014 qui sont des années de fortes occurrences, puis la carte synthèse 2003-2016. La saison 2007-2008 qui précède les fortes occurrences des feux de 2009 a été choisie pour observer la dynamique saisonnière de ces feux en Guinée.

III-2 Distribution spatiale des feux

Les résultats des observations par l'imagerie satellitaire montrent que la zone d'Afrique subsaharienne est affectée par d'importantes quantités de feux pendant la période sèche, avec des densités allant de 2000 à 4000 pixels aux 100 km² par an (Fig. 21).

Ces feux se distribuent de façon inéquitable entre les différents pays des zones subsahariennes.



Figure 21. Distribution des densités de feu en Afrique subsaharienne, année 2003. Les fortes densités en rouge. La zone de Guinée est encerclée en violet.

Les feux de brousse dans les savanes africaines sont des phénomènes complexes faisant l'objet de multiples considérations (Outil de nettoyage des champs et d'aménagement des territoires, feu rituel, etc.). Le rôle du feu dans les dynamiques de végétation des savanes n'a pas encore pu être clairement établi, notamment concernant le choix de mode d'usage des feux (Jacquin et al., 2010). Compte-tenu de la grande hétérogénéité de structure et de fonctionnement des savanes, ce problème doit être traité à l'échelle des écosystèmes. C'est d'ailleurs l'une des raisons qui nous a conduit à centrer cette étude sur la Guinée.

En Afrique, les travaux scientifiques sur les feux sont majoritairement axés sur les savanes d'Afrique australe notamment avec les projets de recherche SAFARI 92 et SAFARI 2000 (Lindesay et al., 1996 ; Trollope et al., 1996 ; Swap et al., 2002 ; Hély et al., 2003 ; Alleaume et al., 2005). De nos jours on commence à s'intéresser aux savanes d'Afrique de l'Ouest (Mbow, 2000 ; Valea et al., 2005 ; Savadogo et al., 2007; Valea et al., 2010 ; Sow et al., 2013 ; Barry et al., 2015 ; Millimono et al., 2017). La Guinée est l'un des pays de cette zone d'Afrique de l'ouest qui enregistre des quantités importantes de feux par an (Figure 21).

En Guinée, les feux sont généralement allumés pour l'agriculture, l'élevage, l'exploitation minière artisanale et la chasse. La densité de ces feux varie dans le temps et dans l'espace en fonction des caractéristiques de la charge combustible (disponibilités, degré d'assèchement, densité, inflammabilité) et des conditions climatiques (taux d'humidité, précipitations, vitesse des vents, etc.). Les observations satellitaires montrent une distribution des feux sur la Guinée avec des densités variant d'année en année (Fig. 22). Les savanes guinéennes généralement constituées de la strate herbacée et de la strate ligneuse sont des écosystèmes victimes des feux saisonniers.



Figure 22. Densité des feux actifs en Afrique et zoom sur la Guinée (2003, 2009 et 2014) à partir des images MODIS. Les fortes densités sont en rouge et orange, les faibles densités en en jaune et blanc.

En 2003, les densités des feux sont comprises entre 0 et 60 pixels aux cent (100) kilomètres carrés. Les fortes densités sont observées au sud-est du pays, zone à cheval entre savane et ex-forêt. Cette zone du sud était connue dans le temps comme zone forestière, de nos jours, la forte occurrence des feux permet de comprendre les raisons de la forte régression de la forêt.

En 2009, les plus grandes densités (100 pixels de feu aux 100km²) sont enregistrées dans la région du sud-ouest (Basse Guinée et une partie de la Moyenne Guinée). On constate néanmoins en 2003 et en 2009 que certaines zones de la moyenne Guinée sont faiblement touchées (Fig. 22). Cependant, la configuration des densités pour l'année 2014 montre une progression des feux dans ces zones de la moyenne Guinée. Cette évolution progressive des feux devient inquiétante, vu l'intérêt que recèlent les biomes. Les savanes, les forêts classées, les forêts communautaires, les agro-forêts, les parcs nationaux, les réserves de la biosphère (Monts Nimba) de la partie guinéenne sont annuellement affectés par ses feux qui touchent quasiment tout le pays (Fig. 22).

Nous remarquons en général qu'il existe de grandes variations de densité en fonction des zones et des années. Les zones comptabilisant des faibles densités de feux sont généralement caractérisées soit par la présence d'une végétation relativement verte se situant dans des zones plus au moins humides (Moyenne Guinée par exemple) ; soit par l'existence de charge combustible herbeuse à cycle annuel faiblement dense pouvant être totalement brûlée au premier passage du feu. Par contre, dans certaines zones minières (nord-est de la Guinée) où la plupart du couvert végétal fait désormais place aux sols nus, les faibles densités de feu observées expliquent la faible densité du combustible (Fig.22).

La répartition spatiale des densités de feu met en évidence le niveau de configuration des espaces en matières de biomasse végétale (Devineau et al., 2010). Les zones à forte densité sont caractérisées non seulement par la disponibilité de strates combustibles continues, mais aussi par la pression anthropique facilitée par les conditions climatiques.

Un cumul des observations sur la période 2003-2016 (Fig. 23) montre une distribution des densités variant entre 0 et 600 pixels de feu en moyenne aux cent (100) kilomètres carrées pendant ces 14 ans.



Figure 23. Densité de feu en Guinée sur la période 2003-2016 à partir des images MODIS, les pixels de feu sont dénombrés dans chaque maille de 100km²

Les plus grandes densités sont observées au Sud et à l'Ouest du pays ; 300 à 600 pixels de feux comptabilisés dans chaque grille de 10Km² pendant ces 14 ans d'observation (Figure 23). Ces feux du Sud-Ouest et du Sud sont généralement des feux plus ou moins ponctuels allumés fréquemment par des paysans et les producteurs de charbon de bois. On observe dans la partie Nord de la Guinée, des densités faibles. Cette configuration montre l'organisation des feux en Guinée et ses disparités en fonction de la structure de la végétation (les savanes herbeuse et boisée au Nord et les savanes arborées, forêts claires et denses vers le Sud et le Sud-Ouest). De même, du point de vue pluviométrique, la partie Nord de la Guinée est moins arrosée, généralement 3 à 4 mois de pluie par an ; tandis que le Sud-Ouest et le Sud sont des zones fortement arrosées par an (7à 9 mois de plus). Les fortes précipitations ou l'absence de végétation par exemple limitent les possibilités de départ des feux de brousse (Dolidon et al., 2005).

A l'extrême nord, la biomasse dominée par une végétation à majorité graminéenne ne permet pas un brûlage répétitif, et les feux par contre peuvent parcourir de grands espaces. Dans le massif du Fouta, les formations végétales arbustives et les conditions climatiques (humidité, température, etc.) limitent la dynamique des feux, tandis qu'au sud et à l'ouest, c'est l'existence d'une biomasse de forte densité qui limite la propagation des feux. En revanche la disponibilité de la charge combustible explique leur récurrence.

Pour mieux approfondir la compréhension de cette distribution des feux en Guinée, nous poursuivons l'observation avec les données MODIS de surfaces brûlées. Mais bien avant, nous procédons d'abord à la validation de ces données MODIS (surface brûlées) par la méthode de comparaison des traces de feux observées par les capteurs Landsat et MODIS. Les images Landsat ETM représentent de précieuses données dans l'étude des feux de végétation. Les observations MODIS sont comparées par celles de Landsat pour la même zone et pendant la même période (Fig. 24 et 25).



Figure 24. Traces de feu au sud-est de la Guinée à partir des images MODIS, 500mx500m de février 2016.



Figure 25. Traces de feux au sud-est de la Guinée à partir des images Landsat 8, 30 m de résolution de février 2016.

La comparaison visuelle des figures 24 et 25 permet de remarquer que MODIS et Landsat montent les mêmes traces de feu, mais à des résolutions spatiales différentes. MODIS, un spectraux-imageur à résolution ne détecte que des surfaces brûlées supérieures ou égales à 500 m². Landsat, avec une résolution spatiale 17 fois supérieure que MODIS donnent beaucoup plus de détails sur les surfaces brûlées comme l'indique la figure 25. Ces mêmes traces de feux identifiées par Landsat et MODIS sur la même zone et pour la même période justifient la validité des données MODIS (surfaces brûlées) que nous utilisons pour la suite de l'analyse de la distribution des feux en Guinée.

Le calcul des anomalies sur des données MODIS (surfaces brûlées) et MODIS (feux actifs) des préfectures de Guinée a permis de mettre en évidence, les préfectures les plus affectées par les incendies de végétation. Une préfecture est fortement affectée lorsque qu'elle totalise à la fois, de fortes anomalies positives de feux actifs et de surfaces brûlées (Fig. 26).



Figure 26. Anomalies standardisées des feux actifs (en haut) et des surfaces brûlées (en bas) par préfecture sur la période 2003-2016 à partir des données MODIS.

La figure **26** nous permet de remarquer que les préfectures de Beyla, Siguiri, Kankan, Kérouané, Kouroussa et Dinguiraye. A part Beyla, qui est une préfecture du Sud du pays dans la région forestière, les autres préfectures sont toutes au Nord de la Guinée, région de savanes herbeuses et boisées.

L'observation spatiale montre que la partie Nord de la Guinée est beaucoup affectée par les feux de brousse. Bien qu'en terme de densité, on observe de grandes valeurs au Sud et à l'Ouest, mais ces feux généralement ponctuels ne totalisent pas de grandes surfaces brûlées.

Un tableau récapitulatif des surfaces brûlées estimées en hectares par préfecture et par an a permis d'identifier les préfectures qui totalisent les records sur la période (Tabl.VI).

Prefec\Ar 🔻	2003 💌	2004 💌	2005 💌	2006 💌	2007 💌	2008 💌	2009 🔹	2010 💌	2011 💌	2012 🔹	2013 🔹	2014 💌	2015 🔹	2016 💌
Beyla	357916,14	278827,01	316573,09	504013,29	368173,13	604239,60	584736,04	311431,21	316373,94	474905,37	490694,37	314352,28	322320,98	654868,58
Boffa	3889,12	4689,07	5795,51	4711,75	8055,62	3700,68	8081,79	3559,36	4758,15	5821,45	7371,13	30152,32	25688,36	16933,30
Boké	21686,20	26339,12	46362,26	33226,24	22349,38	16190,13	31113,21	15012,99	22443,85	17434,60	27795,15	87869,03	69859,53	55129,05
Coyah	1106,23	1176,96	564,98	517,88	94,17	541,42	1647,90	376,68	729,60	541,41	1483,20	3013,91	13136,04	24436,80
Dabola	104810,34	79328,30	78443,46	52321,85	70940,85	68585,21	69029,00	63463,37	39731,16	60960,53	60370,96	87869,72	46640,46	272879,08
Dalaba	25493,86	20229,68	21188,38	21399,86	23252,07	25491,78	20909,76	25493,10	16604,34	14246,06	18104,08	39311,96	48156,28	30454,80
Dinguiraye	299821,27	228616,78	275590,10	202408,41	243733,25	243153,04	235909,71	202580,11	213026,01	192337,85	192333,17	241676,33	192977,60	311449,49
Dubréka	4448,36	4094,97	4613,23	8071,93	7620,28	2918,68	10094,83	988,69	9696,57	5670,47	11152,01	48904,16	41932,76	34623,16
Faranah	124037,58	60743,48	116346,51	94710,35	64999,76	125803,53	106067,41	77585,16	43792,10	112938,29	85186,04	221953,88	112316,89	539406,98
Forécariah	5814,27	2377,99	1977,55	3012,91	3200,81	2965,50	3554,46	1106,23	5083,94	4566,95	8474,07	41250,48	26718,23	39090,56
Fria	423,30	893,51	1105,33	846,56	1058,12	352,45	2093,05	258,60	893,63	117,62	681,80	13844,54	13564,49	10909,09
Gaoual	88692,21	59911,21	62291,88	60727,80	68603,57	44886,13	69029,15	47611,51	72402,47	55676,88	44242,56	171381,91	134565,16	85347,81
Guéckédou	36903,68	13906,15	11345,02	21235,70	28446,60	27108,09	19448,74	24077,62	17806,83	31056,41	32183,36	60168,26	100090,24	77496,17
Kankan	293634,79	109252,22	133474,43	230012,68	270423,36	239809,27	265961,07	195812,82	177055,81	206161,56	239922,34	328671,98	329103,60	643841,70
Kérouané	188083,37	122911,88	120939,30	206439,50	174851,24	205118,63	230664,49	167387,48	180563,92	180127,44	211155,68	195426,07	237063,67	290736,04
Kindia	13758,39	11269,00	6058,76	7584,19	17611,87	7069,49	15197,56	7421,07	7515,89	12988,76	25644,39	79984,10	86477,91	174110,19
Kissidougou	87269,33	30371,78	40034,83	45708,41	73774,91	69977,69	71521,31	77413,81	40802,16	96796,92	86036,28	263005,20	154815,01	216576,76
Koubia	69774,56	41582,62	59968,27	61293,44	57831,90	63294,09	68515,12	60339,26	66069,62	42693,26	57514,74	69984,26	63835,87	75134,98
Koundara	78088,08	56895,59	50006,69	42953,38	53884,01	52068,42	48726,80	41354,32	38599,06	43713,92	50689,28	130180,44	88094,52	77917,07
Kouroussa	273645,40	209956,46	223406,38	203470,17	202100,97	224684,53	216100,91	200516,89	178732,40	241676,33	220581,92	386962,96	237330,37	676014,16
Labé	15031,29	15310,51	14539,71	15661,70	21293,21	15638,13	15545,08	16877,58	12436,23	11220,21	13487,71	21835,24	19518,81	16739,35
Lélouma	16216,34	13717,32	5888,90	7759,24	12692,38	7947,22	9163,55	5281,93	8764,90	5142,76	7852,52	22728,98	22674,64	18374,39
Lola	44038,35	62534,31	36850,69	71136,93	45307,45	74744,61	46417,14	36459,85	48311,37	82639,11	90752,39	82660,03	90223,51	115077,53
Macenta	21609,48	21895,17	12497,50	20789,14	29225,08	28522,49	30891,72	19458,94	21545,25	28194,02	28284,49	59963,49	150879,45	57875,68
Mali	156806,53	148244,62	190655,34	174359,69	165184,25	171697,65	184377,19	154184,73	183477,30	121011,85	146106,41	220796,65	115417,61	248110,52
Mamou	60954,97	33275,37	37833,10	34798,25	51409,08	42722,84	41130,40	37091,52	27357,92	28179,94	30823,47	107167,42	82588,04	102648,35
Mandiana	127349,89	48148,85	72147,96	83911,56	80162,39	76500,31	76126,74	55001,24	61681,42	50564,74	53055,89	101559,04	84427,47	204467,15
N'Zérékoré	22831,50	24503,41	19304,86	41477,87	13286,84	33695,10	15072,10	20878,55	14766,62	14578,68	14836,92	25945,52	54746,45	22339,48
Pita	22199,75	14892,91	18684,65	17073,16	23836,66	17375,50	17840,72	18447,73	15077,02	16954,15	22643,78	38154,42	49149,16	41818,75
Siguiri	377510,10	300182,89	389144,55	347073,79	233030,36	359440,92	322461,14	269955,70	276125,10	235369,86	233063,35	393390,83	226778,69	579596,53
Telimélé	1642,55	8328,36	4669,55	5817,73	17369,62	3590,73	17711,57	844,70	7953,00	8044,62	23045,78	107605,99	51778,42	19878,56
Tougué	195486,18	118186,92	166933,88	138034,64	147942,23	167373,53	160288,93	152233,55	155094,80	113645,32	148104,59	187767,23	179324,72	169285,56
Yomou	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4992,66	29745,54	141,29
Total/an	3140973,44	2172594,42	2545236,64	2762560,01	2601745,40	3027207,41	3015428,56	2310506,31	2285272,37	2515977,34	2683673,83	4190531,27	3501940,46	5903708,92

Tableau VI. Récapitulatif des estimations en hectare des surfaces brûlées par préfecture et par an, de 2003 à 2016.

La première ligne du tableau correspond aux années en rouge et la première colonne aux préfectures, suivi des surfaces brûlées en hectares.

Les observations faites pendant ces 14 ans (2003-2016) permettent de constater que les préfectures de Beyla, Dinguiraye, Faranah, Kankan, Kérouané, Kouroussa, Mali, Siguiri et Tougué sont sous une véritable colonisation des feux qui sont de plus en plus recrudescents. Par conséquent, les écosystèmes (faunes, flore, ressource en eau, sol etc.) de ces préfectures sont fortement dégradés et d'avantage exposés aux autres aléas. Ces préfectures à l'exception de Beyla, appartiennent à des zones de savanes faisant frontière à la zone sahélienne.

Pendant les années 2014, 2015 et 2016 on enregistre de grandes quantités de surfaces brûlées allant de 3 à 5 million d'hectares par an et couvrant environ 8,83 à 24,01% de la superficie du pays.

Une distribution spatiale de ces surfaces brûlées a permis de faciliter la lecture du tableau 6 des surfaces brûlées par préfecture sur la période 2003-2016 et de ressortir les préfectures les plus affectées (Fig. 27).



Figure 27. Variabilité spatiale des surfaces brûlées en Guinée sur la période 2003-2016 à partir des données, 500m de résolution MODIS).

En fait, il faut remarquer que dans les savanes du nord-est, le nombre de feux actifs détectés est disproportionnel aux quantités de surfaces brûlées détectées par MODIS. Les feux de savane sous l'action du vent et la disponibilité de la charge combustible peuvent parcourir de grandes espaces après leur départ. Par contre, dans des zones du sud et de l'ouest, le type de végétation généralement humide et touffue ne permet pas une grande propagation, malgré le nombre important de feux actifs détectés. D'après quelques investigations sur les lieux et surtout auprès des services des eaux et forêts, ces feux du sud-est seraient allumés pour le nettoyage des champs et l'élevage totalement sédentaire (préfecture de Beyla), ceux du sud-ouest sont souvent causés par les cultivateurs et producteurs de charbon de bois.

Au nord-est, pratiquement dans les préfectures de Siguiri, Kankan, Kouroussa, la chasse, l'agriculture, l'urbanisation et les activités minières constituent les principales causes anthropiques d'apparition des feux. Le surpeuplement de cette région par des orpailleurs diversifie les activités de subsistance et le feu est utilisé comme outil.

Au sud-ouest, la production du charbon est répandue surtout dans les préfectures qui avoisinent la capitale Conakry à savoir : Boffa, Fria, Dubréka, Coyah, Forécariah, Boké et Kindia. Longtemps axée sur les espèces forestières, la pratique charbonnière porte à présent sur certaines espèces fruitières telles que le manguier, le néré. Par ailleurs des espèces fourragères telles que *Daniellia oliveri Pterocarpus erinaceus* et *Afzelia africana* ne sont point épargnées. Très dommageable à la biomasse, la production du charbon fait l'objet de grande spéculation dont Conakry est fortement tributaire. Il faut également signaler l'extension de cette activité de carbonisation vers les autres préfectures du pays.

La distribution temporelle que nous abordons a permis de comprendre la dynamique des feux de brousse de 2003 à 2016. Une analyse saisonnière a montré les périodes des feux en Guinée suivant la pluviométrie.

III-3 Variabilité temporelle des feux en Guinée

III-3-1 Variabilité annuelle des feux actifs

Une estimation par an sur la période 2003-2016 du nombre de feux actifs montre une moyenne de 40.000 pixels de feux détectés par an (Fig. 28). Un résultat qui explique l'occurrence des feux en Guinée.





Le nombre de feux est presque constant en Guinée bien qu'une tendance légèrement à la baisse s'observe sur la période (Fig. 28). Ces résultats expliquent en partie, les observations des feux en Afriques de l'Ouest par l'Atlas des évolutions des systèmes pastoraux au Sahel 1970-2012 (<u>http://www.fao.org/3/i2601f/i2601f.pdf</u>). Dans l'Atlas on montre qu'il existe une forte augmentation à l'échelle des pays du sahel et de l'Afrique de l'ouest, des feux actifs détectés entre 2001 et 2005, puis une légère diminution entre 2005 et 2010. L'étude des feux à petite échelle permet de mieux apprécier leur dynamique.

La légère augmentation des feux actifs observés entre 2007 et 2009, nous a conduit à observer la distribution des pluies pendant cette période, puisque les feux en Guinée dépendent majoritairement du mode de distribution des pluies.

Le calcul des anomalies des precipitations et des feux actifs sur la période 2003-2013 nous conduit à de faire quelques remarques non moins importantes : les anomalies positives relativement élevées des feux actifs pour les années successives 2007, 2008 et 2009 correspondent aux anomalies négatives des précipitations pour les mêmes années successives (figures 29 et 30). Ce cas de figure montre qu'une sécheresse en Guinée peu être caractérisée par une augmentation des feux de brousse. Par contre dans des zones de faibles densités végétale, la dimunition des pluies peut conduire à une dimunition de la charge combustible, donc une diminition des feux.



Figure 29. Feux actifs annuel sur la période 2003-2013 à partir des données MODIS.

En observant les figures 29 et 30, on constate que les années de fortes occurrences des feux sont celles pendant lesquelles on enregistre un taux faible de précipitation.



Figure 30. Précipitations annuelles de 2003 à 2013 à partir des données des stations synoptiques.

La fréquence des périodes sèches est aussi un facteur déterminant de la fréquence des feux et de leur ampleur. On observe que les humidités relatives sur la Guinée sont beaucoup plus faibles sur cette période 2007-2009 (Fig. 31). Cette observation ne permet pas de tirer une conclusion importante, mais pourrait ouvrir une autre piste de recherche approfondie sur l'interdépendance entre les paramètres météorologiques et les feux de brousse en Guinée.



Figure 31. Humidité relative moyenne sur la période 2003- 2016 à partir des réanalyses ERA-Interim 0.25°x0.25°.

Les conditions climatiques constituent aussi l'un des facteurs explicatifs de la distribution spatio-temporelle des feux car elles peuvent favoriser ou empêcher le développement de matériel combustible (Dolidon, 2007). Si l'absence des pluies au sahel peut être un facteur de diminution de la biomasse combustible et par ricochet de la diminution des feux, c'est tout à fait le contraire dans les savanes guinéennes beaucoup plus denses et plus humides.

L'observation des feux actifs sur ces 14 ans a montré une tendance légèrement à la baisse, on observe par contre une légère augmentation des surfaces brûlées (Fig. 32). Ce résultat montre la complexité des liens entre le nombre de feux détectés et les quantités des surfaces brûlées observés par MODIS, qui confond parfois les terres agricoles aux surfaces brûlées (Giglio et al., 2010). Les estimations de surfaces brûlées sont surtout problématiques dans les régions de déforestation, à cause d'une couverture nuageuse importante, notamment en Guinée, mais aussi à cause de l'agrégation des combustibles en tas lors de l'écobuage par les agriculteurs. De grandes quantités de surfaces brûlées ont été enregistrées en Guinée sur la période 2003-2016 (Fig.32) de l'ordre de 3 à 5 millions d'hectares par an, couvrant environ 9 à 24% de la superficie du pays.

A l'exception de l'année 2016, on remarque sur la série, une correspondance entre le nombre de feux détectés et la quantité de surfaces brûlées. Certes, les problèmes de fiabilités des données pour cette année seraient à la base de ce grand déphasage. On observe toutefois sur

Surfaces brûlées par an Nombre d'hectares

la période, une tendance à la hausse des surfaces brûlées. Les années 2014 et 2016 ont été les plus marquantes (4 à 6 millions d'hectares).



Selon le type de végétation et les caractéristiques du feu, les incendies peuvent se conclure de différentes manières. Dans les savanes, de larges superficies brûlées sont sous-estimées par des produits « feu actif » détectés par MODIS, en raison de l'évolution rapide des fronts d'incendie (savane du Nord de la Guinée). Les savanes couvrent la majeure partie du territoire national et sont à chaque saison sèche, la proie des feux de brousse. Elles se subdivisent selon l'état de la strate arborescente en savane boisée, caractérisée par : *Isoberlinia doka, Cassia sieberiana, Parkia biglobosa et Daniellia oliverii* ; savane arborée, caractérisée par : *Pterocarpus erynaceus, Erythrophleum guineense, Parkia biglobosa* et Cuissonia angolensis ; savane arbustive, caractérisée par : *Hymenocardia acida et Andropogon gayanus* et savane herbeuse, caractérisée par les *Poacae* et l'absence d'arbres et d'arbustes (Bah et al., 2009). Ces savanes occupent des étendues considérables dans les Préfectures de Boké, Gaoual, Tougué, Koundara, Lélouma et Koubia.

Dans les zones agricoles, de petits feux peuvent être détectés comme des « feux actifs », mais sont trop faibles pour donner lieu à une détection de zone brûlée (cas du Sud et de l'Ouest du pays). Dans des écosystèmes forestiers en général, les fronts d'incendie se déplacent lentement et sont intégralement détectés comme feu en activité, mais il y a parfois une surestimation en raison de la position du feu dans le pixel MODIS.

III-4 Dynamique saisonnière des feux actifs

III-4-1 Variabilité saisonnière

En Guinée, les feux font leur apparition entre octobre et novembre généralement dans les savanes de la partie nord du pays, juste après les dernières pluies de la saison (Fig.33).



Figure 33. Variabilité saisonnière des feux et des précipitations au nord-est de la Guinée, observations aux stations synoptiques de Faranah, Kankan et Siguiri sur la période 2003-2013.

Au nord de la Guinée, le régime pluviométrique est relativement court et ne dure que 5 mois au maximum. Le couvert végétal, majoritairement dominé par les graminées se dessèche très rapidement en l'absence de la pluie. On observe le pic des feux au mois de décembre à la station de Siguiri située au nord-est avec des quantités avoisinant 900 pixels sur les 10 ans, soit une moyenne de 90 pixels de feux actifs par an au mois de décembre (Fig. 33). En revanche, il faut attendre janvier pour observer les premiers pics de feux à Faranah et à Kankan, deux stations situées à cheval entre le nord et le Sud du pays. On observe au niveau de ces deux stations, une certaine constance des incendies durant 3 à 4 mois environ.

Ces feux de la partie nord s'éteignent pratiquement entre avril et mai sous l'influence de la pluie et l'absence de la biomasse sèche. La permanence des feux dans ces zones durant la saison sèche serait due à leur position transitoire entre savane sèche et savane humide d'une part, et d'autre part la pression anthropique.

Dans la partie sud du pays, les pluies perdurent jusqu'en novembre décembre, on observe une courte saison sèche entre décembre et mi-mars. Le départ des feux est observé en grande partie entre décembre janvier et le pic s'observe entre février et mars (Fig. 34).



Figure 34. Variabilité saisonnière des feux et des précipitations au sud de la Guinée, aux stations synoptiques de Kissidougou, Macenta et N'zérékoré sur la période 2003-2013.

Les pics observés au niveau des stations du Sud expliquent en partie, la période agricole pendant laquelle les paysans font usage du feu. Etant donné que les précipitations dans cette région proviennent pour une grande part de l'évapotranspiration des forêts, une diminution de ces forêts créerait une rétroaction ayant pour effet, la réduction des quantités de précipitations et l'augmentation de la longueur de la période sèche. La fréquence des sécheresses est un facteur déterminant des feux dans cette région.

En Guinée, la dynamique des feux suit un gradient nord-sud en fonction de l'évolution du taux d'assèchement de la végétation guidé par l'allure des précipitations. Pour observer cette dynamique, nous avons spatialisé leur distribution temporelle pour la saison 2007-2008 (Fig. 35). Une carte d'indice de végétation nous a permis d'observer le contraste de la végétation, très faible au nord et dense vers la partie sud. Cette structure du couvert végétal est un facteur qui conditionne le gradient nord-sud des feux observés sur la Guinée.



Figure 35. Dynamique saisonnière des feux de brousse de novembre 2007 à mai 2008 et le contraste du couvert végétal en 2008 en NDVI (Indice de végétation normalisé).

Les feux débutent généralement en novembre dans les savanes de la partie nord, riche en biomasse herbacée ; ces feux migrent progressivement vers les zones du sud-est et du sudouest en fonction de l'évolution du taux d'assèchement et de la disponibilité de la charge combustible. La saison sèche vers le sud s'achève généralement au courant du mois de mars. Cette période est donc mise à profit pour le nettoyage des champs (Fig. 36). Pendant la saison sèche, les zones moins humides se dessèchent très rapidement sous l'influence des vents et du rayonnement solaire.





Les premières pluies du mois d'avril suffissent pour éteindre la majorité des incendies sur le pays et le mois de mai pratiquement pluvieux enregistre de faibles nombres de feux.

Les écosystèmes du Sud-Est de la Guinée sont du type Libéro-ivoirien et couvraient 14 millions d'hectares (Guillard 1989) ; il ne resterait que 700.000 ha répartis entre les préfectures de Guéckédou, Lola, Macenta, N'zérékoré et Yomou (Bah et al., 2009). Les espèces végétales caractéristiques de ces types d'écosystèmes sont : *Picnanthus angolensis, Piptadenia africana, Alstonia congolensis, Antiaris spp, Khaya grandifolia* etc. Ce recul ces dernières années de ces écosystèmes est dû aux effets conjugués des feux de brousse, de l'élevage extensif, de l'exploitation forestière, minière artisanale et industrielle anarchique, des défrichements culturaux etc.

Les feux courants ou «de surface » sont les plus fréquents dans les savanes guinéennes. Ils traversent rapidement la strate herbacée, occasionnant peu de dommages aux arbustes présents s'ils sont allumés précocement. Les feux d'humus se produisent principalement en zone forestière mais sont de plus en plus fréquents en Afrique de l'Ouest du fait des épisodes récurrents de sécheresse et de l'action plus prononcée de l'harmattan au cours de la saison sèche (Dolidon, 2007). En générale, les feux essentiellement d'origine humaine peuvent contribuer à atteindre des objectifs utilitaires (Sow et al., 2013) : maintien des zones de pâturages à l'état de savane herbeuse, culture sur brûlis, nettoyage des résidus de cultures, production de charbon, appropriation de la terre, moyen de contestation politique. Le danger survient lorsque ces feux prennent une allure incontrôlable surtout lorsqu'ils surviennent en fin de saison sèche alors que le couvert végétal est quasiment desséché. Ces feux produisent des grandes quantités d'énergie.

Nous avons fait une observation diachronique sur la Guinée, d'une grandeur particulière qui est la puissance radiative des feux actifs (FRP) fournie par MODIS, pour analyser les particularités des feux dits précoces et des feux tardifs (Fig. 37 et 38).



Figure 37. Puissance radiative (FRP) en Kilowatt (KW/Km2) émise par les feux en Guinée en 2004. Les fortes valeurs sont comprises entre mars-avril-mai, période des feux tardifs.



Figure 38. Puissance radiative (FRP) en Kilowatt (KW/Km2) émise par les feux en Guinée en 2014. Les fortes valeurs sont comprises entre mars-avril-mai, période des feux tardifs.

La variabilité de cette grandeur en 2004 puis 2014, a permis de montrer que d'octobre à mi-janvier, les feux observés en Guinée pourraient être peu destructeurs, vu leur faible puissance et peuvent donc être considérés comme feux précoces. Par contre, de mi-février en mi-mai, la puissance des feux s'accroit, et de grandes quantités d'énergie sont émises et cela confère à ces feux considérés comme tardifs, le caractère dévorateur sur leurs passages.

La connaissance de la puissance radiative nous permet davantage de confirmer non seulement la période des feux précoces entre octobre et janvier et celle des feux tardifs qui se situe entre mars et mai, mais aussi nous confirme le caractère plus énergétique de ces derniers qui sont connus comme plus destructeurs. On montre donc que bien que les feux des mois de décembre, janvier et février soient importants en nombre, ils sont considérés comme des feux précoces et émettent moins d'énergie, donc moins dévastateurs. Les feux précoces ne parcourent généralement pas de grandes distances du fait de la discontinuité de la matière combustible sèche. Les feux tardifs par contre se déclarent pendant que la teneur en eau des végétaux est très faible présentant ainsi des structures continues de combustible sec apte à s'enflammer. Leur gestion devrait être une véritable préoccupation.

Jusqu'en 1994, l'interdiction des feux précoces en République du Mali a entraîné la recrudescence de feux tardifs extrêmement dommageables à la végétation et à la faune, entraînant parfois la destruction de villages (Mistry, Berardi, 2006 ; Laris, Bakkoury, 2008). Le

retour à la pratique des feux a été souhaité par les populations rurales pour maintenir une mosaïque de paysages indispensable à leur système de production. Diverses études, sous différents climats, ont montré l'intérêt des feux, à des périodicités plus ou moins grandes, pour le maintien ou l'accroissement de la richesse et de la diversité floristiques (Fournier et al., 2007 ; Sow et al., 2013 ; Afelu et al., 2016). Ces études montrent que le feu agit sur la productivité des savanes et que la teneur en protéines dans des graminées en épiaison est supérieure à celle observée chez les espèces au sein de savanes protégées des feux pendant plusieurs années.

III-5 Conclusion du chapitre

L'analyse de la variabilité des feux de brousse en Guinée pour la période 2003-2016 a permis de comprendre leur occurrence dans l'espace et dans le temps. Le total des surfaces brûlées en Guinée varie entre 2 à 5 millions d'hectares par an (soit, 8 à 24% de la superficie du pays) avec une moyenne allant de 100 à 600.000 ha par préfecture. La Haute Guinée et la Guinée Forestière sont les régions les plus affectées. Les préfectures *Beyla, Siguiri, Kouroussa, Kankan, Dinguiraye, Mali et Tougué* sont principalement les zones à risque. La recrudescence des feux ces trois dernières années (2014, 2015 et 2016) permet de comprendre le niveau de menace sur les écosystèmes déjà fragilisés par d'autres actions anthropiques.

Nos résultats montrent que la Guinée est l'un des pays ouest africains les plus embrasés durant la période sèche. Ces feux parcourent des millions d'hectares par an et s'observent dans toutes les préfectures. Le départ des feux s'observe au mois d'octobre, ces feux s'amplifient entre décembre et janvier et leur atténuation s'observe entre mai et juin selon les zones. De par leur puissance, les feux qui s'observent entre mars et mai peuvent être considérés comme des feux tardifs plus destructeurs et doivent faire l'objet d'étude approfondie sur plusieurs aspects (sociologiques, économiques et politiques). Bien qu'allumés par les hommes, les facteurs biophysiques, météorologiques et topographiques influencent beaucoup leur propagation en Guinée.

Ce travail d'estimation des feux actifs et des surfaces brûlées, pourrait être approfondi en prenant en compte de manière explicite, d'autres paramètres comme les températures, les humidités au sol, les types vent, la composition floristique de la végétation et la démographie pour mieux ressortir les causes de la recrudescence des feux en Guinée. La compréhension de la dynamique des feux servirait dans la recherche des méthodes permettant de les juguler.

CHAPITRE IV MODELISATION DE LA PROPAGATION DU FEU AU NORD-EST DE LA GUINEE

CHAPITRE IV

MODELISATION DE LA PROPAGATION DU FEU A MALEA (SIGUIRI)

Introduction

Ce chapitre, décrit brièvement la zone de Siguiri qui constitue notre site pour une cette étude de cas sur la simulation de la propagation et des caractéristiques des feux de brousse. Un rappel sur la structure du feu, le mécanisme de propagation de la chaleur nous a permis de consolider les facteurs d'ignition et de propagation d'un feu. Nous avons par la suite procédé aux simulations de la propagation des feux dans la localité de Maléa qui est une sous-préfecture de Siguiri (Fig. 39). Le choix de cette partie de la Guinée se justifie d'une part par le fait que Siguiri soit l'une des préfectures à risque en tenant compte de nos observations sur la période 2003-2016 (Cf. chapitre II), et d'autre part par la présence des types de végétations semblables à ceux de la végétation de la méditerranée où le modèle FARSITE a été validé.



Figure 39. Délimitation de la zone de Maléa située dans la préfecture de Siguiri.

En tenant compte de la topographie de cette zone, trois scénarios ont été choisis pour simuler la propagation des feux en tenant compte de la présence ou non des vents et des collines. Nous avons enfin simulé la propagation des feux dans une zone complexe constitués de collines, des plaines et sous l'influence du vent.

IV-1 Présentation de la zone de Siguiri

Siguiri est une préfecture située au Nord-Est de la Guinée et relève de la région administrative de Kankan (Fig. 39). Le centre-ville est situé en bordure du fleuve Niger. La préfecture de Siguiri compte 12 sous-préfectures, chacune se confondant avec une communauté rurale de développement (CRD) se nommant comme suit, par ordre alphabétique: Bankon, Doko, Franwalia, Kinièbakoura, Kintinian, Malea, Naboun, Niagassola, Niandankoro, Norassoba, Noukounkan et Siguirini.

Sa population était estimée à plus de 28 000 habitants en 2008 et les raisons de ce surpeuplement s'expliquent d'une part, par la présence de deux sociétés minières la SAG (Société Ashanti Goldfield) et la SMD (Société Minière de Dinguiraye) de Lero, quoique cette dernière soit administrativement rattachée à la préfecture de Dinguiraye (Cheick, 2017).

D'autre part, par l'arrivée récente sur le marché Guinéen des machines détectrices de pépites d'or. L'utilisation de ces machines dans la région de Siguiri pour la recherche de l'or a provoqué l'arrivée massive de Guinéens de toutes les régions mais aussi d'étrangers venant du Mali, de la Côte d'Ivoire, du Sénégal et du Burkina.

Les activités agricoles, surtout prospèrent le long des fleuves Niger et Tinkisso, de même que celles de l'orpaillage traditionnel autour de plusieurs de ses villages y sont nombreuses (Cheick, 2017). Du point de vue relief, Siguiri est une région de plaines, de plateaux et de collines avec une formation végétale dominée par des savanes de types herbeux, arbustif et arboré.

Les données d'observation disponibles obtenues depuis la Direction nationale de la météorologie nous ont permis de montrer que Siguiri, comme toute la région du Sahel a connu une longue période sèche au cours des années 70 (Fig. 40). La pluviométrie dans cette région varie entre 0 et 400 mm / mois ; la saison sèche débute pratiquement en octobre et dure près de 7 mois. En général, Siguiri enregistre souvent des périodes sèches et la climatologie mensuelle des précipitations montre un premier pic au mois de juillet et un second au mois de septembre. Les dernières pluies sont souvent enregistrées entre octobre et ainsi commence la saison sèche encore appelées saison des feux.



Figure 40. Distribution mensuelle des précipitations à Siguiri sur la période 1961-2012 à partir la station synoptique.

Du point de vue des températures, les premiers pics des maximas et minimas s'observent en avril pendant que le deuxième pic des minimas s'observe en octobre et celui des maximas en novembre (Fig. 41). Cette évolution bi-modale de la température entre octobre et novembre serait l'une des conditions favorisant le départ des feux à Siguiri.



Figure 41. Variation mensuelle moyenne des températures à Siguiri, à partir des données d'observation journalières de la station synoptique sur la période 2001-2010.

A Siguiri, on observe une période relativement humide entre 1989 et 2000, exceptée l'année 1997 pendant laquelle un déficit marqué est observé; puis une période faiblement humide entre 2001 et 2009 (Fig. 42). La climatologie montre que les maximas d'humidité coïncident aux maximas de précipitation, c'est-à-dire la période juillet août et septembre. On constate ensuite une baisse de novembre en décembre coïncidant à la diminution des précipitations et au départ des feux.



Figure 42. Variation des humidités maximales à Siguiri de 1981 à 2009 à partir des données d'observations de la station synoptique.

Siguiri est une zone où on observe l'harmattan, vent d'est dominant chaud ; la figure 41 montre que la vitesse de ces vents est généralement comprise entre 12 à 19 km/h sauf quelques exceptions et ces vents ont souvent de grandes amplitudes entre juin-aout, puis décembre-février. La période juin-août est pratiquement estivale, et ces vents n'ont aucune incidence sur les feux qui sont d'ailleurs absent pendant cette période. Par contre, les grandes amplitudes de décembre janvier contribuent de façon substantielle au départ et à la propagation des feux (Fig. 43).





La connaissance de ces paramètres climatiques qui contribuent de manière significative, à la prédisposition de la charge combustible et au départ des feux de brousse généralement allumés par les humains est utile pour toute activité de simulation des feux. Si un incendie se déclare dans une savane à de telles conditions climatiques ; attisé par le vent, le feu commence à dévorer feuilles, branches et broussailles. Mais ensuite, quelle direction prendra-t-il et à quelle vitesse se propagera-t-il en fonction du relief, de la direction du vent, du type de végétation. Voilà des questions pour lesquelles les gestionnaires forestiers et les soldats du feu voudraient bien savoir des réponses pour organiser la prévention et la lutte de manière plus efficace des incendies. C'est l'objet de ce présent chapitre de simulation des feux avec FARSITE.

IV-2 Rappel de la structure d'un feu

Le feu dont il est question ici se rapporte à la combustion de matières organiques (végétales). Brunelle (2007) stipule que cette combustion s'effectue en cinq temps. La première phase est l'élévation de la température du combustible vers la température d'évaporation de l'eau (373K). Une fois cette température atteinte, commence la phase deux qui est celle de l'évaporation de l'eau, à température constante. Lorsqu'il n'y a plus d'eau, la phase trois commence, la température recommence à augmenter pour atteindre celle de la pyrolyse.

La phase quatre qui est la pyrolyse est la dégradation chimique que subit un combustible solide en présence d'une source de chaleur suffisante. La réaction chimique s'écrit de manière générale comme suit : Combustible solide \rightarrow F + Résidus solides, où F sont de petites molécules appelées volatiles. À ce moment, la chaleur provoque l'évaporation des volatiles F et le dépôt des résidus après combustions (phase cinq).

Un incendie de forêt ou un feu de brousse est donc communément défini comme la manifestation incontrôlée dans l'espace et dans le temps d'une réaction de combustion qui s'accompagne d'une libération de chaleur et d'émission lumineuse (Drissi, 2013). Pour qu'un incendie se déclare et se propage, trois éléments doivent être présents (Fig. 44 et 45) à savoir :

- ✓ un combustible (la végétation) ;
- un gaz comburant (l'oxygène de l'air)





Figure 44. Le triangle de feu explique les trois éléments nécessaires pour l'éclosion du feu.



Figure 45. Départ d'un feu de brousse contrôlé par les paysans pour des travaux champêtres.

IV-3 Rappel des mécanismes de propagation de la chaleur

Il existe trois mécanismes de propagation de la chaleur : le rayonnement, la convection et la conduction (Fig. 46). Ils ont leurs particularités et une importance qui varie selon les types de feux.



Figure 46. Schéma des trois modes de transfert de chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement.

a) Le rayonnement

Le rayonnement est le mécanisme principal dans les feux de brousse de petites ou grandes intensités. Il s'agit de la chaleur transmise par le rayonnement direct de la source de chaleur. C'est, par exemple, le mode de propagation de la chaleur du soleil.

b) La convection

La convection est le mouvement de la chaleur que l'on identifie sous deux formes (naturelle et forcée). La convection naturelle est causée par la densité plus faible des substances chaudes, ce qui crée un mouvement vertical. La convection forcée provient de l'advection par les vents. La convection est un phénomène très important lorsque le feu possède une grande intensité. L'air chaud s'élève à plusieurs mètres, parfois même des dizaines ou des centaines de mètres.

c) La conduction

Le mécanisme de conduction est le passage de chaleur par contact direct entre un objet et la source de chaleur. Ce mode de propagation est en général négligé dans la modélisation de feux de brousse. En ce qui concerne la phase solide, le sol et le bois sont de très mauvais conducteurs de chaleur. En ce qui concerne la phase gazeuse, la conduction est négligeable comparée au rayonnement et à la convection, du moins aux grandes échelles.

IV-4 Simulation de la propagation spatiale du feu par FARSITE à Maléa

La modélisation des feux est une simulation grâce aux moyens informatiques, de la propagation d'un incendie dans des combinaisons variées de végétation, de topographie et de conditions météorologiques (Moretti, 2015).

En considérant que la topographie est un paramètre statique à Maléa, les principaux problèmes sont liés à la définition des caractéristiques du combustible et la prise en compte des conditions météorologiques. À Maléa, nous partons avec l'hypothèse que les couches combustibles sont supposées être plus ou moins sèches selon les espèces durant la saison sèche qui s'étend de novembre en mai. Comme décrite dans la méthodologie, la simulation d'une situation d'incendie dans le modèle FARSITE nécessite un ou des points d'inflammation comme points de départ du feu et une durée qui est nécessaire pour le début et la fin de l'incendie. Pour donc commencer la simulation de la propagation du feu à Maléa (Siguiri), les points d'ignition ont été choisis suivant trois cas de figures ou scénarios:

1- Ignition et propagation sans vent dans une zone de plaine (en annulant les valeurs du vent);

2- Ignition et propagation sans vent dans une zone de collines (en annulant les valeurs du vent);

3- Ignition et propagation avec vent dans une région de plaines.

Ces trois scenarios nous ont permis en maintenant le même pas de temps, de montrer clairement l'influence des vents et des pentes dans le cadre de la prédiction des incendies.

IV-4-1 Propagation spatiale des feux à Maléa

IV-4-1-1 Ignition et propagation sans vent, dans un milieu sans pente ou scénario 1

En supposant pour ce premier scénario l'absence approximative du vent, FARSITE décrit exactement ce qui pourrait être observé physiquement sur le terrain. Le feu prendrait une forme quasi circulaire et les déformations du front de l'incendie ne dépendent que de la densité et du type de combustible, d'une part, et de leur teneur en humidité (Fig. 47).



Figure 47. Propagation des feux en l'absence de vent dans une zone de plaine. Légende : 1= herbes courtes d'environ 30 cm de hauteur ; 2= arbustes et herbes sous-bois ; 4= champ d'arbuste, 9= litière en bois dur, 98= eau ; 99= pas de données. Les traits blancs courbés indiquant les lignes de front du feu sur différents types de combustibles.

La figure 47 montre qu'en négligent les effets du vent et des pentes, la propagation est presque uniforme suivant toutes les directions. Les lignes de front de feu subissent néanmoins quelques déformations en fonction des types de combustibles rencontrés et de leur état d'humidité. L'eau marquée en couleur rose (numéro 98) constitue une barrière pour le feu.

IV-4-1-2 Ignition et propagation sans vent dans un milieu de pentes ou scénario 2

A l'absence des vents, si le milieu est quasiment constitué du même complexe combustible, les pentes influencent positivement la propagation par une variation de la vitesse selon que le feu monte ou descende une pente (Fig. 48). La vitesse augmente à la monté et diminue à la descente d'une pente.



Figure 48. Modèle de propagation du feu sans vent, dans un milieu de pentes. Légende : 1= herbes courtes d'environ 30cm de hauteur ; 2= arbustes et herbes sous-bois ; 4= champ d'arbuste, 9= litière en bois dur, 98= eau ; 99= pas de données. Les traits blancs courbés indiquant les lignes de front du feu sur différents types de combustibles.

Les détails sur cette variation de vitesse sont visibles sur la figure 50 qui montre les différents taux de propagation.

IV-4-1-3 Ignition et propagation du feu sous l'effet du vent ou scénario 3

Le troisième scénario est celui de la propagation sous l'influence des vents (Fig. 49). Contrairement aux scénarios 1 et 2, les lignes de feu prennent rapidement une direction privilégiée qui n'est autre que celle du vent. En présence du vent, la vitesse de propagation varie de manière directionnelle. Cette vitesse reste nettement supérieure suivant la direction positive des vents, et nettement inférieur suivant le sens contraire. Ces simulations montrent une certaine adéquation avec des observations physiques de la propagation du feu.


Figure 49. Propagation des feux avec vent, mais sans pente. 1= herbes courtes d'environ
30cm de hauteur ; 2= arbustes et herbes sous-bois ; 4= champ d'arbuste, 9= litière en bois dur,
98= eau ; 99= pas de données. Les traits alternativement blancs et rouges étant des lignes de front de feu sous l'influence des vents.

Ces résultats du simulateur FARSITE sont très utiles dans le cadre des travaux sur les feux. Ils permettent de faire de bonnes hypothèses sur la progression du feu en fonction des types de combustible, de la topographie et des paramètres météorologiques (vent, humidité et pluie). FARSITE permet de mesurer simultanément quelques caractéristiques du feu lors de la propagation, ce qui rend surtout son usage utile dans le cadre d'une éventuelle intervention dans des opérations d'extinction des incendies.

IV-5 Analyse des caractéristiques du feu sur Maléa

L'analyse des caractéristiques sera juste axée sur le temps de propagation, l'intensité des lignes de feu, le taux de propagation, l'intensité de la réaction, la quantité de chaleur dégagée et

la direction de la propagation du feu. Beaucoup d'autres caractéristiques comme la hauteur de la flamme, le type de feux etc. sont aussi analysables avec FARSITE.

Pour faciliter l'analyse de ces quelques caractéristiques, nous avons regroupé les trois scénarios sur une même carte à chaque étape de l'analyse.

IV-5-1 Temps de propagation (Time of Arrival .TOA) en heure

Pour une durée de 6 heures prévue lors de l'initialisation de chacun des trois scénarios, on constate différents modes de progression du feu observables suivant les différentes palettes de couleurs (Fig. 50).



Figure 50. Temps de propagation du feu. Les nuances de couleurs caractérisent les intervalles de temps du front de feu dans les trois cas de figures. La partie en bleu correspond à la zone d'ignition ou zone de départ du feu et en rouge, la zone d'arrivée.

Pour les mêmes intervalles de temps, le feu dans le scénario 1 (sans vent ni pente) est uniformément reparti suivant toutes les directions et produit une figure quasi-circulaire. Dans le scénario 2 (effet des pentes), on observe une légère modification du mode de propagation. Les pentes guident le feu suivant leur degré d'inclinaison ; il évolue très rapidement en grimpant des fortes pentes et lentement en descendant. Sous l'effet du vent (ou scénario 3), on peut observer la forme ovale de la propagation du feu. Le vent oriente le feu suivant sa direction (Fig. 50). Si pour le scénario 1 (sans vent, ni pente) il existe apparemment une symétrie centrale sur la figure d'évolution du feu, il n'en est pas le cas au niveau des scénarios 2 (avec pente) et trois (avec vent). La connaissance de ses schémas de progression du feu est très utile dans le cadre des interventions au cours des opérations d'extinction

FARSITE nous permet donc de remarquer que pour une même période d'allumage, le front de feu subit des déformations géométriques en fonction du vent et des pentes. La pente du terrain produit les effets similaires que le vent (Drouet et al., 1982 ; Ali et al., 2012). Cette affirmation s'observe lorsqu'il existe une certaine proportionnalité entre le degré d'inclinaison des pentes et la vitesse des vents. La pente exerce une influence considérable sur la vitesse de propagation, surtout dans les premiers moments d'un feu, ainsi la vitesse de propagation d'un feu doublera sur une pente de 10% et quadruplera en gravissant une pente 20%, par contre elle est considérablement réduite quand un feu descend une pente (Trabaud., 1970).

IV-5-2 Intensité des lignes de (Fire line Intensity .FLI) en KW/m

Le parcourt du feu s'accompagne par une variation de sa puissance qui dépend généralement des caractéristiques du combustible. La figure 48 montre quelques valeurs approximatives de cette puissance (Fig. 51).



Figure 51. Intensité du feu en Kilowatt par mètre dans les scénarios sans vent, avec vent et avec pente.

L'intensité des lignes de feu peut être à la fois fonction des caractéristiques du combustible mais aussi des effets du vent et des pentes qui jouent le rôle d'accélérateur du feu. Pour un même type végétation, l'intensité des lignes de feu peut varier en fonction de la vitesse de propagation du feu. Selon le Système canadien d'information sur les feux de végétation, le calcul de cette intensité est basé sur la vitesse de propagation ainsi que la combustion totale du combustible². La même source indique que l'intensité des lignes de feux peut dépasser la valeur de 30.000 KW/m suivant les vitesses du vent, le type et le degré de combustion du combustible.

IV-5-3 Taux de propagation du feu (velocity or Rate of Spread .ROS) en m/mn

Pour les mêmes types de combustibles allumés à la même période, le taux de propagation est supérieur sous l'effet des vents et des pentes que dans un scénario sans vent, ni pente (Fig. 52).

² http://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/cartes/fb



Figure 52. Taux ou vitesse de propagation du feu dans les scénarios sans vent, avec vent et avec pente.

La vitesse de propagation dépend du type de combustible, mais surtout des vents et du relief. La figure 52 montre un léger écart entres les vitesses de propagation dans les trois scénarios. Cette vitesse est nettement supérieure dans le scenario de la propagation avec vent que dans les autres scénarios. Les pentes dans notre zone d'étude sont plus ou moins faibles, c'est pourquoi les taux de propagation dans les scénarios avec pentes sont quasiment faibles. Si les pentes étaient assez fortes (> 60%) ce taux serait beaucoup plus proche de celui de la propagation avec vent. En revanche, le vent est un facteur marquant dans la propagation. Une vitesse de propagation du feu d'environ 8,6 m/mn, soit 0,531km/h en présence des vents de 12 km/h s'observe à Maléa. En se référant de la classification de Scott (2005), cette vitesse est modérée (Tbl. VII).

ROS (Rate of Spread)/ Taux de propagation	
0-2	Très faible
2-5	Faible
5-20	Modéré
20-50	Elevé
50-150	Très élevé
>150	Extrême

Tableau VII. Classification des taux de propagation (Scott et al. 2005)

La présence des vents (1 à 12 km/h) hausse la vitesse de propagation du feu à Maléa qui peut toujours augmenter lorsque la vitesse des vents augmente.

IV-5-4 Intensité de la réaction (Reaction Intensity .RCI) en KW/m²

C'est une puissance par unité de surface qu'émet le feu lors de sa propagation (Fig. 53).



Figure 53. Intensité de la réaction du feu en KW/m^2 dans les scénarios sans vent, avec vent et avec pentes.

Tout se passe comme si le feu se repositionne périodiquement pour reprendre un nouvel élan, ce qui explique l'aspect très contrasté du schéma de distribution de cette puissance (Fig. 53). L'intensité de la réaction dépend beaucoup des caractéristiques du combustibles (types, degré d'humidité, densité etc.).

IV-5-5 Chaleur par unité de surface (Heat per unit area .HPA) en KJ/m²

Au-delà des émissions des particules et des gaz, le feu émet une importante quantité de chaleur qui peut dépendre de plusieurs facteurs (type et densité du combustible, la vitesse de propagation, le degré de combustion, topographie du milieu, etc.).

La figure 54 prédit les quantités de chaleur émises par mètre carré suivant les trois cas de figure.



Figure 54. Quantité de chaleur émise par unité de surface suivant les trois scénarios (effet des vents, effet des pentes, sans vent ni pente).

Les maximas de chaleur par unité de surface pour les trois scénarios sont de l'ordre de $3x10^4$ Kj/m² avec une légère augmentation dans le scénario avec vent.

IV-5-6 Direction de propagation (Spread Direction .SDR) en degré azimut

Les directions de propagation sont quasi-similaires au cours des scénarios de propagation sans vent et celui avec des pentes, mais totalement différentes dans cas de la propagation avec vent (Fig. 55). Une seule direction (direction des vents) est beaucoup privilégiée dans le cas de la propagation avec l'effet du vent, et en revanche, le feu s'oriente suivant toutes les directions dans les cas de la propagation avec des pentes et celle sans vent. Un résultat en adéquation avec les observations physiques de terrain.



Figure 55. Prédiction directionnelle de la propagation du feu suivant les trois scénarios (effet des vents, effet des pentes, effets sans vent).

En générale, la direction de propagation du feu dépend beaucoup de l'influence du vent, mais dans certaines conditions, les pentes et le types de combustible peuvent aussi guider le feu. En effet, la direction de propagation du feu peut aussi variée suivant la configuration du combustible. Les flammes s'orientent vite du côté du combustible sec et dense.

IV-5-7 Propagation sous les effets du vent et des pentes

En envisagent une propagation plus complexe c'est-à-dire tenant compte de tous les aspects topographiques et météorologiques, et avec un temps plus prolongé que les cas précédents, nous observons ce cas de la figure 56.



Figure 56. Simulation de la propagation du feu sous les effets du vent et des pentes 1= herbes courtes d'environ 30cm de hauteur ; 2= arbustes et herbes sous-bois ; 4= champ d'arbuste, 9= litière en bois dur, 98= eau ; 99= pas de données.

Dans ces conditions de propagation, les effets additionnés du vent et des pentes peuvent davantage augmenter la vitesse de progression du feu. FARSITE nous permet de mesurer simultanément le périmètre et l'aire balayé par le feu en fonction du temps (Fig. 57 et 58).



Figure 57. Courbe d'évolution du périmètre de brûlage en fonction du temps, environ 72km de pourtour atteint par le feu pendant trente (30) heures.

Comme le montre la figure 57, la topographie est un facteur d'amplification de la vitesse du feu. Pour une durée de trente (30) heures prévues, le feu a atteint un périmètre de près de 72 km (Fig. 57) en balayant une superficie de près de six mille deux cent (6200) hectares (Fig. 58).



Figure 58. Courbe d'estimation de la surface brûlée en fonction du temps

FARSITE estiment automatiquement les surfaces brûlées en hectares et calcule les périmètres en Km. La simulation de la propagation et des caractéristiques du feu avec FARSITE a permis de comprendre les caractéristiques des feux à Maléa.

Les températures, les précipitations, l'humidité relative, la vitesse du vent et la direction du vent sont des aspects météorologiques qui déterminent le comportement du feu. Les conditions météorologiques extrêmes peuvent affecter l'état d'humidité des combustibles, ce qui influe sur la probabilité de combustion. Un vent sec accélère le préchauffage du combustible pour l'allumage et fournit de l'oxygène. La direction du vent influe sur la forme et l'intensité du feu, tandis que la force du vent influe sur le taux de propagation du feu et son intensité.

IV-6 Conclusion du chapitre

L'utilisation de FARSITE a permis de montrer les caractéristiques des feux à Maléa. Dans cette zone, ces caractéristiques dépendent beaucoup de la configuration du combustible, de la topographie et des paramètres météorologiques. On simule la chaleur émise par ces feux l'ordre de **38.000KJ/m²**, la vitesse de propagation atteignant **8,6m/min**, soit **0,531km/**h, une puissance radiative de l'ordre de **4000KW/m**. Par conséquent, la calibration de FARSITE exige le choix du modèle approprié de carburant (modèle standard ou modèles personnalisés). En outre, les capacités de FARSITE peuvent être affectées par d'autres caractéristiques environnementales comme la complexité des terrains et la variabilité spatiale et temporelle qui affecte la vitesse et la direction du vent.

Bien que FARSITE simule la propagation et les caractéristiques du feu, il est important de retenir que les modèles sont des simplifications de ce qui se passe dans la réalité. Ils nous permettent néanmoins de reconstituer les évènements passés, d'intervenir dans le présent et prévenir les situations futures par des séries d'hypothèses avec parfois de bonnes approximations. La modélisation des caractéristiques du feu peut être un outil de d'intervention immédiate ou de prévention des feux pour une gestion durable des écosystèmes. Elle peut même conduire à l'élaboration des cartes de vulnérabilité pour différentes formations végétales d'une localité donnée. Chapitre V DISCUSSIONS DE QUELQUES FORMES D'IMPACTS DU FEU SUR LA VEGETATION, LA FAUNE, LES SOLS ET LES COURS D'EAU

CHAPITRE V

DISCUSSIONS DE QUELQUES FORMES D'IMPACTS DU FEU SUR LA VEGETATION, LA FAUNE, LES SOLS ET LES COURS D'EAU

Nous montrons dans ce chapitre, quelques formes d'impact don le feu serait l'une des principales causes avant de tirer une conclusion générale sur ce présent travail. Quelques illustrations sont présentées pour juste témoigner nos quelques investigations de terrain.

Les visites de terrain ont permis de faire des constats sur le niveau de dégradation des forêts, des sols, la mort et la fuite des animaux sauvages, l'ensablement des cours d'eau et l'appauvrissement des sols dont l'une des causes seraient les feux de brousse.

V-1 Discussions

Notre travail montre que les feux de brousse influencent sous de nombreuses manières, la diversité biologique guinéenne vue leur recrudescence durant cette période 2003-2016. Ils constituent une importante source d'émission de carbone et contribuent au réchauffement de la planète, ce qui pourrait entraîner des changements dans la biodiversité locale et même sous-régionale (Thonat, 2013). Aux niveaux régional et local, ils modifient le volume de la biomasse, altèrent le cycle hydrologique avec des retombées sur les systèmes marins comme les récifs coralliens, et influencent le cycle de vie des végétaux et des animaux (Davies et al., 1999). La fumée dégagée par les forêts en flammes peut réduire de façon notable, l'activité photosynthétique et compromet souvent la santé des êtres humains et des animaux (Davies et al., 1999).

L'une des pires conséquences écologiques du feu est la probabilité accrue que surviennent de nouveaux incendies dans les années suivantes, à mesure que les arbres morts s'effondrent, créant des trous dans la forêt à travers lesquels le soleil pénètre et dessèche la végétation, et où les combustibles s'accumulent et les espèces vulnérables au feu, comme les graminées pyrophytes prolifèrent (Burley, 2002). Les feux répétés sont destructifs car ils représentent un facteur clé dans l'appauvrissement de la diversité biologique des écosystèmes des forêts ombrophiles. Les incendies sont souvent suivis par la colonisation et l'infestation d'insectes qui perturbent l'équilibre écologique.

Le remplacement de vastes espaces forestiers guinéens par des tapis de graminées pyrophytes est l'un des impacts écologiques les plus négatifs des incendies sur les forêts tropicales ombrophiles (Camara et al., 2012). Ces processus ont déjà été observés dans certaines parties du monde comme l'Indonésie et l'Amazonie (Turvey, 1994 ; Cochrane *et al.*, 1999; Nepstad et al., 1999). En Guinée, c'est surtout la zone sud qui est victime de cette mutation. Selon les autochtones, les forêts denses des années 70 ont aujourd'hui fait place aux graminées à cycle annuel (Fig. 59).





Cette zone, selon les autochtones était une forêt dense et actuellement c'est une savane, peuplée de rares espèces résistantes au feu (Fig. 59).

V-1-1 Impact du feu sur la végétation guinéenne

Dans les formations végétales du sud et du sud-ouest du pays, les feux tardifs, plus violents, ont un impact sur la végétation ligneuse : arbres et arbustes tués, diminution de la surface terrière, régénération supprimée ou retardée, graines détruites (Fig. 60). Cependant, dans les savanes arborées de la haute Guinée, la plupart des arbres ont une forte capacité de régénérer à la suite du passage du feu. Les incendies ont une incidence sur la phénologie des ligneux, en réduisant l'intensité de la floraison et/ou de la fructification. Il en découle une production moindre de graines avec un effet réducteur sur le recrutement potentiel de jeunes

individus au sein des peuplements. Des effets indirects se manifestent également pour la faune qui utilise le pollen ou qui consomme les fruits et les graines.

Cependant, certains auteurs comme Bowman et al. (1995) concluent que la composition floristique et la diversité du tapis graminéen ne varient pas ou varient très peu sous l'action des feux, quel que soit leur régime. Cette affirmation de Bowman, si elle est vérifiable pour les feux de savane herbeuse est tout en désaccord avec la réalité dans le cas des feux de forêt, bien qu'il soit vrai que la richesse spécifique est plus forte en cas de feu modéré que dans le cas d'une protection intégrale. Yeaton et al. (1986) rapportent qu'il est possible de parvenir à un déclin de la diversité de la richesse spécifique du tapis herbacé si l'intervalle entre les feux augmente.

La disparition des espèces ligneuses et la diminution de la biomasse ont pour conséquence inévitable, une diminution des ressources naturelles comme le bois et autres produits ligneux, chaumes de couverture des toits, nourriture et habitats pour des animaux sauvages pour les populations (Fig. 60).



Figure 60. Zone brûlée dans la préfecture de Gueckédou, ex-zone forestière. Photo prise lors des travaux de validation des images MODIS en mars 2015.

V-1-2 Effets du feu sur la faune forestière

Dans les écosystèmes guinéens où le feu contribue au déséquilibre de la faune et de la flore, on constate des effets dévastateurs sur les vertébrés et invertébrés vivant dans ces milieux ; non seulement en provoquant directement leur mort (Fig. 61), mais aussi par des effets indirects à plus long terme comme le stress et la perte d'habitat, de territoire, d'abri et d'aliments provoquant leur migration.



Figure 61. Animal victime du feu de brousse.

La perte d'organismes clés dans les écosystèmes forestiers, comme les invertébrés, les pollinisateurs et les décomposeurs, peut ralentir considérablement la régénération de la forêt (Boer, 1989).

L'exposition de la population en générale et des paysans en particuliers à aux fumées d'incendies et notamment aux particules fines dégagées, a des conséquences sur la santé. Les effets sur la santé rapportée par l'Organisation mondiale de la santé (OMS, 2000), suite aux feux de forêt survenus en Californie en 1993, en Asie du sud-est en 1997-98 et au Brésil en 1997 se traduisent par une augmentation des cas de pneumonies, des consultations externes pour affections respiratoires (de l'Anses, 2012).

V-1-3 Impact du feu sur les cours d'eau

Le régime de la plupart des cours d'eau en Guinée est saisonnier, avec un débit réduit, voire nul, au cours de la saison sèche mais torrentiel en saison des pluies. Ces rivières et fleuves subissent l'impact des activités humaines en termes de déboisement des galléries forestières accentué par les feux de brousse. Les galeries forestières peuvent subir des modifications de leur composition floristique et de leur structure et parfois, la mort de certains arbres et la disparition définitive de certaines espèces peuvent être enregistrées.

Quelques images du lit du fleuve Sankarani lors de notre mission de travail en témoignent (Fig. 62).



Figure 62. Ensablement du lit du fleuve Sankarani en 2014, photo prise lors de la visite de terrain dans le cadre du projet MODEV (Kouroussa).

Bien que les études menées dans ce domaine sont minimes en Guinée, les conséquences du feu sur le réseau hydrographique peuvent être directes comme un dépôt d'ammoniaque à partir de la fumée ou indirectes du fait d'une disparition brusque de la végétation pouvant entraîner une érosion, avec une augmentation de dépôt de sédiments et de matière organique dans les lits des rivières et fleuves. Le processus d'ensablement des cours d'eau Guinéens devient d'ailleurs inquiétant ces dernières années.

V-1-4 Impact du feu sur les sols

Dans des savanes du nord, l'approvisionnement du sol en matière organique résulte davantage du système souterrain (racinaire) que du système aérien (chaumes et feuilles). Une savane produisant 6 t/ha de matière sèche aérienne libère annuellement, par son système racinaire, entre 6 et 20 t/ha de matière organique ; le passage du feu minéralise de façon brutale une énorme quantité de matière organique, estimée de 2-4 t/ha en zone soudanienne à 6-8 t/ha dans les savanes guinéennes (Poilecot et al., 2009). De plus, il restitue, au travers des cendres, les éléments constitutifs (azote, phosphore et potassium) de la matière végétale. Les apports par la pluie et la fixation biologique (en particulier pour l'azote) peuvent compenser pour une large part les pertes par drainage et combustion. Le sol dénudé, après le passage du feu, peut faciliter l'érosion hydrique sur les terrains à forte pente. Quelques observations suite à nos missions de terrain ont permis d'identifier localement, les sols pauvres dans la zone de Siguiri (Fig.63).

Les feux précoces permettent une régénération rapide du tapis herbacé qui est bien en place au moment des premières grosses pluies et qui limite les effets d'érosion. Les sols d'altitude, rocheux ou rocailleux, constituent une défense naturelle contre l'érosion hydrique et l'absence temporaire de végétation ne représente pas un risque de dégradation pour ces derniers.



Figure 63. Sol appauvri dans la contrée de Siguiri suite au passage répété des feux de brousse (2012).

V-1-5 Analyse du problème et propositions de méthode de gestion des feux

La question que l'on se pose est bien celle de savoir les causes lointaines de la recrudescence des feux en Guinée. A en croire, on pourrait remarquer que l'accroissement rapide de la population serait l'une des causes de la rapide dégradation des écosystèmes

guinéennes. Le besoin de survie aggravé par un manque de qualification professionnelle oriente la majeure partie de la population démunie à s'attaquer aux ressources naturelles sous toutes ses formes (forêts, faunes, milieu aquatique, sols, sous-sol, etc.).

L'utilisation du feu comme instrument de gestion des terres et de leurs ressources fait partie intégrante de la culture et des traditions de nombreuses sociétés africaines en général et guinéennes en particulier. Les populations utilisent le feu dans le cadre de leurs activités en réponse à l'augmentation constante de la pression démographique dans ces régions. Le feu est généralement plus économique et plus facile à utiliser que toute autre méthode d'élimination de la biomasse indésirable. Les tentatives de proscrire son utilisation, en l'absence de solutions plus rentables, ne seront pas efficaces dans le contexte actuel.

La diminution de la fréquence et de l'ampleur du brûlage incontrôlé et de ses effets néfastes comporte des éléments techniques, sociaux et politiques, qui ont tous d'importantes répercussions économiques et autres. Les problèmes techniques fondamentaux comprennent la nécessité de développer et d'adopter des techniques améliorées de gestion des terres afin de diminuer les besoins en matière de brûlage et de réduire le plus possible les risques de feux incontrôlés.

Des systèmes améliorés d'alerte précoce pour l'évaluation du risque incendie sont nécessaires, mais ceci nécessite en retour de meilleures capacités et infrastructures locales permettant l'utilisation des données de télédétection par satellite concernant l'évaluation du risque, et des prévisions climatiques à long terme. Pour FROST (2006), compte tenu des expériences vécues dans d'autres parties du monde avec les brumes sèches de fumée et les effets nocifs sur la santé qui leur sont associés, il faut aussi renforcer la capacité de modélisation de la dispersion et du transport des émissions, et de leurs conséquences sur la qualité de l'air.

Dans une perspective de gestion durable des ressources, les zones fortement anthropisées (Siguiri, Boké, etc.) ainsi que les sites protégés (Réserves des Monts Nimba, les forêts classées, etc.) devraient faire l'objet de surveillance particulière en utilisant des techniques de la télédétection et de modélisation pour une observation synoptique et régulière à moindre coût.

Un travail plus approfondi devant prendre en compte, des estimations en termes de coût, des méfaits des feux de brousse en Guinée serait nécessaire.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail qui porte sur la contribution à l'étude des feux de brousse en Guinée, les objectifs poursuivis étaient de mieux connaitre leurs distributions spatiale et temporelle, modéliser leurs propagations et caractéristiques dans les savanes du nord-est, connues parmi les zones les plus affectées par les feux en Guinée, afin de motiver la mise en place des méthodes de gestion des feux en Guinée.

Différentes catégories de données ont été utilisées à savoir, des données satellitaires MODIS feux actifs de 1 km de résolution, conçues par des algorithmes de seuillage de température dans le canal thermique. Les données MODIS surfaces brûlées de 500 m de résolution conçues sur la base d'algorithme décrivant les brusques changements de l'indice de végétation normalisé (NDVI) avant et après les feux. Les images Landsat et SRTM de 30 m de résolution ainsi que des données météorologiques de pluie, de vent, température et d'humidité des stations synoptiques et celles en ligne aux limites de la zone d'étude ont aussi été utilisées dans ce travail.

Pour l'analyse de la variabilité des feux sur la période 2003-2016, les pixels de feu MODIS classés sur une échelle de fiabilité ou intervalle de confiance de 1 à 100 ont été sélectionnés par seuillage et les valeurs comprises entre **75** et **100** de cette échelle ont été retenues et considérées comme des pixels de feu avéré. Nous avons ensuite procédé au maillage carré avec transfert de valeur de ces pixels retenus pour produire des cartes de densité de feu. Le calcul et la distribution des surfaces brûlées par préfecture ont été faits en superposant des images MODIS avec la carte administrative de la Guinée. La dynamique intra saisonnière a été analysée en croisant des données de pluie à celles des feux actifs sur la période 2003-2013.

Pour la modélisation de la propagation des feux au nord-est de la Guinée, plus précisément à Maléa (Siguiri), nous nous sommes servis de l'outil de modélisation FARSITE (Fire Area Simulator) conçu pour simuler les caractéristiques des feux de brousse dans le cadre de la lutte contre les incendies de la végétation. Le modèle a été calibré en intégrant les paramètres de la végétation et de la topographie de Siguiri obtenus à partir d'images satellites (Landsat et SRTM) ainsi que les données météorologiques sus mentionnées. Ces données ont été préparées à l'aide des systèmes d'information géographique (Arc-GIS, QGIS). La durée de combustion et les points d'allumage ont été fixés en admettant des scénarios comme:

propagation du feu dans une plaine sans vent; propagation sur des collines sans effet du vent et propagation avec effet du vent.

Nos résultats portant les distributions spatiale et temporelle des feux de brousse sur la Guinée montrent que sur la période 2003-2016, le nombre de pixels de feu varie d'une année à autre avec de fortes augmentations des surfaces brûlées allant de l'ordre de 3.10⁶ hectares en 2003 à 6.10⁶ d'hectares en 2014. Les occurrences des feux suivent un gradient nord-sud en fonction du type de végétation (zone de savane au nord, et zone forestière vers le sud) et les densités allant de 80 à 100 pixels au 100 km² par an s'observent par endroit. Ces feux s'intensifient de septembre à avril et les déficits pluviométriques observés sur la période 2007-2009 ont provoqué une forte augmentation des feux actifs et des surfaces brûlées sur cette période. Les préfectures de Beyla, Siguiri, Kankan et Kouroussa ont enregistré les maximas de feux actifs et de surfaces brûlées sur toute la période 2003-2016.

Les résultats de la modélisation de la propagation des feux de brousse sur le site de Maléa dans la préfecture de Siguiri au nord- est de la Guinée montrent que, dans ces savanes, l'intensité des lignes de feu peut atteindre 4133,3 KW/m sous l'effet des vents. Sans vents, on note une diminution de 69% sur les plaines et de 68% sur les collines de cette intensité. La quantité de chaleur dégagée pourrait atteindre 38000 KJ/m² sous l'effet du vent. Sans vent, une diminution de 10 et 9% est observée respectivement dans les plaines et les collines. La vitesse de propagation atteint 8,6 m/min (0,513 km/h), mais sans le vent, elle diminuerait jusqu'à 73 et 61% respectivement dans les plaines et les collines.

Ces résultats de la simulation de la puissance du feu à Maléa variant entre 0 et 4000 KW/m sont comparables à ceux de l'observation par MODIS sur la Guinée variant entre 0 et 5000 KW.

Comme perspective, il serait intéressant de poursuivre ce travail de modélisation des feux de brousse sur toute la Guinée, en procédant à une caractérisation des types de combustibles sous forme de modèles combustibles personnalisés suivant les zones, pour améliorer le degré de fiabilité des simulations FARSITE. D'autres modèles peuvent être envisagés comme des modèles de végétation et des modèles climatiques plus robustes pour une meilleure compréhension de la dynamique des écosystèmes guinéens.

L'étude des liens entre les émissions des feux, les précipitations, la température de surface et les indices climatiques devrait en ce sens être envisagée, en prenant en compte d'autres variables géophysiques jouant un rôle dans l'activité des feux, comme la végétation ou le relief. Cette étude devrait également intégrer les composantes humaines à l'activité des feux, comme la densité de la population ou le maillage des routes. L'étude des corrélations entre ces différentes variables et les émissions des feux permettrait d'approfondir la connaissance des causes des feux de brousse en Guinée et contribuerait à la mise en place des méthodes de gestions efficaces et durables des incendies. Bien que ces résultats obtenus soient limités par la qualité des données utilisées, ils ouvrent une nouvelle voie aux chercheurs et décideurs pour la compréhension des problèmes qui affectent les écosystèmes guinéens.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Achard, F., Eva, H. D., Stibig, H. J., Mayaux, P., Gallego, J., Richards, T., & Malingreau, J. P. (2002). Determination of deforestation rates of the world's humid tropical forests. Science, 297(5583), 999-1002.

Adou, J. K., Billaud, Y., Brou, D. A., Clerc, J. P., Consalvi, J. L., Fuentes, A., ... & Zekri, N. (2010). Simulating wildfire patterns using a small-world network model. Ecological Modelling, 221(11), 1463-1471.

Afelu, B., Kamana, P., & Kokou, K. (2015). Effectiveness of the Forest Fire Management Frame in Togo. Annual Research & Review in Biology, 8(6), 1.

Afelu, B., Fontodji, K., & Kokou, K. (2016). Impact des feux sur la biomasse dans les savanes guinéo-soudaniennes du Togo. [VertigO] La revue électronique en sciences de l'environnement, 16(1).

Albinet, G., Searby, G., & Stauffer, D. (1986). Fire propagation in a 2-D random medium. Journal de Physique, 47(1), 1-7.

Ali, K., Ali, S. (2012). Simulation numérique des caractéristiques des feux de forêt par le logiciel FARSITE. https://docplayer.fr/24742257.html

Alleaume, S., Hely, C., Le Roux, J., Korontzi, S., Swap, R. J., Shugart, H. H., & Justice, C. O. (2005). Using MODIS to evaluate heterogeneity of biomass burning in southern African savannahs: a case study in Etosha. International Journal of Remote Sensing, 26(19), 4219-4237.

Anderson, H. E. (1982). Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. Gen. Tech. Rep. INT-122. Ogden, Utah: US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 22p., 122.

Andrews, P. L., Cruz, M. G., & Rothermel, R. C. (2013). Examination of the wind speed limit function in the Rothermel surface fire spread model. International Journal of Wildland Fire, 22(7), 959-969.

Aussel, A. (2018). Élaboration d'une typologie des habitats de Guinée adaptée aux études d'impact environnemental- cel.archives-ouvertes.fr

BAH, E. M., & KOUROUMA, E. P. K. (2009). Quatrième Rapport National sur la mise en œuvre de la Convention sur la diversité biologique en Guinée. Ministère de l'Environnement et du Développement Durable, Rapport final- cbd.int.

Bah, M., Thiam, A., Keita, A., Sylla, S., Barry, M. H., & Lauriault, J. (1997). Monographie nationale sur la diversité biologique. GF-1605-92-74 PNUE. Ministère des Travaux Publics et de L'environnement et Direction Nationale de L'environnement. République de Guinée. 147 pp (unpublished) Google Scholar.

Barry, M. B., Badiane, D., Sall, S. M., Balde, M. L., Millimono, T., Diaby, I., & Diallo, D. (2015). Apport d'une méthode de détection et d'estimation des surfaces brulées par imagerie modis: application aux savanes guinéennes. Revue scientifique de l'université Julius N'yéréré de Kankan-hal.archives-ouvertes.fr

Basiliu, M. (2016). Modélisation du comportement des feux de forêt pour des outils d'aide à la décision (Mémoire de thèse, Université de CORSE PASCAL PAOLI-UMR CNRS 6134 SPE).

Billaud, Y. (2011). Modélisation hybride stochastique-déterministe des incendies de forêts (Doctoral dissertation, Thèse de Doctorat de l'Université de Provence)- sft.asso.fr.

Blin, P. (1974). Le Vent. Revue Forestière Française. Numero Special—Les Incendies de Forêts, 130-139.

Boschetti, L., Roy, D., & Hoffmann, A. A. (2009). MODIS Collection 5 Burned Area Product-MCD45. User's Guide, Ver, 2. - modis-fire.umd.edu.

Bowman, W. D., Theodose, T. A., & Fisk, M. C. (1995). Physiological and production responses of plant growth forms to increases in limiting resources in alpine tundra: implications for differential community response to environmental change. Oecologia, 101(2), 217-227.

Brunelle, É. (2007). Analyse et calibration d'un modèle multi-échelle pour la simulation de feux de forêt- papyrus.bib.umontreal.ca.

Bruzon, V. (1994). Les pratiques du feu en Afrique subsaharienne: exemples des milieux savanicoles de la Centrafrique et de la Côte d'Ivoire. ISBN 2-7099-1228-7

Burley, J. (2002). La diversité biologique forestière: tour d'horizon. Unasylva, 53(2), 3-10.

Camara, A. A., Dugué, P., & De Foresta, H. (2012). Transformation des mosaïques de forêtsavane par des pratiques agroforestières en Afrique subsaharienne (Guinée et Cameroun). Cybergeo: European Journal of Geography.

Chandler, C., Cheney, P., Thomas, P., Trabaud, L., & Williams, D. (1983). Fire in forestry. Volume 1. Forest fire behavior and effects. Volume 2. Forest fire management and organization. John Wiley & Sons, Inc. - ci.nii.ac.jp.

Cheick Fantamady Conde. (2017). Histoire de Siguiri. De l'implémentation coloniale à l'indépendance (1888-1958), L'Harmattan Guinée, 300 p. (ISBN 9782140033964)

Cochrane, M. A., Alencar, A., Schulze, M. D., Souza, C. M., Nepstad, D. C., Lefebvre, P., & Davidson, E. A. (1999). Positive feedbacks in the fire dynamic of closed canopy tropical forests. Science, 284(5421), 1832-1835.

De Boer, W., Duyts, H., & Laanbroek, H. J. (1989). Urea stimulated autotrophic nitrification in suspensions of fertilized, acid heath soil. Soil Biology and Biochemistry, 21(3), 349-354.

De l'Anses, A. (2012). Effets sanitaires liés à la pollution générée par les feux de végétation à l'air libre.

Devineau, J. L., Fournier, A., & Nignan, S. (2010). 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, 74(9), 1092-1101.

Dolidon, H. (2007). La multiplicité des échelles dans l'analyse d'un phénomène d'interface nature/société. L'exemple des feux de brousse en Afrique de l'ouest. Cybergeo: European Journal of Geography-journals.openedition.org.

Drissi, M., BILLAUD, Y., KAISS, A., & PORTERIE, B. (2013). Un modèle de propagation de feux de végétation à grande échelle (Doctoral dissertation, thèse de doctorat, Université de Provence-Aix-Marseille I).

Drissi, M. (2014). Modelling the spreading of large-scale wildland fires. arXiv preprint arXiv:1402.6187.

Dupuy, J. L. (1997). Mieux comprendre et prédire la propagation des feux de forêts: expérimentation, test et proposition de modèles (Doctoral dissertation, Lyon 1).

Ellicott, E., Vermote, E., Giglio, L., & Roberts, G. (2009). Estimating biomass consumed from fire using MODIS FRE. Geophysical Research Letters, 36(13).

Eva, H., & Fritz, S. (2003). Examining the potential of using remotely sensed fire data to predict areas of rapid forest change in South America. Applied Geography, 23(2-3), 189-204.

Finney, M. A. (1998). FARSITE: Fire Area Simulator-model development and evaluation. Res. Pap. RMRS-RP-4, Revised 2004. Ogden, UT: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 47 p., 4.

Finney, M. A. (2004). FARSITE: Fire Area Simulator–Model Development and Evaluation, United States Department of Agriculture Forest Service Rocky Mountain Research Station Research Paper. RMRS-RP-4 Revised March 1998, revised February.

Forghani, A., Cechet, B., Radke, J., Finney, M., & Butler, B. (2007, July). Applying fire spread simulation over two study sites in California lessons learned and futures plans. In Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007. IGARSS 2007. IEEE International (pp. 3008-3013). IEEE.

Fournier, A., & Yaméogo, U. (2007). Pourquoi et comment utiliser le feu comme outil de gestion en savane. in. CORUS 2 L'homme dans son environnement.

Frandsen W.H. (1971). Fire spread through porous fuels from the conservation of energy. Combust Flame 16: 9-16.

FROST, G. (2006). Origines, impacts, effets et maîtrise du feu dans les zones boisées d'Afrique Australe. PGH Frost - 2001 - fao.org.

Giglio, L., Descloitres, J., Justice, C. O., & Kaufman, Y. J. (2003). An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. Remote sensing of environment, 87(2), 273-282.

Gleason, A. C., Prince, S. D., Goetz, S. J., & Small, J. (2002). Effects of orbital drift on land surface temperature measured by AVHRR thermal sensors. Remote Sensing of Environment, 79(2-3), 147-165.

Grégoire, J.-M., Tansey, K., and Silva, J. M. N. (2003). The GBA-2000, Iinitiative Developping a global burned area database from SPOT-VEGETATION imagery, Int. J. Remote Sens., 24 (6), 1396-1376.

Grishin, A. M. (1997). Mathematical modeling of forest fires and new methods of fighting them. Publishing house of the Tomsk state university.

Guillard, K., & Allinson, D. W. (1989). Seasonal variation in chemical composition of forage Brassicas. II. Mineral imbalances and antiquality constituents. Agronomy journal, 81(6), 881-886.

Hargrove, W. W., Gardner, R. H., Turner, M. G., Romme, W. H., & Despain, D. G. (2000). Simulating fire patterns in heterogeneous landscapes. Ecological modelling, 135(2-3), 243-263.

Hottel, H. C., Williams, G. C., & Steward, F. R. (1965, January). The modeling of firespread through a fuel bed. In Symposium (International) on Combustion (Vol. 10, No. 1, pp. 997-1007). Elsevier.

Hély, C., Dowty, P. R., Alleaume, S., Caylor, K. K., Korontzi, S., Swap, R. J., ... & Justice,C. O. (2003). Regional fuel load for two climatically contrasting years in southern Africa.Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 108(D13).

Hisard, P. (1980). Observation de réponses de types El Niño dans l'Atlantique tropical oriental Golfe de Guinée. Oceanologica Acta, 3(1), 69-78.

IPCC, **2007**. Climate Change 2007. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II & III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental panel on climate change, 2007, p. 45-54.

Jacquin, A., Sheeren, D., & Lacombe, J. P. (2010). Vegetation cover degradation assessment in Madagascar savanna based on trend analysis of MODIS NDVI time series. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 12, S3-S10.

Jin, M., & Treadon, R. E. (2003). Correcting the orbit drift effect on AVHRR land surface skin temperature measurements. International Journal of Remote Sensing, 24(22), 4543-4558.

Justice, C. O., Kendall, J. D., Dowty, P. R., & Scholes, R. J. (1996). Satellite remote sensing of fires during the SAFARI campaign using NOAA advanced very high resolution radiometer data. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 101(D19), 23851-23863.

Kane, R. (1995). Suivi satellitaire des feux en Guinée et de l'impact des campagnes de sensibilisation de la radio rurale.

Kane, R. (1998). - Pour une meilleure maîtrise des feux de brousse en Afrique. CSE, Dakar. 14 p.

K. b. dje, K. R. Nguessan et K. J. Kouadi (2015). Conditions de la sécheresse et stratégies de leur gestion en Côte d'Ivoire-http://www.droughtmanagement.info/wp-content/uploads/2016/10/WS6-Cote-DIvoire FR.pdf.

Kokou, K. (2009). Etat des lieux sur la flore et les herbiers d'Afrique Occidentale Francophone. Ann. Univ. Lomé (Togo), série Sciences, 18, 73-87.

Konare, A., Zakey, A. S., Solmon, F., Giorgi, F., Rauscher, S., Ibrah, S., & Bi, X. (2008). A regional climate modeling study of the effect of desert dust on the West African monsoon. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 113(D12).

Kourtz, P. H., & O'Regan, W. G. (1971). A Model a Small Forest Fire... to Simulate Burned and Burning Areas for Use in a Detection Model. Forest Science, 17(2), 163-169.

Kumar, S. S., Roy, D. P., Boschetti, L., & Kremens, R. (2011). Exploiting the power law distribution properties of satellite fire radiative power retrievals: A method to estimate fire radiative energy and biomass burned from sparse satellite observations. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 116(D19)

Larini, M., Giroud, F., Porterie, B., & Loraud, J. C. (1998). A multiphase formulation for fire propagation in heterogeneous combustible media. International Journal of Heat and Mass Transfer, 41(6-7), 881-897.

Laris, P., & Bakkoury, A. (2008). Nouvelles leçons d'une vieille pratique: Mosaïque du feu dans la savane du Mali. BOIS & FORETS DES TROPIQUES, 296(296), 5-16.

Lopez Blanco, E. (2014). Assessing the Potential of Embedding Vegetation Dynamics into a Fire Behaviour Model: LPJ-GUESS-FARSITE. Lund University GEM thesis series. lup.lub.lu.se.

Margerit, J. (1998). Modélisation et simulations numériques de la propagation de feux de forêts (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Lorraine-INPL)-tel.archivesouvertes.fr **Margerit, J., & Séro-Guillaume, O. (2002)**. Modelling forest fires. Part II: reduction to twodimensional models and simulation of propagation. International Journal of Heat and Mass Transfer, 45(8), 1723-1737.

Mbow, C. (2000). Caractéristiques spatio-temporelles des feux de brousse et de leur relation avec la végétation dans le parc national du Niokolo Koba (sud-est du Sénégal)- agris.fao.org.

Mbow, C., Goïta, K., & Bénié, G. B. (2004). Spectral indices and fire behavior simulation for fire risk assessment in savanna ecosystems. Remote Sensing of Environment, 91(1), 1-13.

McArthur, A. G. (1966). Weather and grassland fire behaviour. Forestry and Timber Bureau, Department of national Development, Commonwealth of Australia.

Mell, W., Jenkins, M. A., Gould, J., & Cheney, P. (2007). A physics-based approach to modelling grassland fires. International Journal of Wildland Fire, 16(1), 1-22.

Mertens, B., & Lambin, E. F. (1997). Spatial modelling of deforestation in southern Cameroon: spatial disaggregation of diverse deforestation processes. Applied Geography, 17(2), 143-162.

Millimono, T. N., Sall, S. M., Badiane, D., Bah, A., Diakhate, M., Toure, I., ... & Diaby, I. (2017). Analysis of bushfires spatial and temporal variability in Guinea. Atmospheric and Climate Sciences, 7(04), 463.

Mistry, J., & Berardi, A. (Eds.). (2006). Savannas and dry forests: linking people with nature. Ashgate Publishing, Ltd; based in Farnham (Surrey, United Kingdom).

Mohamed, D. (2013). Un modèle de propagation de feux de végétation à grande échelle (Doctoral dissertation, Université de Provence-Aix-Marseille I).

Monénembo, T. (2009). Le roi de Kahel. Le Seuil.

Monnier, Y. (1968). Les effets des feux de brousse sur une savane préforestière de Côted'Ivoire. Direction de la recherche scientifique Ministère de l'éducation nationale de la République de Côte-d'Ivoire.

Monnier, Y. (1981). La poussière et la cendre, Paris, Agence de Coopération Culturelle et technique, 253 p.

Morvan, D., Meradji, S., & Accary, G. (2009). Physical modelling of fire spread in grasslands. Fire Safety Journal, 44(1), 50-61.

Naftaly, U., Schwartz, M., Aharony, A., & Stauffer, D. (1991). The granular fracture model for rock fragmentation. Journal of Physics A: Mathematical and General, 24(19), L1175.

Naylor, T. H., & Finger, J. M. (1967). Verification of computer simulation models. Management science, 14(2), B-92.

Nelson, R. (1997). Modeling forest canopy heights: The effects of canopy shape. Remote Sensing of Environment, 60(3), 327-334.

Nepstad, D. C., Alencar, A. A., & Moreira, A. G. (1999). Flames in the rain forest: origins, impacts and alternatives to Amazonian fire (p. 190). Rain Forest Unit, The World Bank.

Nielsen, T. T., Mbow, C., & Kane, R. (2002). A statistical methodology for burned area estimation using multitemporal AVHRR data. International Journal of Remote Sensing, 23(6), 1181-1196.

Pastor, E., Zárate, L., Planas, E., & Arnaldos, J. (2003). Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour. Progress in Energy and Combustion Science, 29(2), 139-153.

Perry, G. L. W. (1998). Current approaches to modelling the spread of wildland fire: a review. Progress in Physical Geography, 22(2), 222-245

Poilecot, P., & Loua, N. S. (2009). Les feux dans les savanes des monts Nimba, Guinée. BOIS& FORETS DES TROPIQUES, 301(301), 51-66.

Porterie, B., Zekri, N., Clerc, J. P., & Loraud, J. C. (2007). Modeling forest fire spread and spotting process with small world networks. Combustion and Flame, 149(1-2), 63-78.

Prihodko, L., & Goward, S. N. (1997). Estimation of air temperature from remotely sensed surface observations. Remote Sensing of Environment, 60(3), 335-346.

Rothermel, R. C. (1972). A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels.

Roy, D. P., Boschetti, L., Justice, C. O., & Ju, J. (2008). The collection 5 MODIS burned area product—Global evaluation by comparison with the MODIS active fire product. Remote Sensing of Environment, 112(9), 3690-3707.

Sayre, R. G., Comer, P., Hak, J., Josse, C., Bow, J., Warner, H., ... & Amena, R. (2013). A new map of standardized terrestrial ecosystems of Africa. African Geographical Review.

Sharman, M. (1987). Végétation ligneuse sahélienne. The Global Environment Monitoring System, GEMS, série Sahel, (7).

Savadogo, P., Sawadogo, L., Tiveau, D. (2007), Effects of grazing intensity and prescribed fire on soil physical and hydrological properties and pasture yield in the savanna woodlands of Burkina Faso. Agriculture, Ecosystems and Environment 118, 80-92.

Sawadogo, L. (2007). Adapter les approches de l'aménagement durable des forêts sèches aux aptitudes sociales, économiques et technologiques en Afrique: le cas du Burkina Faso. Cifor. P. 6-17.

Scott, J. H., & Burgan, R. E. (2005). Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-153. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 72 p., 153.

Sébastien Caillault. (2011), Le feu, la brousse et la savane. Modélisation spatiale de la dynamique des paysages soudaniens (Burkina Faso) (Doctoral dissertation) - hal.laas.fr.

Sow Momadou (2013), Caractérisation du risque de feu de brousse dans les savanes du Sénégal par approche expérimentale et par télédétection (Thèse de doctorat) <u>http://www</u>. secheresse.info/spip.php?article54282.

Sullivan, A.L. (2008). A review of wildland fire spread modelling, 1990-present. ArXiv. Thomas PH, Pickard RW. Fire spread in forests and heathland materials. Report Forest Research-tel.archives-ouvertes.f

Sullivan, A. L. (2009). Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 2: Empirical and quasi-empirical models. International Journal of Wildland Fire, 18(4), 369-386.

Tansey, K., Grégoire, J. M., Defourny, P., Leigh, R., Pekel, J. F., van Bogaert, E., & Bartholomé, E. (2008). A new, global, multi-annual (2000–2007) burnt area product at 1 km resolution. Geophysical Research Letters, 35(1).

Téphany, H. (1997). Modèles expérimentaux de combustion sur milieux hétérogènes aléatoires (Doctoral dissertation, Poitiers).

Thonat, T. (2013). Etude des feux de biomasse tropicaux : observation simultanée des gaz émis par les feux à l'aide des observations hyperspectrales de AIRS et IASI (Doctoral dissertation, Palaiseau, Ecole polytechnique) <u>http://ara.abct.lmd.polytechnique.fr/thesis/2013_these_thonat.pdf</u>.

Trabaud, L. (1974). Experimental study on the effects of prescribed burning on a Quercus coccifera L. garrigue. Early results. Proc. Ann. Tall Timbers Fire Ecol. Conf., 13 : 97-129.

Trabaud, L. (1992). Réponses des végétaux ligneux méditerranéens à l'action du feu. Pirineos, 140, 89-107.

Traoré, P. C. S., Rover, A., & Goïta, K. (1997). Land surface temperature time series derived from weekly AVHRR GVI composite datasets: Potential and constraints for northern latitudes. Canadian journal of remote sensing, 23(4), 390-400.

Trollope, W. S. W., Trollope, L. A., Potgieter, A. L. F., & Zambatis, N. (1996). SAFARI-92 characterization of biomass and fire behavior in the small experimental burns in the Kruger National Park. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 101(D19), 23531-23539.

Turvey, N. D., & Smethurst, P. J. (1994). Soil types as classes for managing the nutrient status of planted Pinus radiata in Victoria, Australia. Australian Forestry, 57(4), 148-156.

Ulam, S. (1958). John von Neumann 1903-1957. Bulletin of the American mathematical society, 64(3), 1-49.

Valea, F., & Ballouche, A. (2012). Les feux de brousse en Afrique de l'Ouest: contraintes environnementales ou outil de gestion environnementale? L'exemple du Burkina Faso. Territoires d'Afrique, 3, 36-47.

Van Der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., Gobron, N., & Dolman, A. J. (2008). Climate controls on the variability of fires in the tropics and subtropics. Global Biogeochemical Cycles, 22(3). Van Wilgen, B. W., Govender, N., Biggs, H. C., Ntsala, D., & Funda, X. N. (2004). Response of savanna fire regimes to changing fire-management policies in a large African national park. Conservation Biology, 18(6), 1533-1540.

Vermote, E., Ellicott, E., Dubovik, O., Lapyonok, T., Chin, M., Giglio, L., & Roberts, G. J. (2009). An approach to estimate global biomass burning emissions of organic and black carbon from MODIS fire radiative power. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 114(D18).

Von Neumann, J., & Burks, A. W. (1966). Theory of self-reproducing automata. IEEE Transactions on Neural Networks, 5(1), 3-14.

Watts, D. J., & Strogatz, S. H. (1998). Collective dynamics of 'small-world'networks. nature, 393(6684), 440.

Wilson, R. (1980). Reformulation of forest fire spread equations in SI units (Vol. 292). Dept. of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.

Yeaton, R. I., Frost, S., & Frost, P. G. H. (1986). Direct gradient analysis of grasses in a savanna. South African Journal of Science- agris.fao.org.

Yergeau, M. (1983). Teledetection, feu de brousse et dynamique de la vegetation apres feu, Volta Rouge-Haute-Volta. CRTO. Burkina Faso (mimeo), 18 pp Google Scholar.

Webographie

- 1. CURIOSO POR NATURALEZA [Internet]. [cité 10 déc 2019]. Disponible sur: http://curioso-por-naturaleza.blogspot.com//2017/07/mundo-incendios-forestales-elritmo-es.html)
- Mobilisation des cueilleurs de miel de Parawol et Lafou (Guinée) pour la protection de l'environnement - Médiaterre [Internet]. [cité 12 déc 2019]. Disponible sur: https://www.mediaterre.org/afrique-ouest/actu,20180912070330.html
- https://www.a-mla.org code forestier de la republique de guinée Recherche Google [Internet]. [cité 10 déc 2019]. Disponible sur: https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&sxsrf=ACYBGNTVd9zBFgOXBS
- (19) (PDF) IPCC, 2007. Climate Change 2007. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II & III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva [Internet]. ResearchGate. [cité 16 sept 2019]. Disponible sur: https://www.researchgate.net/publication/262260453_IPCC_2007_Climate_Change_2007

_Synthesis_Report_Contribution_of_Working_Groups_I_II_III_to_the_Fourth_Assessme nt_Report_of_the_Intergovernmental_Panel_on_Climate_Change_Geneva

- Kapsalaki M. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Internet]. Build Up. 2015 [cité 12 déc 2019]. Disponible sur: https://www.buildup.eu/en/practices/publications/ipcc-2014climate-change-2014-mitigation-climate-change-contribution-working
- Keïta FK. Faranah : plusieurs cases et bien matériels partis en fumée [Internet]. Guinéenews©. 2019 [cité 10 déc 2019]. Disponible sur: https://www.guineenews.org/faranah-plusieurs-cases-et-bien-materiels-partis-en-fumee/
- 7. Relief et végétation de la Guinée [Internet]. [cité 12 déc 2019]. Disponible sur: http://diakadi.com/afriquedelouest/pays/guinee/infos/vege.htm
- Les mines en Guinée au centre de toutes les convoitises | Afrique | DW | 20.09.2019 [Internet]. [cité 12 déc 2019]. Disponible sur: https://www.dw.com/fr/les-mines-enguin%C3%A9e-au-centre-de-toutes-les-convoitises/a-50502012
- 9. LP DAAC [Internet]. [cité 12 déc 2019]. Disponible sur: https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/get_data/data_pool/
- 10. Active Fire Data | Earthdata [Internet]. [cité 12 déc 2019]. Disponible sur: https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/firms/active-fire-data
- 11. EarthExplorer Home [Internet]. [cité 12 déc 2019]. Disponible sur: https://earthexplorer.usgs.gov/
- 12. Météo Siguiri meteoblue [Internet]. [cité 12 déc 2019]. Disponible sur: https://www.meteoblue.com/fr/meteo/semaine/siguiri_guin%c3%a9e_2415703
GLOSSAIRE

-Albédo : Fraction ou proportion de la lumière que réfléchit ou diffuse un corps non lumineux.

-Algorithme : ensemble fini d'opérations à exécuter, dans un ordre fixé, en vue d'obtenir un résultat déterminé.

-Capteur : instrument qui capte ou reçoit de l'énergie excitante provenant de la scène visée et délivre un signal électrique correspondant et mesurable.

-Détecteur: élément du capteur qui transforme le rayonnement (généralement électromagnétique) reçu en un signal qui dévient analysable mathématiquement, ou perceptible par l'œil humain.

-Pixel : plus petit élément homogène constitutif d'une image enregistrée, définie par les dimensions de maille d'échantillonnage.

-Radiométrie : technique dont le sujet d'étude est la mesure de l'intensité du rayonnement électromagnétique.

-Rayonnement électromagnétique (ou radiation électromagnétique) : c'est une forme d'énergie qui ne se manifeste que dans son interaction avec la matière. Elle se comporte comme un champ de force dont les variations affectent les propriétés électriques et magnétiques de la matière. Il se caractérise par une période, une fréquence, une vitesse de propagation, une longueur d'onde et une amplitude.

-Résolution spatiale: Plus petite dimension d'un objet détectable par le capteur. C'est une mesure de la finesse des détails d'une image permettant de déterminer la dimension du plus petit détail observable.

ANNEXES

Validation et publication des résultats



Travaux de terrain (sondage auprès de la population et validation des données)

Articles publiés:

 Millimono, T., Sall, S., Badiane, D., Bah, A., Diakhate, M., Toure, I., Barry, M., Diallo, D. and Diaby, I. (2017). Analysis of Bushfires Spatial and Temporal Variability in Guinea. Atmospheric and Climate Sciences, 7, 463-475. doi: 10.4236/acs.2017.74034.

 MILLIMONO, T. N., BADIANE, D., DIAKHATE, M., BAH, A., SALL, S. M., TOURE, I., & DIABY, I. (2019). Bushfires spread modelling over Malea in Northeastern Guinea. African Journal of Environmental Science and Technology, 13(4), 135-148.

Contribution à l'étude des feux de brousse en Guinée : approches par observation satellitaire et par modélisation

RESUME

Les feux de brousse sont des phénomènes qui impactent négativement les ressources naturelles et contribuent aux changements climatiques. Ce travail porte sur la contribution à l'étude des feux de brousse en Guinée par des observations satellitaires et par la modélisation. Les images satellitaires MODIS bi-journalières et mensuelles (1km de résolution pour les feux actifs et de 500m pour les surfaces brûlées), Landsat et SRTM de 30m de résolution ainsi que des données météorologiques des stations synoptiques de Guinée et celles en lignes ont été utilisées.

Pour l'analyse de la variabilité des feux, les pixels de feu MODIS classés sur une échelle de fiabilité ou intervalle de confiance de 1 à 100 ont été sélectionnés par seuillage et les valeurs comprises entre 75 et 100 de cette échelle ont été retenues et considérées comme des pixels de feu avéré. Le maillage carré avec transfert de valeur de ces pixels retenus a permis de produire des cartes de densité de feu. Le calcul et la distribution des surfaces brûlées par préfecture ont été faits par superposition des images MODIS avec la carte administrative de la Guinée. Une interpolation des pixels de feu pour la saison 2007-2008 par krigeage ordinaire et une superposition avec des données de pluie sur la période 2003-2013 ont permis d'observer la dynamique saisonnière des feux en Guinée. L'outil de modélisation FARSITE (Fire Area Simulator) a permis de simuler la propagation des feux à Maléa. Le modèle a été calibré en intégrant les paramètres de la végétation, de la topographie et de la météo de Siguiri. Le temps de brûlage et les points d'ignition ont été fixés tout en admettant des scénarios à savoir: la propagation du feu sans vent, ni pente ; avec pente et avec vent.

Les résultats montrent les densités atteignant 100 pixels de feu au 100 $\rm km^2$ par an, avec près de 6000 $\rm km^2$ brûlés par an en Guinée. Les occurrences élevées des feux s'observent entre décembre et février et les années 2007, 2008, 2009 et 2014 ont été les plus marquées par ces feux sur la période 2003-2016. Le record sur les occurrences des feux est observé sur les préfectures de la haute Guinée et dépendrait des conditions climatiques et des activités humaines. La modélisation a permis de montrer que les feux dans les savanes de Maléa, sous l'effet du vent atteignent une vitesse de propagation de 8,6m/min, soit 0,516km/h et produisent une chaleur de l'ordre de 3.10⁴ KJ/m² avec une intensité de réaction de l'ordre de 2.10³KW/m.

Les feux étant des phénomènes très dynamiques dans le temps et dans l'espace, leur suivi et l'étude de leurs caractéristiques sur des échelles plus fines seraient nécessaire pour la compréhension de la dynamique des écosystèmes guinéens.

Mots clés : *Feux de brousse, observations satellitaires, FARSITE, modélisation, écosystème, Guinée.*

Mots clés : *Feux de brousse, observations satellitaires, FARSITE, modélisation, écosystème, Guinée.*

ABSTRACT

Bushfires are phenomena that negatively impact natural resources and contribute to climate change. This work focuses on the contribution to the study of bush fires in Guinea using satellite observations and modeling. The data used are bi-daily and monthly MODIS satellite images (1km resolution for active fires and 500m for burned surfaces), Landsat and SRTM with 30m resolution. The weather data of the synoptic stations of Guinea and those in lines.

For the analysis of fire variability, MODIS fire pixels classified on a reliability scale or confidence interval of 1 to 100 were selected by thresholding and values between 75 and 100 of this scale were selected and considered as valid fire pixels. The square mesh with transfer of value of these selected pixels made it possible to produce maps of density of fire. The calculation and distribution of surfaces burned by prefecture were made by superimposing the MODIS images with the administrative map of Guinea. An interpolation of the fire pixels for the 2007-2008 season by ordinary kriging and an overlay with rain data over the period 2003-2013 made it possible to observe the intra-seasonal dynamics of the fires in Guinea. The FARSITE (Fire Area Simulator) modeling tool simulated the spread of fires in Maléa. The model was calibrated by integrating the vegetation, topography and weather parameters of Siguiri. The burning time and the ignition points were fixed while admitting scenarios namely: the spread of fire without wind or slope; with slope and with wind.

The results show densities of up to 100 fire pixels per 100km2 per year, with nearly 6000 km2 burned per year in Guinea. The high occurrences of fire are observed between December and February and the years 2007, 2008, 2009 and 2014 were the most marked by these fires over the period 2003-2016. The utmost of fire occurrences is observed in the prefectures of Upper Guinea and would depend on climatic conditions and human activities. The FARSITE simulation has shown that fires in the Maléa savannas, With the wind effect reach a propagation speed of 8,6m/min, or 0,516km/h and produce a heat of about 3.10^4 KJ/m^2 with a reaction intensity of the order of 2.10^3KW/m .

As fires are very dynamic phenomena in time and space, their monitoring and the study of their characteristics on finer scales would be necessary to understand the dynamics of Guinean ecosystems.

Key words: Bush fires, satellite observations, modeling, FARSITE, ecosystem, Guinea.