
Analise de la mise en Suvre des stratégies de lutte co Madagascar : cas de la région Sofia

Auteur : Rarivomanana, Hanitriniaina Tahina

Promoteur(s) : Djaby, Bakary

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master de spécialisation en sciences et gestion de l'environnement dans les pays en développement

Année académique : 2016-2017

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/3372>

Avertissement à l'attention des usagers :

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

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



ULg - Faculté des Sciences - Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

UCL - Faculté des bioingénieurs

**ANALYSE DE LA MISE EN ŒUVRE DES STRATEGIES DE
LUTTE CONTRE LES FEUX A MADAGASCAR :
CAS DE LA REGION SOFIA**

HANITRINIAINA TAHINA RARIVOMANANA

**MEMOIRE PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER DE SPECIALISATION EN SCIENCES ET GESTION DE L'ENVIRONNEMENT
DANS LES PAYS EN DEVELOPPEMENT**

OPTION : NATURE ET TERRITOIRE

ANNEE ACADEMIQUE 2016-2017

PROMOTEUR : DR. BAKARY DJABY

« Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de l'Université de Liège et de l'Université catholique de Louvain. * L'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre(s) du personnel enseignant de l'ULg et/ou de l'UCL ».*

Le présent document n'engage que son auteur

« Auteur du présent document : RARIVOMANANA Hanitriniaina Tahina, r_annitrah@yahoo.fr »



ULg - Faculté des Sciences - Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

UCL - Faculté des bioingénieurs

**ANALYSE DE LA MISE EN ŒUVRE DES STRATEGIES DE
LUTTE CONTRE LES FEUX A MADAGASCAR :
CAS DE LA REGION SOFIA**

HANTRINIAINA TAHINA RARIVOMANANA

**MEMOIRE PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER DE SPECIALISATION EN SCIENCES ET GESTION DE L'ENVIRONNEMENT
DANS LES PAYS EN DEVELOPPEMENT**

OPTION : NATURE ET TERRITOIRE

ANNEE ACADEMIQUE 2016-2017

PROMOTEUR : DR. BAKARY DJABY

REMERCIEMENTS

Le présent mémoire n'aurait pu être accompli sans la grâce et la bienveillance de Dieu qui m'a donné la force nécessaire tout au long de cette étude.

J'adresse mes remerciements à l'**ARES-CCD**, qui m'a octroyé une bourse d'études en vue d'accomplir le programme d'études en Master de spécialisation en sciences et gestion de l'environnement dans les pays en développement.

Je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué à l'accomplissement de ce travail, particulièrement envers :

- Mon promoteur Dr Bakary DJABY, qui malgré ses nombreuses occupations, a accepté de me guider dans la réalisation de ce travail. Soyez assuré de ma profonde gratitude.
- Les membres de jury constitués par Monsieur Antoine DENIS et Madame Marie LANG, qui ont acceptés d'être les lecteurs de cet ouvrage malgré leurs multiples obligations. Veuillez accepter mes sincères remerciements pour l'honneur que vous me faites.

Mes remerciements vont aussi à l'encontre de tous les professeurs et tous les responsables pour leurs dévouements et leurs engagements pour la réussite de cette formation.

Je ne saurais oublier de citer tous les étudiants de cette promotion 2016-2017 pour avoir été une vraie équipe tout au long de cette année d'étude.

Enfin, je tiens très profondément à remercier ma famille, en particulier mon mari et mes deux fils, qui ont enduré mon absence pendant toute une année entière, et qui n'ont cessé de m'encourager et de prier pour moi.

A la mémoire de Dada et de Liantsiky, deux êtres chers que j'ai tristement perdu durant mon séjour en Belgique.

Merci infiniment !!!!

Hanitra

RESUME

A Madagascar, les feux de brousse constituent un phénomène récurrent et contribuent à la dégradation des ressources naturelles. La présente étude a été entreprise dans la région Sofia dans le but d'analyser la mise en œuvre des stratégies de lutte contre les feux. En effet, la région Sofia est particulièrement atteinte par ce fléau chaque année. Ainsi, ce travail analyse la dynamique spatio-temporelle des feux ; l'occupation du sol par rapport aux données des feux ; et les stratégies de feux adoptées. Il exploite six (06) années de séries temporelles de feux actifs et de surfaces brûlées issues des produits Modis Active fires MCD14ML et Modis Burned area MCD60A1 pour la période allant de 2010 à 2015. La méthodologie se base sur l'évaluation de la saisonnalité et des occurrences des feux, et sur l'évolution spatio-temporelle des feux. L'analyse des données a ressorti qu'en moyenne, la saison des feux se situe entre les mois d'avril à décembre, correspondant généralement à la saison sèche. Les paramètres climatiques : la température maximale, l'humidité relative et la précipitation influencent donc la propagation des feux. Les feux les plus importants sont enregistrés en 2013. L'analyse spatiale montre que les superficies de feux plus importantes avec une occurrence plus significative sont retrouvées dans les districts de Port-Bergé et d'Antsohihy. Par ailleurs, l'occurrence des feux selon les différents types d'occupation, tirés de l'image satellitaire Globcover, a démontré que les formations savanicoles et prairies sont les plus touchées par les feux. Et enfin, l'analyse des différentes stratégies de lutte préventive et active a démontré l'insuffisance des mesures entreprises par rapport à l'ampleur des feux constatés à partir des données satellitaires. Compte tenu des analyses spatio-temporelles et des analyses des stratégies mises en œuvre jusqu'ici, le renforcement des mesures de lutte contre les feux, est à préconiser. Les mesures de lutte préventive sont essentielles pour la réussite de la lutte contre les feux à travers les sensibilisations et la mise en place des comités de lutte au niveau de chaque localité.

Mots-clés : feux de végétation, données MODIS, feux actifs, surfaces brûlées, occupation du sol, stratégies de lutte, région Sofia, Madagascar.

ABSTRACT

In Madagascar, bushfires are a recurring phenomenon and are contributing to the degradation of natural resources. This study has been undertaken in the Sofia region in order to analyse the implementation of firefighting strategies. Indeed, the Sofia region is particularly affected by this scourge every year. This work analyses the spatiotemporal dynamics of fires, the land use in relation to the fire data, and the fire strategies adopted. It exploits six (06) years time series of active fires and burnt surfaces from Modis Active fires MCD14ML and Modis Burned area MCD60A1 from 2010 to 2015. The methodology is based on the assessment of seasonality and the occurrence of fires as well as the spatiotemporal evolution of fires. The analysis of the data revealed that, on average, the fire season is between May and December, corresponding to the dry season. Therefore, the climatic parameters such as the maximum temperature, the relative humidity and the precipitation influence the propagation of the fire. The most important fires were recorded in 2013. The spatial analysis shows that the largest areas with the most significant fire occurrence are found in the districts of Port-Bergé and Antsohihy. Moreover, the occurrence of the fires according to the different types of occupation that have been taken from the Globcover satellite image showed that growing savanna and grassland are most affected by fires. Finally, the analysis of the various preventive and active strategies to fight the fires have demonstrated the inadequacy of the measures undertaken in relation to the magnitude of the fires observed on the basis of satellite data. Taking into account the spatial and temporal analysis, and the analysis of the strategies that have been implemented so far, the reinforcement of fire-fighting measures is highly recommended. Preventive control measures are essential to the success of the fight against fires through awareness raising and through the setting up of control committees at each local level.

Keywords: vegetation fires, MODIS data, active fires, burned areas, land cover, fighting strategies, Sofia region, Madagascar.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	i
RESUME	ii
ABSTRACT	iii
TABLE DES MATIERES	iv
LISTE DES CARTES	vi
LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTE DES PHOTOS	vii
LISTE DES FIGURES	viii
SIGLES ET ABREVIATIONS	ix
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1. GÉNÉRALITÉS SUR LES FEUX	5
1.1. Caractéristiques des feux.....	5
1.1.1. Définition.....	5
1.1.2. Typologie des feux.....	6
1.2. Situation des feux au niveau mondial	7
1.2.1. Statistique mondiale	7
1.2.2. Causes.....	8
1.2.3. Impacts	9
1.2.4. Feux et changement climatique	9
1.2.5. Stratégie de lutte	10
1.2.5.1. Cadre général de la stratégie	10
1.2.5.2. Mesures de lutte contre les incendies	11
1.3. Situation des feux à Madagascar	13
1.3.1. Statistique	13
1.3.2. Causes.....	13
1.3.3. Impacts	14
1.3.4. Stratégies de lutte à Madagascar.....	14
CHAPITRE 2. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE	16
2.1. Cadre physique	16
2.1.1. Situation géographique.....	16
2.1.2. Climat	17
2.1.3. Hydrologie	18
2.1.4. Relief et pédologie	18
2.1.5. Formations végétales.....	19
2.1.5.1. Caractéristiques	19

2.1.5.2. Pressions et menaces	21
2.2. Milieu humain.....	21
2.2.1. Démographie.....	21
2.2.2. Niveau d'instruction.....	22
2.2.3. Activités socio-économiques	22
CHAPITRE 3. METHODOLOGIE.....	23
3.1. Méthode de collecte de données	23
3.1.1. Revue bibliographique	23
3.1.2. Entretien	23
3.1.3. Acquisition des données satellitaires	23
3.1.3.1. Données sur les feux.....	23
3.1.3.2. Données climatiques.....	24
3.1.3.3. Données d'occupation du sol	24
3.1.4. Acquisition des données de terrain	24
3.2. Méthode de traitement des données.....	25
3.2.1. Traitement des images sur les feux	25
3.2.1.1. Feux actifs.....	25
3.2.1.2. Surfaces brûlées.....	26
3.2.2. Traitement des images sur l'occupation du sol.....	26
3.2.3. Traitement des données acquises sur terrain	27
3.3. Analyse statistique	27
3.3.1. Analyse de la saisonnalité	27
3.3.2. Analyse temporelle des feux.....	28
3.3.3. Analyse spatiale des feux	28
3.3.4. Analyse comparative de la dynamique des feux et de la couverture végétale	29
3.3.5. Analyse comparative de l'organisation spatio-temporelle des feux et des stratégies de lutte mises en œuvre.....	29
CHAPITRE 4. RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....	30
4.1. Evolution spatio-temporelle des feux	30
4.1.1. Saisonnalité des feux.....	30
4.1.1.1. Corrélation entre occurrences de feux actifs et paramètres climatiques	31
4.1.1.2. Corrélation entre surfaces brûlées et paramètres climatiques	33
4.1.2. Evolution temporelle des feux	34
4.1.3. Evolution spatiale des feux.....	35
4.2. Occurrences de feux en fonctions des types d'occupation de sol	42
4.3. Analyse des stratégies de lutte contre les feux	46
4.3.1. Sensibilisation en matière de lutte contre les feux de brousse.....	46
4.3.2. Mise en place de comités de lutte contre les feux.....	48
4.3.3. Transfert de gestion des ressources naturelles.....	49
4.3.4. Mesure répressive	50
4.3.5. Lutte active	51

4.3.6. Etablissement des rapports sur les feux.....	51
4.3.7. Mesures de conservation : AP et NAP.....	52
4.3.8. Reboisement	52
4.3.9. Acteurs en matière de lutte contre les feux.....	53
4.4. Discussions	53
4.4.1. Discussions sur l'analyse de la dynamique spatio-temporelle des feux.....	53
4.4.2. Discussions sur l'analyse de l'occupation du sol.....	55
4.4.3. Discussions sur l'analyse des stratégies de lutte contre les feux	56
4.5. Propositions/recommandations.....	57
4.5.1. Stratégie de prévention.....	57
4.5.2. Stratégie d'intervention	59
CONCLUSION.....	60

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES

RESUME

LISTE DES CARTES

Carte 1 : Carte des risques connus liés aux changements climatiques.....	11
Carte 2 : Localisation géographique de la région Sofia.....	16
Carte 3 : Carte climatologique de Madagascar selon la classification de Köppen et Geiger ...	17
Carte 4 : Carte pédologique de la région Sofia	18
Carte 5 : Ecosystèmes naturels de la région Sofia en 2005	19
Carte 6 : Répartition spatiale des feux actifs 2010 et 2011	36
Carte 7 : Répartition spatiale des feux actifs 2012, 2013, 2014 et 2015	37
Carte 8 : Répartition spatiale des surfaces brûlées 2010, 2011, 2012 et 2013.....	38
Carte 9 : Répartition spatiale des surfaces brûlées 2014 et 2015.....	39
Carte 10 : Densité de feux par district durant la période 2010-2015	41
Carte 11 : Fréquence de feux par district durant la période 2010-2015.....	42
Carte 12 : Occupation du sol dans la région Sofia	43

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Superficie des districts dans la région Sofia	17
Tableau 2 : Part des cheptels porcin, ovin, caprin, volaille et bovin par district	22
Tableau 3 : Analyse de corrélation entre nombre de feux actifs et paramètres climatiques	31
Tableau 4 : Analyse de corrélation entre surfaces brûlées et paramètres climatiques	33
Tableau 4 : Récapitulatif des résultats concernant les feux	36
Tableau 6 : Nombre de feux actifs par occupation du sol	42
Tableau 7 : Densité des feux par type d'occupation du sol	45
Tableau 8 : Communautés de base et superficie gérée dans la région Sofia	49
Tableau 9 : Domaine Forestier National dans la région Sofia	52

LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : Déforestation par brûlage, pour mise en culture, Sud du Mexique.	8
Photo 2 : Incendie de forêt au Portugal en juin 2017 sur la nationale 236	9
Photo 3 : Forces armées canadiennes pour lutter contre les feux de forêt dans le Nord de la Saskatchewan : Opération LENTUS 2015-02	12
Photo 4 : Feux à Madagascar : (a) Culture sur brûlis ; (b) Feu sur savane dans la région Sofia	13
Photo 5 : Impacts des feux dans la région Sofia : (a) Ensablement de rizière ; (b) Erosion sur les bassins versants, à Ankaizina	14
Photo 6 : Journée de l'Agroécologie dans le Moyen Ouest de Madagascar.....	15
Photo 7 : Formations végétales dans la région Sofia	20
Photo 8 : Sensibilisations : (a) Focus group avec association féminine à Anjozoromadosy ; (b) Réunion villageoise à Ankazotokana	47
Photo 9 : Ankazotokana : (a) Membres de comités de lutte élus (b) Formation des comités de lutte par l'équipe de la DREEF Sofia	48
Photo 10 : (a) Mise en place de TGRN à Beandrarezona ; (b) Dotation de tenues pour les membres de COBA par WWF	49

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Les facteurs de départs et de propagation des feux	7
Figure 2 : Evolution du taux annuel de déforestation dans la région Sofia	21
Figure 3 : Variation mensuelle des points de feux actifs (cumul et moyenne) dans la région Sofia de 2010 à 2015	30
Figure 4 : Variation mensuelle des surfaces brûlées dans la région Sofia de 2010 à 2015	31
Figure 5 : Interrelation température maximale- nombre de feux actifs.....	32
Figure 6 : Interrelation humidité relative moyenne- nombre de feux actifs	32
Figure 7 : Interrelation précipitations – nombre de feux actifs.....	32
Figure 8 : Interrelation température maximale- surfaces brûlées.....	33
Figure 9 : Interrelation humidité relative moyenne- surfaces brûlées.....	33
Figure 10 : Interrelation précipitations- surfaces brûlées	34
Figure 11 : Evolution annuelle de feux actifs dans la région Sofia de 2010 à 2015	34
Figure 12 : Evolution annuelle de superficies brûlées dans la région Sofia de 2010 à 2015 ...	35
Figure 13 : Variation du nombre total de feux actifs par district de 2010 à 2015	39
Figure 14 : Variation de la surface brûlée annuelle par district de 2010 à 2015	40
Figure 15 : Détection de feux actifs en formation savanicole et en formation forestière.....	44
Figure 16 : Fréquence des feux par type d'occupation du sol	46
Figure 17 : Nombre de sensibilisations par rapport au nombre de feux actifs détectés	47
Figure 18 : Nombre de comités de lutte créés par rapport au nombre de feux actifs détectés ..	48
Figure 19 : Nombre de PV de délit sur les feux sauvages et défrichement par rapport au nombre de points de feux.....	50
Figure 20 : Superficies brûlées issues des données sur terrain et surfaces brûlées issues des données satellitaires.....	51
Figure 21 : Superficie reboisée dans la région Sofia (2010 – 2015).....	52
Figure 22 : Comparaison par mois du nombre des feux avec les surfaces brûlées	54
Figure 23 : Comparaison par an du nombre des feux avec les surfaces brûlées	54

SIGLES ET ABREVIATIONS

AEECL	: Association Européenne pour l'Étude et la Conservation des Lémuriens
AP	: Aire protégée
CAH	: Cadre d'Action de Hyogo
COBA	: Communauté de base
CREAM	: Centre de Recherches d'Etudes et d'Appui à l'analyse économique à Madagascar
DFN	: Domaine Forestier National
DREEF	: Direction Régionale de l'Environnement, de l'Ecologie et des Forêts
FAO	: Food and Agriculture Organization of the United Nations
FIRMS	: Fire Information for Resource Management System
FTM	: Foibe Taotsaritanin'i Madagasikara
GCF	: Gestion Contractualisée des Forêts
GES	: Gaz à Effet de Serre
INSTAT	: Institut National de la Statistique
MAAF	: Madagascar Aye-Aye Fund
MEEF	: Ministère de l'Environnement, de l'Ecologie et des Forêts
MNP	: Madagascar National Parks
MODIS	: Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer
NAP	: Nouvelle Aire Protégée
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
ONE	: Office National pour l'Environnement
ONU	: Organisation des Nations unies
TGRN	: Transfert de Gestion des Ressources Naturelles
TPF	: The Peregrine Fund
USAID	: United States Agency for International Development
WCS	: Wildlife Conservation Society
WWF	: World Wide Fund

INTRODUCTION

Contexte global

L'île de Madagascar est mondialement réputée pour sa grande richesse en biodiversité, abritant environ 5% de la biodiversité mondiale (MEEF, 2016). En 2010, la superficie couverte de forêts naturelles est évaluée à 9,2 millions d'hectare (ONE *et al.*, 2013). Située en zone tropicale, elle présente une diversité climatique liée à sa situation géographique et à son relief montagneux. Cette variété des conditions naturelles conditionne la répartition des différentes formations végétales. Mais au fil du temps, ces formations végétales ont été fortement dégradées ou remplacées par des formations secondaires résultant des activités humaines (Lowry *et al.*, 1998). Actuellement, les formes de dégradation et les destructions de la végétation sont très diversifiées.

D'une manière générale, le feu constitue, aussi bien en milieu tropical que méditerranéen, l'un des facteurs principaux de transformation et de dégradation du milieu naturel (Whelan, 1995). Dans les pays tropicaux, le feu est un phénomène inévitable et fait partie intégrante des pratiques agricoles et d'aménagement des savanes (André & Müller, 2008).

A Madagascar, le feu est également l'une des principales sources de dégradation des ressources naturelles (Rajaoson *et al.*, 1995 ; Bertrand *et al.*, 1998). Depuis longtemps, Madagascar a fait l'objet d'une destruction de la flore indigène par le feu et l'agriculture itinérante (Bartlett, 1955). Selon Masahiro en 2003, environ 20% de la forêt de la grande île sont ravagés par le feu et subissent des dégradations successives des sols.

Parmi les 22 régions de Madagascar, la région SOFIA est l'une des plus vastes, couvrant une superficie totale de 52,503 millions d'ha soit environ 8,5 % de la Grande Ile (CREAM, 2013). Malheureusement, avec les feux de brousse incessants et les cultures sur brûlis, ces forêts se trouvent dégradées ne laissant apparaître que de lambeaux forestiers bien localisés (CREAM, 2013). Les formations forestières y sont très diversifiées comprenant notamment les forêts denses humides, les forêts humides dégradées, les forêts denses sèches, les forêts sèches dégradées, les forêts sclérophylles, les forêts ripicoles et les mangroves (ONE, 2009). La superficie de forêts est évaluée à 1,249 millions d'ha, soit moins d'un quart de la superficie totale de la région, avec une évolution du taux annuel de déforestation estimée à 0,3% de 2005 à 2010 (CREAM, 2013).

Problématique

La pratique du feu est étroitement liée au mode de vie pratique sociale et culturelle, au mode de production, et surtout aux systèmes d'élevage et de culture, fortement ancrés dans la tradition malgache. Le feu est utilisé dans les activités agro-pastorales pour le maintien des zones de pâturages, la culture sur brûlis, le nettoyage des terres après la récolte ou pour la production de charbon (Kull, 2002). Ainsi, les feux de brousse de différentes origines répondent à des besoins spécifiques des populations (Ramahefamanana, 2012). Malgré les problèmes que le feu peut poser, il reste considéré comme positif par la population locale, ce qui rend sa gestion et son interdiction à travers des mesures législatives difficiles (Alvarado, 2012).

Madagascar, de par cette forme de pratique du feu depuis la royauté, subit de manières récurrentes des incendies surtout en saison sèche. Ainsi, le feu a été, de toujours, un problème persistant pour le patrimoine forestier à Madagascar. La situation est très critique tant au niveau national que régional (Masahiro, 2003). Le dégât occasionné par le feu de brousse est devenu une préoccupation nationale puisqu'il ne provoque pas seulement la destruction des ressources forestières et de l'agriculture mais accélère aussi le phénomène de changement climatique en dégageant des gaz à effet de serre. Au niveau agricole, par exemple, en 2000, l'érosion des sols, des terres arables et des éléments nutritifs, est estimée à 1,6 t/ha/an (Randrianasolo, 2013).

Particulièrement, la région Sofia, objet de notre étude, figure parmi les régions les plus touchées par ce fléau. En effet, elle subit de dégâts considérables dus aux feux de brousse chaque année. Durant la période de 2010 à 2015, la région Sofia, se plaçait au troisième rang sur les 22 régions de Madagascar parmi les plus touchées par les feux d'après le rapport de détection de feux 2010-2015 produit et sorti par le Service de reforestation et de lutte contre les feux en 2016 (Annexe 1).

Les principaux facteurs entraînant les feux et causant les problèmes environnementaux de la région sont surtout marqués par le renouvellement de pâturage, la culture sur brûlis suivi d'incinération non maîtrisée, le renouvellement du terrain à cultiver qui entraîne un feu incontrôlé, la mauvaise pratique des bouviers qui usent du feu pendant la saison sèche. Le problème de prise responsabilité à la lutte active contre les feux au niveau des terroirs ne fait qu'aggraver ce phénomène. D'autres facteurs indirects aggravent également cette situation tels que la difficulté d'application effective de la loi, l'insécurité comme le vol de bœuf lié

aux feux de brousse, l'insuffisance des contrôles en raison du faible effectif de l'agent forestier au niveau des cantonnements forestiers, ou encore le relâchement rapide du délinquant par le Tribunal dû à l'insuffisance de charge et la surpopulation carcérale.

De ce fait, les impacts des feux sont ressentis à tous les niveaux, du point de vue écologique, économique, et social. En effet, les feux engendrent parfois des dégâts irréversibles concernant la perte de la biodiversité, la perte du potentiel hydrique, le tarissement des sources d'eau, la perte de l'habitat, et le déséquilibre de l'écosystème.

Ces situations alarmantes suscitent l'intérêt de la gestion des feux, particulièrement des surfaces brûlées, qui est ainsi devenue un défi majeur pour la Région Sofia. Malgré les diverses actions réalisées au niveau de la Région Sofia en matière de lutte contre les feux de brousse (sensibilisation, lutte active contre les feux, répression des délinquants, reboisement), les actions restent vaines, et les feux persistent. Jusqu'à présent, les stratégies de lutte adoptées contre ce fléau n'ont donné que des résultats peu probants. Néanmoins, les acteurs pour la gestion des feux existent à tous les niveaux dans la région. Ces acteurs rassemblent les autorités régionales, les services déconcentrés, les forces de l'ordre et la Gendarmerie, les autorités communales, les communautés de base, les comités de lutte contre les feux, et les partenaires techniques et financiers.

Ainsi, la question se pose sur l'effectivité de la mise en œuvre des stratégies de la lutte contre les feux dans la région Sofia. Eu égard à ces conséquences multiples, il est impératif de définir une meilleure stratégie de gestion des feux de brousse pour la région. Cependant il est totalement difficile de gérer les feux sans connaissances préalables de l'extension de ces derniers (Chuvienco, 1996). Sans une compréhension correcte et claire de la distribution et la dynamique des feux, il est impossible de contrôler efficacement les événements de feu (Goldammer & de Ronde, 2004 ; Morissette *et al.*, 2005). La collection d'informations à l'échelle nationale ou régionale afin de quantifier les impacts et l'ampleur du phénomène, de détecter des tendances deviennent ainsi des urgences pour élaborer une stratégie de gestion efficace (FAO, 2006). D'où l'intérêt de cette étude afin de ressortir une meilleure stratégie de lutte contre les feux dans la région Sofia sur la base de l'analyse de la dynamique spatio-temporelle des feux combinée avec l'analyse des actions de lutte entreprises dans la zone durant la période de 2010 à 2015.

Objectifs

Objectif global

Compte tenu de la problématique, l'objectif principal consiste en une étude approfondie de la mise en œuvre des stratégies de lutte contre les feux adoptées au niveau de la région Sofia.

Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques qui en découlent sont :

- Analyser la dynamique spatio-temporelle des feux ;
- Analyser les stratégies de lutte contre les feux adoptées au niveau de la région Sofia ;
- Avancer des recommandations pour la réussite des stratégies de lutte contre les feux pour la région Sofia.

Hypothèses

Les hypothèses avancées sont les suivantes :

Hypothèse 1 : L'ampleur des feux varie en fonction des saisons et des paramètres climatiques

A Madagascar, l'utilisation des feux se fait durant toute l'année mais le nombre augmente considérablement lors de la saison sèche (Ralaimihoatra, 2008). Dans le cas de la Région Sofia, avec une période sèche très marquée d'avril à novembre (CREAM, 2013), les activités de feu y seront le plus rencontrées et surtout en fin de saison sèche. En effet, pendant cette période, les feux se propagent facilement et rapidement du fait que l'environnement est plus sec et la végétation devient donc plus inflammable (Rakotoarisoa, 2015).

Hypothèse 2 : La répartition spatiale des surfaces brûlées varie suivant l'occupation du sol

A Madagascar, les éclosions d'incendies sont principalement liées aux renouvellements de pâturage en savane et aux activités de culture sur brûlis en zones forestières (Rakotoarisoa, 2015). Pour la région Sofia, la pratique du feu de végétation est très courante et concerne surtout les formations savaniques. Les savanes y occupent environ 3,235 millions d'ha en 2005 représentant 62,76% de la superficie de la région (ONE, 2009).

Hypothèse 3 : Les actions de lutte contre les feux sont insuffisantes au niveau des zones potentiellement touchées par le feu

Plusieurs actions de lutte contre les feux ont été menées à l'intérieur de la région Sofia sans pour autant prendre en considération et prioriser toutes les zones réellement touchées par les feux annuellement.

CHAPITRE 1. GÉNÉRALITÉS SUR LES FEUX

1.1. Caractéristiques des feux

1.1.1. Définition

D'après Whelan (1995), « *le feu est considéré comme une perturbation, d'origine naturelle ou anthropique, au même titre que la sécheresse, les inondations, les ouragans et d'autres troubles physiques qui affectent directement les écosystèmes et les organismes* ».

Selon la définition de Masahiro en 2003 : « *Les feux de végétation sont définis comme étant des sinistres qui se déclarent et se propagent dans des formations d'une surface d'au moins un hectare et pouvant être :*

- *Des forêts : Formations végétales organisées ou spontanées, dominées par les arbres et les arbustes, d'essences forestières, d'âges divers et de densités variables.*
- *Des formations sub-forestières : Formations d'arbres feuillus ou de broussailles appelées maquis (le maquis est une formation végétale basse, fermée et dense qui pousse sur des sols siliceux) ou garrigue (la garrigue est une formation végétale basse mais plutôt ouverte qui pousse sur des sols calcaires).* »

Selon Orlando (2015), « *le feu de forêt est un incendie incontrôlable qui se propage sur une étendue boisée (forêt ou formation subforestière) d'une surface minimale d'un hectare et qu'une partie au moins des étages arbustifs et/ou arborés soit détruite* ».

Selon Fournier *et al.* (2014), en Afrique francophone, « *les feux de brousse ou feux courants sont des expressions consacrées pour désigner des feux qui parcourent la végétation naturelle des savanes* ».

Dans cette même idée, Randrianarivelo (2003) définit « *un feu de brousse comme essentiellement un feu courant qui parcourt une savane* », ainsi que Valea (2005) qui définit « *le feu de brousse comme étant des incendies qui parcourent chaque année les savanes* ».

Selon l'article 6 de l'ordonnance 60-127 fixant le régime des défrichements et des feux de végétation à Madagascar, les feux de végétation comprennent les feux de culture et de nettoyage, les feux de pâturage et les feux sauvages. Les feux de culture et de nettoyage ont pour but d'incinérer la végétation qui recouvre les terrains de culture. Les feux de pâturage ont une vocation de renouvellement de végétation de pâturage. Les feux sauvages sont des feux non contrôlés sans limite ni unité d'ordre économique.

1.1.2. Typologie des feux

D'après Monnier en 1990, les feux peuvent être regroupés en deux groupes :

- en fonction de la période de mise à feu ; et
- en fonction de composante la végétation incendiée.

Types de feux suivant la période de mise à feu

- **Feux précoces** : ils apparaissent en début de la saison sèche. Leur progression est encore lente, vu que le taux plutôt élevé d'humidité de la végétation permet de freiner un brûlis total (Riou, 1995).

- **Feux tardifs** : ils se propagent en pleine saison sèche. Leur progression est plus rapide et plus violente par rapport aux feux précoces, étant donné que la végétation est totalement sèche, et que la teneur en eau est au plus bas. Selon Mbow (2000), les feux sont dits tardifs lorsque le taux d'humidité de la végétation est faible (seuil à déterminer en fonction des types de végétaux et de certains paramètres climatiques).

Types de feu suivant la composante de la végétation incendiée

Selon la composante de la végétation incendiée, trois types de feux de forêts sont identifiés (Masahiro, 2003) :

- **Les feux de sol** : la matière organique du sol sert de combustible. Ils ne sont pas violents et leur vitesse de propagation est lente. L'extinction complète est souvent difficile car on a besoin de beaucoup d'eau pour pouvoir éteindre le feu qui couve en profondeur.
- **Les feux de surface** : les strasses basses de la végétation, la strate herbacée et les ligneux bas servent de combustible. Leur propagation peut être rapide en fonction des conditions du milieu (vent, relief), et quand ils se développent librement.
- **Les feux de cimes** : pouvant être des feux de cimes indépendants, actifs ou passifs (Van Wagner, 1977). Ces feux se retrouvent sur la partie supérieure des arbres. Leur propagation est très rapide, et peuvent être favorisés par le vent et la sécheresse. Ils sont difficiles à contrôler.

1.1.3. Facteurs de déclenchement et de propagation de feu

D'après Masahiro en 2003, un feu a besoin d'une source de chaleur (flamme, étincelle), d'oxygène (vent) et de combustible (végétation dans le cas d'un incendie de forêt) pour se déclencher. Quant à la propagation de feu, de nombreux facteurs (Figure 1), biotiques et abiotiques, influencent le comportement du feu comme l'intensité et la propagation (Whelan, 1995; Cochrane & Ryan, 2009). Selon Alvarado (2012), six facteurs principaux influent sur l'intensité d'un feu : la quantité de la matière combustible, l'humidité et la température de l'environnement, la composition chimique de la matière combustible (huiles, résines, ...), le vent et la topographie.

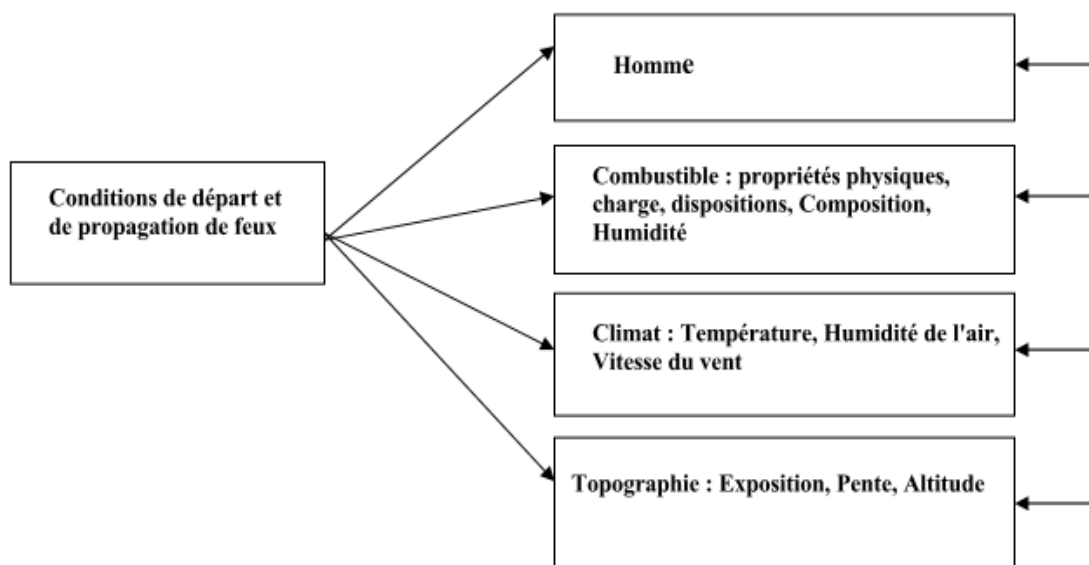


Figure 1 : Les facteurs de départs et de propagation des feux (Valea, 2005)

1.2. Situation des feux au niveau mondial

1.2.1. Statistique mondiale

Selon une étude de Giglio *et al.* en 2010, l'estimation totale moyenne de surfaces brûlées annuelles au niveau mondial de 1997 à 2008 est de l'ordre de 371 millions d'ha d'espaces naturels brûlés (savanes, prairies, maquis, forêts ...) dont 256 millions d'ha sont situés en Afrique : soit 69% des surfaces brûlées mondiales, 54 millions d'ha en Australie, 22 millions d'ha en Amérique du Sud (essentiellement en Amazonie), 15 millions d'ha en Asie Centrale, 24 millions d'ha concerne pour l'essentiel les forêts boréales d'Amérique du Nord et d'Asie, 0.7 millions d'ha en Europe (principalement la péninsule Ibérique, l'Italie, la Grèce, le sud de la France).

Plus particulièrement, sur la base de données de 118 pays, représentant 65% de la superficie forestière mondiale, en moyenne 19,8 millions d'ha de forêts ont été touchées par le feu annuellement, durant la période 2003-2007 (FAO, 2010).

1.2.2. Causes

La grande majorité des feux de végétation mondiale d'aujourd'hui sont d'origine anthropique et se déroulent dans les régions tropicales et subtropicales. Le risque d'incendie s'est fortement accentué suite à une forte croissance de la population. En effet, le feu est fréquemment utilisé pour les mises en culture comme outil de traitement des terres, par exemple, pour la conversion des terres forestières en terres agricoles (Photo 1) ; pour le maintien des pâturages; et pour faciliter l'utilisation des produits forestiers non ligneux des forêts saisonnières et des savanes (ITTO, 1997).

Dans la région méditerranéenne, 92 à 98% des feux de forêt sont d'origine anthropique, par négligence ou malveillance (Colin *et al.*, 2001). La cause naturelle ne représente que 1 à 5 % des cas d'incendies dans cette région. Dans les pays comme le Canada et la Russie, les causes naturelles, dont principalement la foudre, sont en grande partie à l'origine des incendies. Les éruptions volcaniques sont aussi des causes naturelles pouvant causer les feux de forêt.



Photo 1 : Déforestation par brûlage, pour mise en culture, Sud du Mexique.

(Jami Dwyer, 2005 in <https://fr.wikipedia.org/wiki/Déforestation>)

1.2.3. Impacts

Les impacts des feux sont nombreux, à savoir le réchauffement climatique, les pertes en vies humaines, la pollution de l'air, la désertification et la perte de biodiversité (Sarr *et al.*, 2015). Les feux affectent la matière organique du sol et favorisent l'érosion chimique et mécanique (lessivage et mobilisation de sédiments) (OMVS, 2007). Les incendies de forêt provoquent les pollutions qui varient fortement selon le type de forêt, d'incendie et l'humidité des végétaux. En Asie du Sud-Est, en Afrique et localement en Amérique du Sud, de nombreux feux volontaires contribuent à la déforestation et parfois à la désertification et/ou à des phénomènes graves d'érosion (à Madagascar par exemple). En effet, selon la FAO en 2009, les pays en développement sont souvent les plus vulnérables aux feux de forêts. Par ailleurs, début 2009, les feux de forêts ont entraîné des pertes évaluées à plusieurs millions de dollars en Californie et dans l'Etat de Victoria en Australie (FAO, 2009). En juin 2017, un gigantesque feu de forêt dans la région de Leiria, dans le centre du Portugal, a coûté la vie à 62 personnes (Photo 2).



Photo 2 : Incendie de forêt au Portugal en juin 2017 sur la nationale 236

(AFP, 2017 in <http://www.7sur7.be>)

1.2.4. Feux et changement climatique

A l'échelle globale, les feux sont à la fois des sources d'émissions de gaz à effet de serre mais aussi des facteurs limitant la séquestration de carbone atmosphérique (OMVS, 2007). De 1997 à 2004, les émissions de GES par les feux de végétation sont estimées à 2,5 PgC/an ce

qui équivaut à 7% des émissions totales actuelles. Les savanes représentent 44%, la déforestation et les feux de forêts tropicales représentent 36%, les autres feux de forêts représentent 15% (van der Werf *et al.*, 2010) des émissions de ces GES. Il est fort probable que le risque de feu sera accentué par les conditions extrêmes liées au réchauffement climatique (Dale *et al.*, 2001). Stocks *et al.* (1998) ont mis en évidence un allongement de la saison à risque d'incendie au Canada et en Russie, ainsi qu'une augmentation significative des territoires de ces deux pays concernés par des niveaux de risque d'incendie élevé à extrême. En Australie du Sud-est, Hennessy *et al.* (2005) prévoient que la fréquence du nombre de jours avec des indices de risque d'incendie de niveaux très élevé à extrême, augmentera probablement de 4-25% à l'échéance 2020 et de 15-70% à l'échéance 2050.

1.2.5. Stratégie de lutte

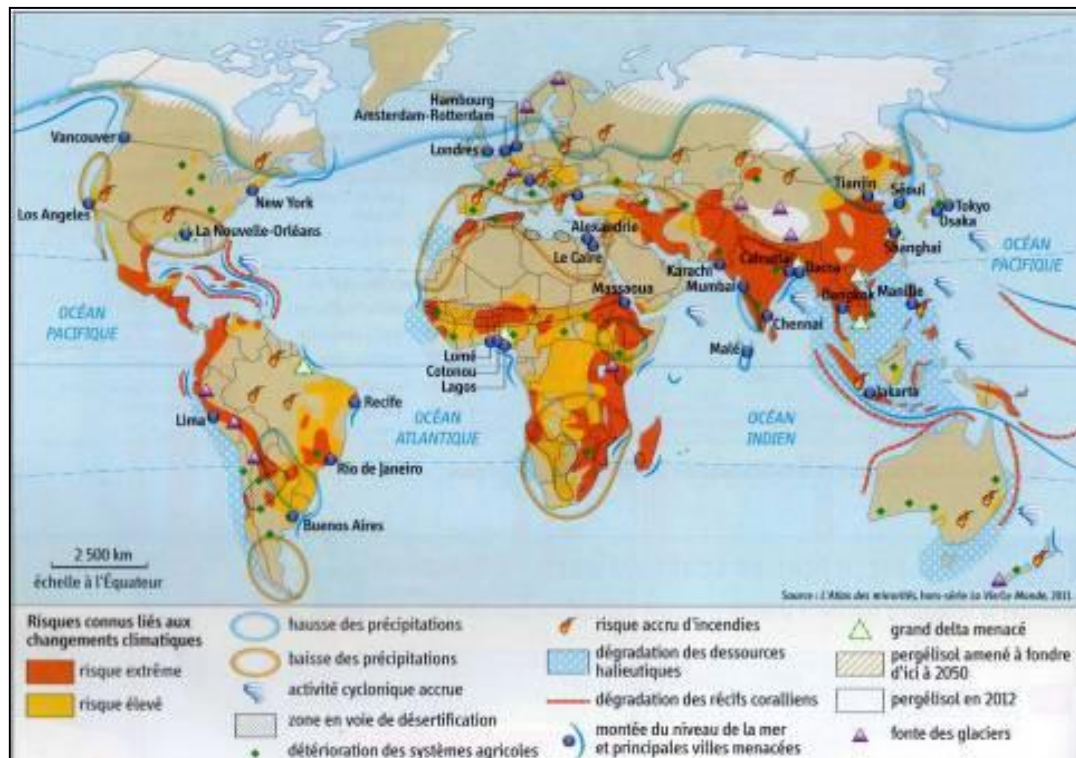
1.2.5.1. Cadre général de la stratégie

Actuellement, les feux de brousse font partie des problématiques mondiales d'un point de vue environnemental, socio-économique ou agrométéorologique. Ils sont considérés comme l'une des plus sérieuses calamités agrométéorologiques dans le monde (Shuanghe & Yuanshu, 2004). Ainsi, les stratégies mondiales sur les feux sont étroitement liées à différentes conventions internationales : la Convention Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, le Cadre d'action de Hyogo, le Cadre d'action de Sendai, le Programme de développement durable à l'horizon 2030, et l'Accord de Paris sur le changement climatique.

Cadres d'action de Hyogo et de Sendai

Les incendies, étant des risques naturels récurrents (Carte 1), sont considérés comme catastrophes s'il y a des pertes de vies humaines ou de biens (Prior & Roth, 2015). Afin de prévenir et gérer les risques naturels, des processus internationaux ont été mis en place. Ainsi, le Cadre d'Action de Hyogo (CAH), couvrant la période de 2005 à 2015, était mis en œuvre pour la réduction des catastrophes (Nations Unies, 2016).

Faisant suite au Cadre d'Action de Hyogo, le Cadre d'action de Sendai a été adopté lors de la troisième Conférence mondiale de l'ONU au Japon le 18 mars 2015, afin de réduire les risques de catastrophe pour la période de 2015 à 2030. Le résultat escompté de ce cadre est : « *La réduction substantielle des pertes et des risques liés aux catastrophes en termes de vies humaines, d'atteinte aux moyens de subsistance et à la santé des personnes, et d'atteinte aux biens économiques, physiques, sociaux, culturels et environnementaux des personnes, des entreprises, des collectivités et des pays* » (Nations Unies, 2016).



Carte 1 : Carte des risques connus liés aux changements climatiques

(Atlas des minorités-le Monde, 2011 in <http://balises.bpi.fr/geographie/migrations-et-changements-climatiques>)

Accord de Paris

Les impacts liés au changement climatique accroissent considérablement les risques de catastrophe. L'Accord de Paris prévoit l'adaptation au climat à travers l'amélioration des capacités d'adaptation, le renforcement de la résilience et la réduction des risques et de la vulnérabilité aux changements climatiques. De ce fait, le Cadre de Sendai et l'Accord de Paris sont des éléments liés qui conditionnent l'adaptation aux changements et le développement durable (Nations Unies, 2016).

1.2.5.2. Mesures de lutte contre les incendies

Les actions de lutte contre les feux au niveau mondial diffèrent selon les pays mais, en règle générale, chaque type d'incendie fait l'objet de prescriptions techniques particulières concernant la prévention, la protection, l'intervention et le comportement de la population sinistrée.

A titre d'exemple, au Canada, la stratégie adoptée consiste à des mesures d'atténuation (Hirsch & Fuglem, 2006) par la planification communautaire à travers le programme de sécurité-incendie Intelli-feu (FireSmart) ; par la gestion des matières combustibles ; par les normes de construction ; et par les mesures incitatives dans le domaine des assurances

privées. Dans le cadre de la gestion des feux de forêts, il y a l'évaluation du danger de feu de forêt par la méthode canadienne d'évaluation des dangers d'incendie de forêt (MCEDEF) ; les prévisions météorologiques pour la protection des forêts ; le positionnement des ressources ; la détection avec un système de localisation de la foudre ; et enfin l'intervention et l'extinction par l'existence d'un système de commandement des incidents, l'utilisation des engins tels que la flotte nationale d'avions-citernes et le déploiement de plusieurs acteurs (Photo 3).



Photo 3 : Forces armées canadiennes pour lutter contre les feux de forêt dans le Nord de la Saskatchewan : Opération LENTUS 2015-02 (<http://www.army-armee.forces.gc.ca>)

Pour la gestion des feux, plusieurs pays développés utilisent les simulateurs (Annexe 2). La modélisation des feux de forêt permet de simuler, grâce à des moyens informatiques, la propagation d'un incendie dans des combinaisons variées de végétation, de topographie et de conditions météorologiques (Moretti, 2015). La FAO, en collaboration avec l'Agence spatiale européenne et la NASA, a recours aux données satellitaires pour surveiller les feux grâce à un système d'alerte précoce fournissant des indications sur leur emplacement géographique et sur les pertes en biomasse et biodiversité (FAO, 2009).

En Afrique, l'utilisation des images satellitaires par un travail en réseau par Internet est actuellement possible. Par exemple, en Afrique de l'Ouest, le suivi satellitaire des feux est déjà utilisé (Faye, 2003). Cette méthode de travail est nécessaire aussi bien avant, pendant et après la campagne. Ainsi, la carte des feux a permis d'identifier les radios rurales pour la campagne d'information, dans sept pays de l'Afrique de l'Ouest (Bénin, Burkina, Guinée, Gambie, Mali, Niger et Sénégal). Les communautés sont alors informées par le courrier électronique des radios rurales des cartes des feux mensuelles produites (Faye, 2003).

1.3. Situation des feux à Madagascar

1.3.1. Statistique

Les feux de pâturage en savane sont les plus répandus à Madagascar et les plus importants en termes de surface affectée, d'environ 90 à 97% de la surface brûlée annuellement (Madhow *et al.*, 1994 ; Rakotoarimanana, 2002). La savane couvre 80% du territoire (Koechlin, 1993), et elle est principalement la plus touchée par les feux de brousse. Selon Kull (2000), 25% à 50% des zones non forestières et non cultivées brûlent chaque année pendant toute la saison sèche. Les estimations de surfaces de savanes brûlées sont de 650 000 ha par an (Rakotoarijaona, 2004). Ces chiffres traduisent une pratique courante de l'utilisation du feu, omniprésente dans la culture malgache. Le rapport du Service de reforestation et de lutte contre les feux en 2016 concernant la détection de feux de janvier 2010 jusqu'en décembre 2015 au niveau national, estime au total 390 137 points de feux dans les 22 régions de Madagascar dont 59 624 points de feux en forêts et 330 513 points de feux hors-forêts (Annexe 1). La région Sofia occupe la troisième place en termes de points de feux par comparaison aux 22 régions existantes.

1.3.2. Causes

A Madagascar, plusieurs causes peuvent être à l'origine des feux (Annexe 3). En général, la pratique des feux est étroitement liée aux pratiques agricoles (Photo 4), ainsi qu'aux pratiques liées au renouvellement des pâtures pour l'élevage des zébus (Alvarado, 2012). Les feux peuvent également être d'origine accidentelle, qui échappe au contrôle des agriculteurs et réussissent à atteindre la savane ou la forêt adjacente à la parcelle de culture.



Photo 4 : Feux à Madagascar : (a) Culture sur brûlis (Goodman, 2014 in <http://sciencesinfo.net>); (b) Feu sur savane dans la région Sofia (Auteur, 2016)

1.3.3. Impacts

En général, toutes les formations végétales du territoire sont touchées par des feux mais leurs fréquences et leurs gravités dépendent de la nature de la formation végétale et de sa composition floristique. Le passage répété des feux sur la végétation provoque une dégradation des formations végétales avec un changement de formation de végétation originelle en formation secondaire. Concernant les effets sur le sol, le passage régulier des feux entraîne la destruction de la litière qui protège le sol et qui est destinée à lui fournir les matières humiques. Des profonds bouleversements des conditions écologiques causés par le feu, entraînent des effets sur la fertilité des sols (Photo 5). Le sol devient plus sensible à l'insolation directe, au dessèchement, et à l'érosion éolienne et hydrique. Ceci favorise particulièrement la formation de grand lavaka¹ (Rabevahiny, 2010).

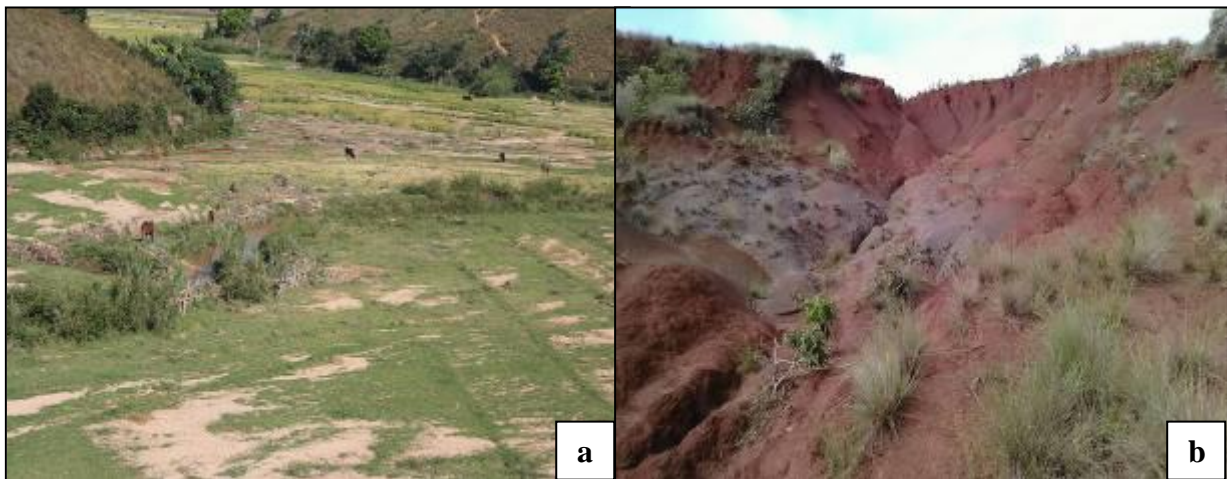


Photo 5 : Impacts des feux dans la région Sofia : (a) Ensablement de rizière (Auteur, 2015) ;
(b) Erosion sur les bassins versants, à Ankaizina (Auteur, 2016)

1.3.4. Stratégies de lutte à Madagascar

La politique générale de l'Etat Malgache, dans sa partie croissance économique à base élargie, prévoit la réduction des feux de brousse. Des textes législatifs (lois, décrets, ordonnances, etc) sont promulgués pour réguler et pour administrer la pratique de tous types de feux. La stratégie adoptée est basée sur l'intégration de toutes les parties prenantes concernées, à tous les niveaux dans le processus, en clarifiant leurs attributions pour une meilleure coordination des actions. La lutte préventive, la lutte active et l'évaluation-sanction représentent les grandes lignes d'actions de l'administration forestière (DGEF, 2009). Des renforcements de capacité au niveau de certains acteurs concernés sont, aussi, effectués en vue de bien maîtriser

¹ Lavaka : ce terme est utilisé pour décrire de profondes excavations grossièrement ovoïdes aux parois très abruptes, façonnées par des eaux de ruissellement et des sous-écoulements. (<https://fr.wikipedia.org/wiki/Lavaka>)

les techniques appropriées à la lutte contre les feux, notamment sur les conduites et les méthodes d'attaques. A partir des années 1990, l'approche participative est imposée, avec une effectivité recherchée au niveau des acteurs locaux (Hufty, 2007).

Diverses campagnes de sensibilisation de lutte contre les feux (Photo 6) ont été effectuées au niveau national ainsi qu'au niveau régional. Malgré tous les efforts déployés, la pratique de feux subsiste encore, et constitue une des principales causes de la dégradation des ressources naturelles malgaches, du fait de la forte interaction de cette pratique dans les activités humaines, entre autres au niveau du mode de production agro-sylvo-pastorale ou de mise en valeur des sols, et les aspects socioculturels qui prévalent auprès des populations.

A partir de l'année 2003, le Ministère de l'Environnement, et Forêts a mis en place un système de suivi satellitaire de feux en temps réels, en collaboration avec le projet JariAla financé par USAID (<http://www.conservation.org>). Il s'agit d'un outil utilisé pour l'alerte et le suivi des feux qui permet d'identifier la localisation des points de feux à temps réel (<http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov>). Par définition, ces points de feux correspondent à des espaces incendiés émettant des signaux perceptibles et décodés par les équipements de ces outils. Il est actuellement utilisé pour effectuer des suivis sur l'ensemble de territoire malgache en constituant des bases de données plus fiables, afin de pouvoir ultérieurement élaborer des simulations et modélisations quant aux futures occurrences des feux (Rakotoarivony, 2014). Toutefois, l'insuffisance de moyens au niveau de l'administration forestière ne permet pas d'utiliser efficacement les résultats de ce système d'alerte.



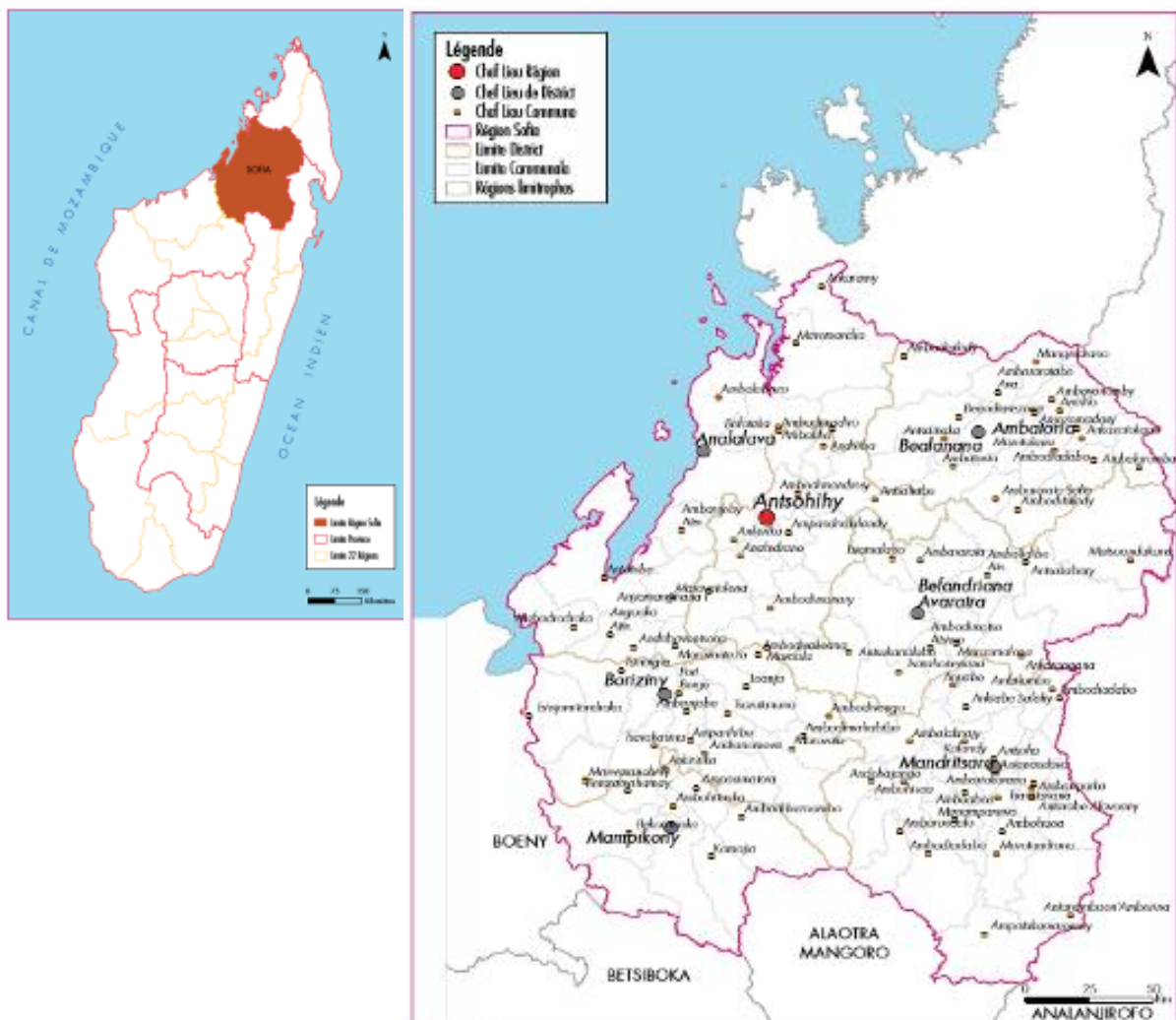
Photo 6 : Journée de l'Agroécologie dans le Moyen Ouest de Madagascar (Thèmes : feux de brousse, dégradation de sol, changement climatique, reboisement,...) (<http://gsdm-mg.org>)

CHAPITRE 2. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE

2.1. Cadre physique

2.1.1. Situation géographique

La zone d'étude se trouve dans la région de Sofia qui est localisée dans la partie Nord-Ouest de Madagascar (Carte 2) entre 14° et 17° latitude Sud et 47° et 49° longitude Est. Elle fait partie des plus grandes régions de Madagascar avec une superficie de 52 503 km² soit environ 8,5% de la Grande Ile (CREAM, 2013). Administrativement, elle est constituée par sept (07) districts (Tableau 1) : Antsohihy, Analalava, Mampikony, Bealanana, Port-Bergé, Befandriana, Mandritsara ; par 108 Communes et par 1329 fokontany² (CREAM, 2013).



Carte 2 : Localisation géographique de la région Sofia (FTM, 2000 in CREAM, 2013)

² Fokontany : Il est aujourd'hui une subdivision administrative de base malgache. Il comprend soit des hameaux, des villages, des secteurs ou des quartiers. (<https://fr.wikipedia.org/wiki/Fokontany>)

Tableau 1 : Superficie des districts dans la région Sofia

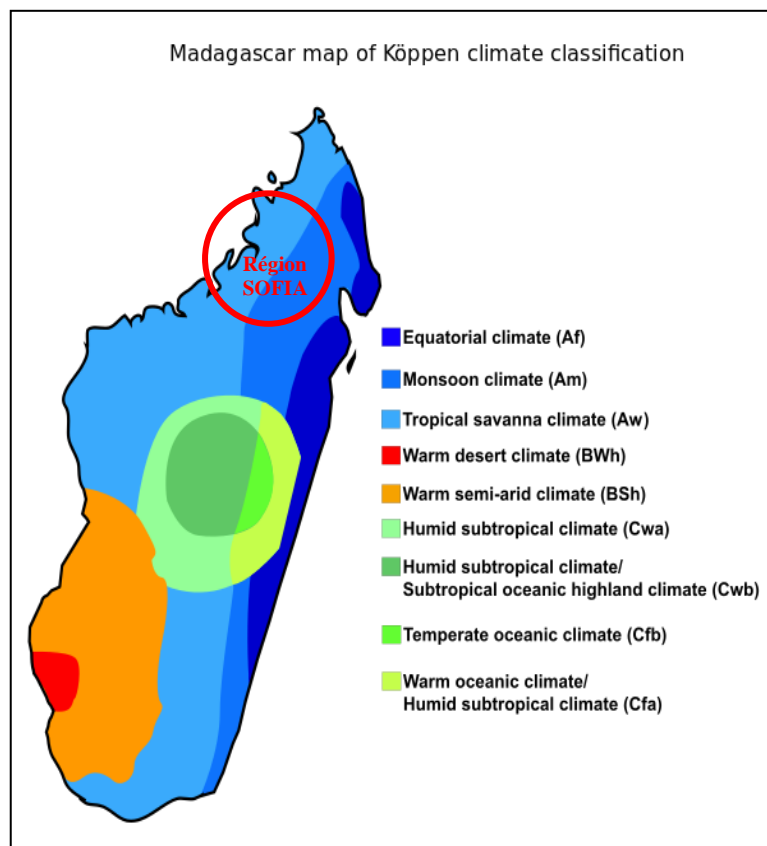
District	Superficie en km ²
Analalava	10 070
Antsohihy	4 787
Bealanana	6 230
Befandriana	9 121
Mampikony	5 248
Mandritsara	9 604
Port-Bergé	7 443
Total	52 503

Source : MEI/CREAM/Monographie 2009

2.1.2. Climat

En général, il existe deux saisons bien distinctes dans la région, sèche de mai à octobre, humide de novembre à avril (CREAM, 2013). Selon la classification de Köppen et Geiger (Carte 3), le climat de la région est de type tropical avec deux types de climat identifiés :

- Climat de type Aw : un climat de savane avec hiver sec, sur la zone côtière ; et
- Climat de type Am : un climat de mousson, sur la zone de hautes terres.



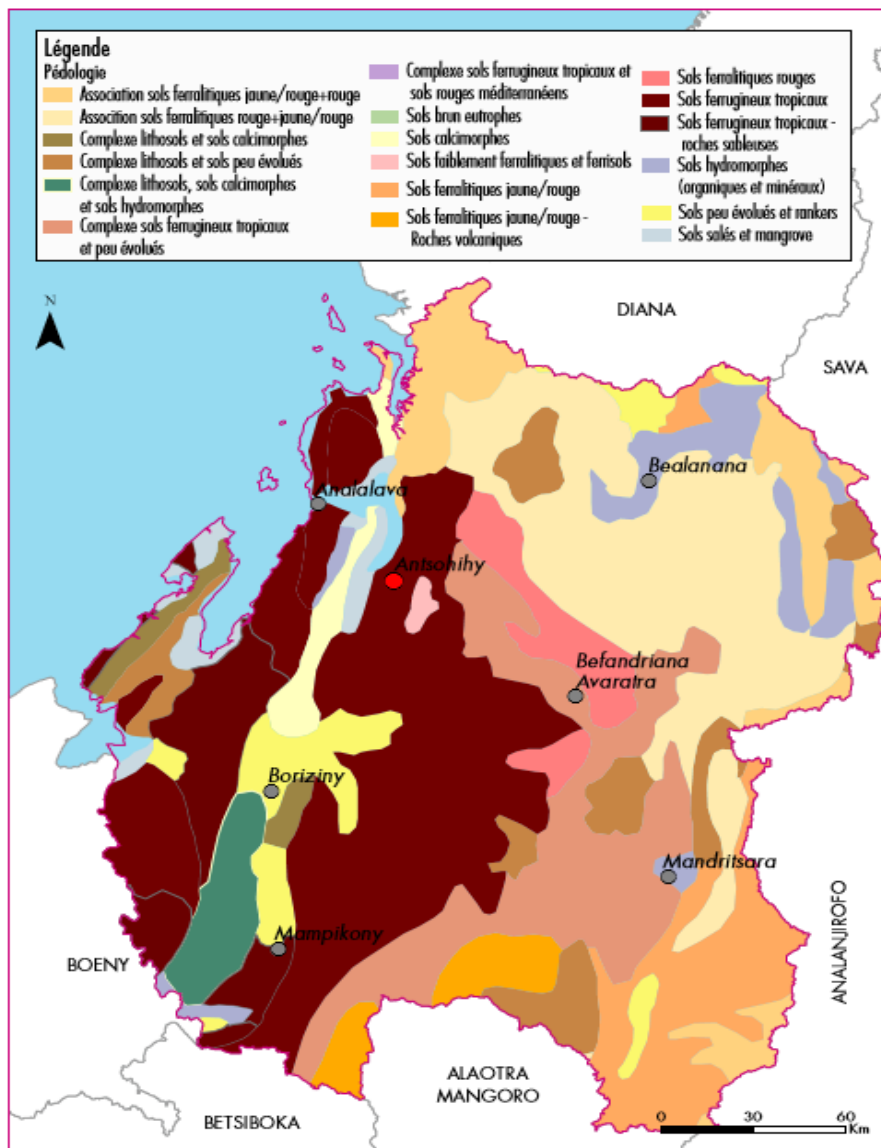
Carte 3 : Carte climatologique de Madagascar selon la classification de Köppen et Geiger (adapté de Peel *et al.*, 2007)

2.1.3. Hydrologie

La région Sofia est traversée par le fleuve de la Sofia qui prend sa source dans le district de Bealanana. La partie nord-ouest dispose de vastes bassins hydrologiques favorisant l'écoulement et le déversement des grands fleuves dans le Canal de Mozambique (CREAM, 2013). La région connaît un régime hydrologique caractérisé par des crues bien alimentées en saison de pluies de décembre à mars et d'étiage faible de juillet en octobre.

2.1.4. Relief et pédologie

Il y a une grande variation de relief dans la région, allant de 50m à 2400m d'altitude. Le relief est formé essentiellement par les plateaux, la plaine et le littoral (CREAM, 2013). Il existe également différents types de sols rencontrés dans la région (Carte 4).

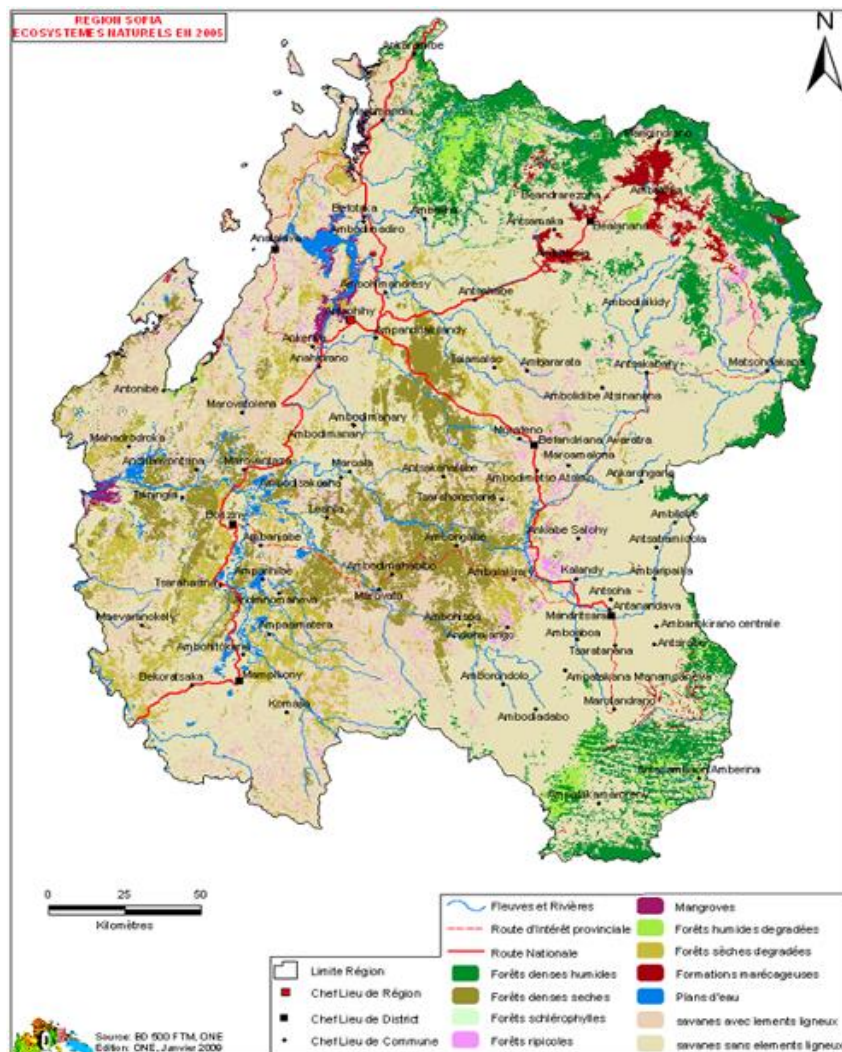


Carte 4 : Carte pédologique de la Région Sofia (FTM, 2000 in CREAM, 2013)

2.1.5. Formations végétales

2.1.5.1. Caractéristiques

Les écosystèmes naturels composés de formations forestières (forêts denses humides, forêts denses sèches, forêts sclérophylles, mangrove et de forêt ripicole) (Carte 5), de formations marécageuses et de plans d'eau couvrent 27,20% de la superficie de la Région en 2005. La superficie des formations savanicoles est de 3 235 314 ha en 2005, soit 62,76% de la superficie de la Région (ONE, 2009). Il existe 300 espèces végétales endémiques et 149 espèces animales endémiques (ONE, 2009).



Carte 5 : Ecosystèmes naturels de la région Sofia en 2005 (FTM, 2000 in CREAM, 2013)

La région se caractérise par une grande diversité des formations végétales, composées de :

- Forêts humides constituées de forêt dense humide de basse altitude (<800m) (Photo 7a) ; de forêt dense de moyenne altitude (800-1800m) ; de forêt Sclérophylle de montagne (1800-2000m) ; et de fourré de montagne (>2000m) (BIODEV, 2013) ;

- Forêt dense sèche semi-caducifoliée (Photo 7b), de la série de *Dalbergia*, *Commiphora* et *Hildegardia*, correspondant au domaine de l'Ouest (Humbert, 1955; Cornet & Guillaumet, 1976; Lowry *et al.*, 1998), et faisant partie de la zone écofloristique occidentale de basse altitude (Rajeriarison & Faramalala, 1999) ;
- Savanes arbustives (Photo 7c) (taxons caractéristiques : *Acridocarpus excelsus*, *Dypsis madagascariensis*, *Strychnos spinosa*, *Medemia nobilis* (ONE *et al.*, 2009) ou herbeuses (taxons caractéristiques : POACEAE (*Aristida* sp. *Hypparhenia* sp), CYPERACEAE (*Cyperus* sp, *Pycreus* sp) (ONE, 2009 ; Faratiana, 2005). D'après Koechlin *et al.* en 1997, la plus grande partie de la végétation forestière initiale était remplacée entre-temps par des savanes secondaires.
- Mangroves (Photo 7d) : La côte Ouest est favorable à l'extension des formations de mangroves (Gachet, 1959; Du Puy & Moat, 1996). On y rencontre 8 espèces de palétuviers (MNP & MEF, 2012) : *Avicennia marina*, *Sonneratia Alba*, *Rhizophora mucronata*, *Bruguiera gymnorhiza*, *Xylocarpus granatum*, *Lumnitzera racemosa*, *Heritiera littoralis*, *Ceriops tagal*.

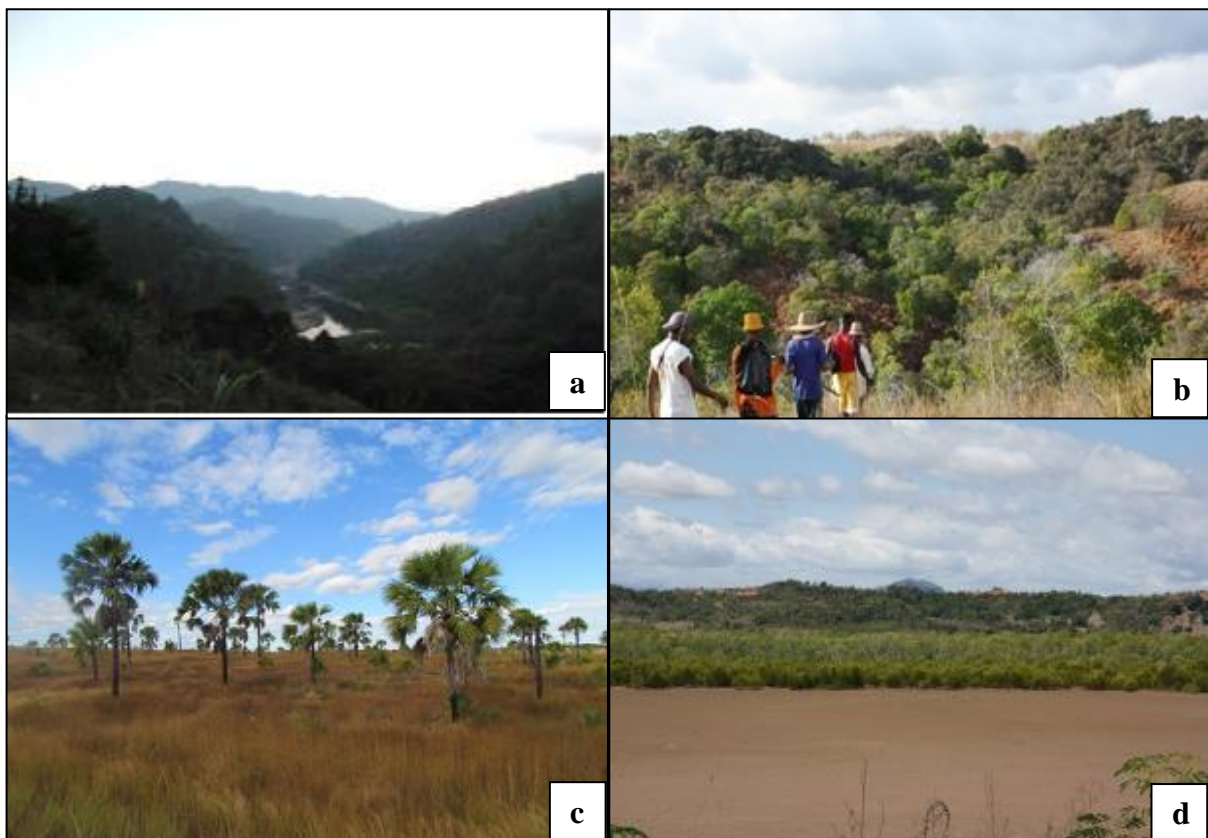


Photo 7 : Formations végétales Région Sofia :

(a) Forêt dense humide de basse altitude : <800m (BIODEV, 2013) ; (b) Forêt sèche à Ankitsika (Auteur, 2012) ; (c) Savane arbustive à palmiers (Auteur, 2016) ; (d) Mangroves dans la zone périphérique de l'AP Sahamalaza (Auteur, 2012).

2.1.5.2. Pressions et menaces

La déforestation reste une menace importante pour la région (Figure 2). En effet, la superficie de forêts détruite annuellement s'élève à plus de 3000 ha, expliquant sans doute la baisse de la couverture forestière de 36 % en 2003 à 24 % en 2009 (ONE, 2009). Les raisons principales de la déforestation sont les feux de brousse, le défrichement pour culture sur brûlis et l'exploitation illicite de la forêt. Les districts qui subissent la partie essentielle des feux de brousse (Antsohihy et Bealanana) sont dépourvus de reboisement conséquent (ONE, 2009).

La région est également confrontée à des risques énormes à savoir la dégradation des bassins versants et des récifs coralliens, la pollution de l'eau, l'érosion côtière, l'insuffisance de la mise en valeur du réseau hydrographique, l'envasement et ensablement des lacs et rivières, ainsi que l'exploitation irrationnelle des ressources halieutiques (CREAM, 2013).

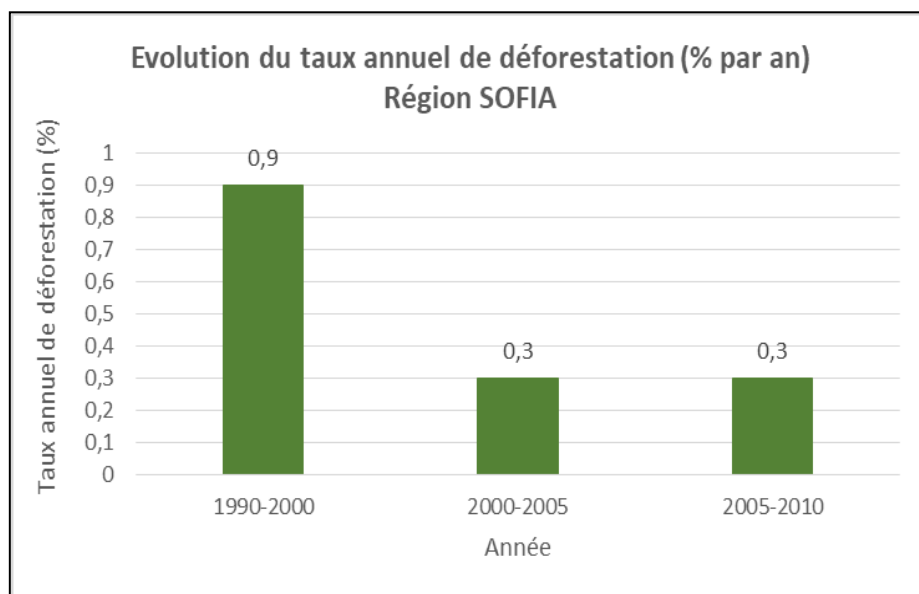


Figure 2 : Evolution du taux annuel de déforestation dans la région Sofia (ONE *et al.*, 2013)

2.2. Milieu humain

2.2.1. Démographie

La population de la région Sofia, majoritairement formée par les Tsimihety³, s'élève à 1.280.847 en 2014, avec une densité de 23 habitants/km² (www.instat.mg), soit 6,4% de la population de la grande île (CREAM, 2013). La proportion de la population rurale est estimée à 89,4%, et qui est largement supérieure à la situation au niveau national à cause de l'inexistence d'un grand pôle urbain dans la région (INSTAT/DSM/EPM, 2010 in CREAM, 2013).

³ Tsimihety : groupe ethnique de Madagascar

2.2.2. Niveau d'instruction

En 2010, le taux d'alphabétisation des individus âgés de 15 ans et plus de la région est de 64,5% (CREAM, 2013). Il existe une nette différence entre le milieu urbain et le milieu rural. Pareillement, la différence est remarquable au niveau des genres, au détriment des femmes.

2.2.3. Activités socio-économiques

Les agriculteurs représentent 70% de la population active de la région (CREAM, 2013). Avec de grandes potentialités agronomiques, une grande partie de l'économie de la région est basée exclusivement sur l'Agriculture.

Agriculture

Les superficies cultivables de la région sont estimées à 421 892 ha mais seulement 29% est exploitée (CREAM, 2013). Les principales cultures regroupent les cultures vivrières et les cultures de rente. Comme pour l'ensemble de l'île, les cultures vivrières sont avant tout une culture de subsistance dont le riz constitue la principale spéculation. Les techniques culturales sont généralement de type traditionnel, utilisant des méthodes encore rudimentaires et archaïques.

Elevage

Favorisé par sa vaste étendue, sa position topographique et son climat, la région Sofia possède une vocation agropastorale importante. En général, les principaux types d'élevage recensés dans la région (Tableau 2) sont l'élevage bovin (13,6%) et l'élevage ovin (16,1%) (CREAM, 2013). Pour l'élevage bovin, il s'agit d'un élevage traditionnel extensif.

Tableau 2 : Part des cheptels porcine, ovine, caprine, volaille et bovine par district

Unité : Pourcentage (%) Effectif

	Bovine	Porcine	Ovine	Caprine	Volaille	Nombre d'éleveurs bovins	Cheptel bovine/éleveur
Analamanga	10,9 %	2,1 %	61,8 %	63,6 %	nd	11 611	8,2
Antsoahy	11,7 %	17,0 %	16,6 %	20,1 %	nd	8 572	11,9
Bealanana	13,3 %	5,3 %	0,7 %	0,8 %	nd	11 104	10,4
Befandriana-Avaratra	13,2 %	21,0 %	3,2 %	3,1 %	nd	12 229	9,4
Mampikony	29,1 %	26,1 %	4,7 %	11,7 %	nd	7 298	34,6
Mandritsara	11,9 %	26,4 %	12,3 %	0,0 %	nd	8 501	12,1
Port-Bergé (Boriziny)	9,9 %	2,0 %	0,7 %	0,7 %	nd	15 656	5,5
Total région	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	nd		
% Madagascar	13,6 %	1,7 %	16,1 %	6,2 %	nd		

Source: MEI/CREAM/Monographie 2009

CHAPITRE 3. METHODOLOGIE

3.1. Méthode de collecte de données

3.1.1. Revue bibliographique

La revue bibliographique est essentielle pour obtenir toutes les informations aussi bien d'ordre général que particulier concernant la thématique sur les feux. Les documents se rapportent à la monographie de la région Sofia, les textes relatifs aux feux, la couverture forestière à Madagascar, la situation des feux au niveau mondial, les cas de gestion des feux, les cas de problématique sur les feux, ainsi que les rapports d'activités au niveau de la Direction régionale de l'Environnement, de l'Ecologie, et des Forêts Sofia, ...

3.1.2. Entretien

L'entretien est nécessaire pour pouvoir rassembler toutes les informations utiles à la conduite du travail. Il est ainsi focalisé au niveau de tous les acteurs et parties prenantes intégrés dans la lutte contre les feux (les autorités administratives, les services déconcentrés, les officiers de police judiciaire, la brigade de lutte contre les feux, ...), mais aussi au niveau des communautés locales qui ont un rôle considérable dans la gestion des feux, mais qui sont aussi parfois même les auteurs du feu.

3.1.3. Acquisition des données satellitaires

3.1.3.1. Données sur les feux

Les séries temporelles d'images de télédétection à moyenne résolution spatiale exploitées dans ce travail sont issues du capteur MODIS en raison de la disponibilité et la facilité d'accès aux données nécessaires à cette étude, de la capacité de couverture journalière de grandes étendues, la résolution spatiale de 250 m la plus fine parmi l'offre en imagerie pour cette gamme de résolution spatiale des données (Jacquin, 2010). Un autre avantage de l'utilisation des données MODIS réside dans leur haute résolution temporelle. Les données satellitaires sur les feux actifs et les surfaces brûlées sont ainsi récoltées.

- *Données sur les feux actifs*

Les données MODIS utilisées (<ftp://ba1.geog.umd.edu/>) sont fournies par les capteurs Terra, fonctionnel depuis 2000, et Aqua, fonctionnel depuis 2002, et sont adaptées pour la détection des feux actifs (Kaufman *et al.*, 1998 ; Giglio *et al.*, 2003). La détection des feux est basée sur

l'algorithme contextuel de Giglio *et al.* (2003). Elle se caractérise par une longue série de données constituée quotidiennement (données à résolution de 1 km). Les données de feux actifs Modis sont issues de MCD14ML Collection 6 utilisées pour analyser la dynamique des feux de brousse (Giglio *et al.*, 2016). Les données sont choisies car elles permettent d'aborder la question du rythme des feux sans pour autant délaissier l'espace.

- **Données sur les surfaces brûlées**

Le produit Modis burned areas (<http://modis-fire.umd.edu>) utilisé est issu de la collection 6 (Giglio *et al.*, 2016) : MCD64A1 de 500m de résolution spatiale et une résolution temporelle journalière résumée en des données de surfaces brûlées mensuelles. Le produit MCD64A1 de MODIS fournit une détection des surfaces brûlées tous les mois avec une précision de 500 m (Giglio *et al.*, 2016). MCD64A1 exploite et localise l'occurrence d'un changement brusque de réflectance à la surface selon la méthode décrite par Roy *et al.* (2005). Le produit définit pour chaque pixel de 500m le jour approximatif du feu.

3.1.3.2. Données climatiques

Les données climatiques utilisées sont issues de <https://fr.tutiempo.net/climat/>, procurant les données de 2010 à 2015 dans la région Sofia (Antsohihy) concernant les paramètres climatiques suivants : la température maximale, l'humidité relative moyenne, et les précipitations (mm). En effet, ces paramètres ont été choisis puisqu'ils font partie des facteurs météorologiques influençant le comportement des incendies (Bekdouche, 2010 ; Alvarado, 2012).

3.1.3.3. Données d'occupation du sol

La couverture végétale du globe est issue de l'European Space Agency (ESA). GlobCover a été choisi car c'est un produit de couverture végétale mondiale librement accessible sur le site www.esa.int/dua/iona/globcover. La qualité des produits est assurée par la haute qualité des données du spectromètre imageur Meris du satellite ENVISAT qui offre une résolution spatiale fine (300 m) et un contenu thématique détaillé. Cette couverture comporte 23 classes correspondant aux différents types de végétation.

3.1.4. Acquisition des données de terrain

Les données sur le terrain concernent principalement des données relatives aux stratégies de lutte mises en œuvre dans la région Sofia. Ces données sont surtout issues des rapports annuels de la Direction Régionale de l'Environnement et des Forêts de la région Sofia, qui est

l'administration forestière en charge de toutes activités en matière de lutte contre les feux dans la zone d'étude.

Les données compilées concernent :

- Les acteurs en matière de lutte contre les feux dans la région : comités de lutte, communautés de base, services techniques,
- Les actions de sensibilisation en matière de lutte contre les feux ;
- Les actions de répression dans le cadre de délit forestier (feux sauvages, défrichage) ; et
- Les actions de reboisement dans la zone d'étude.

Des missions de terrain ont été effectuées dans le cadre de cette étude pour la mise en place de plusieurs structures locales de lutte contre les feux, de redynamisation des structures de lutte existantes, de sensibilisation et de formation en matière de lutte contre les feux au niveau local.

3.2. Méthode de traitement des données

3.2.1. Traitement des images sur les feux

L'analyse spatiale et temporelle des feux nécessite l'utilisation du Système d'information Géographique (SIG). Les logiciels QGis et ArcGis 10.3 sont utilisés pour le traitement d'images.

3.2.1.1. Feux actifs

Les données sur les feux actifs MCD14ML de la Collection 6 ont été extraites afin d'obtenir les points de feux suivant la période de 2010 à 2015.

Suppression des niveaux de confiance de présence de feux ≤ 30

Les points de feux actifs sont classés sur une échelle de fiabilité de 1 à 100. Les niveaux de confiance sont basés sur les ajustements quantitatifs de l'algorithme dans le processus de détection. Il peut être utile d'exclure les fausses occurrences positives des feux (Valea, 2005). Ainsi, les points de feux avec une fiabilité supérieure à 30 ont été gardés (Caillault *et al.*, 2010) afin d'établir une base ne contenant que les points de feu avérés.

Découpage de la zone d'étude

Les points de feux qui se trouvent à l'intérieur de la carte de la région Sofia sont ensuite découpés. Les données permettent ainsi de ressortir le nombre d'incendie ou nombre

d'éclosion de feux pour la région Sofia durant la période 2010-2015, ainsi que la saisonnalité et l'occurrence des feux dans cette région.

3.2.1.2. Surfaces brûlées

Le traitement et analyse des images Modis MCD64A1, se référant à la Région Sofia de 2010 à 2015, font ressortir les variables mensuelles concernant l'extension des surfaces brûlées, et la carte des surfaces brûlées.

Suppression des valeurs non pertinentes

Les données Modis « burn-date » couvrant une période d'un mois se présentent sous une série d'images élémentaires décrite par cinq ensembles d'information (Boschetti *et al.*, 2009) :

- 0 : non brûlée ;
- 1-366 : jours approximatifs de feu correspondant au calendrier grégorien ;
- 900 : neige ou haute aérosol ;
- 9998 : eau continentale ;
- 9999 : eau maritime (mer et océan) ;
- 10000 : non classifié car pas assez de données.

Le traitement ne concerne que les pixels ayant des valeurs pertinentes de « 1 à 366 » couvrant le mois donné qui présentent une meilleure probabilité de contenir un événement de feu. Par conséquent les autres valeurs qui décrivent toute autre information ont été enlevées.

Découpage de la zone concernée

La carte administrative de la région Sofia est superposée aux couches cartographiques obtenues à partir de Modis. Cette opération permet d'obtenir les statistiques sur les surfaces brûlées et d'élaborer des cartes de la distribution spatiale des feux.

Calcul des surfaces brûlées

Un calcul des surfaces brûlées, par mois et par an, à l'échelle régionale est effectué. Les images, reprojctées en projection UTM 38S correspondant à la partie supérieure de Madagascar, sont converties en shapefile. Le calcul des surfaces brûlées a été réalisé après la polygonisation.

3.2.2. Traitement des images sur l'occupation du sol

Les données sur l'occupation du sol de Globcover sont traitées dans ArcGis 10.3 de façon à pouvoir travailler uniquement sur la zone d'étude de la région Sofia. Ainsi, un découpage a été fait au niveau de cette zone. Les images ainsi obtenues sont superposées avec les données

des feux actifs. Par la suite, les données relatives aux points de feux actifs dans chaque type d'occupation du sol ont été extraites et classifiées.

3.2.3. Traitement des données acquises sur terrain

Les données concernant les acteurs en matière de lutte contre les feux dans la région (comités de lutte, communautés de base, services techniques) ; les actions de sensibilisations en matière de lutte contre les feux ; les actions de répressions dans le cadre de délit forestier (feux sauvages, défrichement) ; et les actions de reboisement dans la zone d'étude, sont extraites à partir des rapports annuels de la DREEF Sofia de façon à ressortir les données nécessaires durant la période de 2010 à 2015.

3.3. Analyse statistique

L'analyse des données permet de caractériser les éclosions d'incendies issues des données de feux actifs ; et les surfaces brûlées au moyen des outils statistiques tels que Excel et Statistica. Pour l'analyse spatio-temporelle des feux, il s'agit d'analyser les paramètres descriptifs de la série de données. Les données mensuelles ont été agrégées en années. Les moyennes mensuelles et annuelles ont été calculées.

3.3.1. Analyse de la saisonnalité

La saisonnalité d'un feu est la période de l'année pendant laquelle les feux ont le plus de chance de partir et de se propager (Broucke, 2009). La saisonnalité est étudiée en ramenant le nombre de feux actifs et la surface brûlée par mois sur la période d'observation de 2010 à 2015.

- **Analyse de l'occurrence des feux :**

Les périodes d'occurrence du feu sont les périodes au cours de laquelle les pics et les creux sont identifiées. L'analyse est faite à partir du traitement des données de feux actifs et de surfaces brûlées de 2010 à 2015 et de l'élaboration des graphiques sur ces données traitées. Les analyses mensuelle et interannuelle sont ainsi faites pour détecter la période propice au feu sur la période d'étude, et pour analyser la variabilité interannuelle de l'occurrence du feu.

- **Analyse de corrélation entre occurrences de feux et paramètres climatiques**

Les paramètres climatiques étudiés sont la température maximale, l'humidité relative moyenne, et la précipitation. Ce sont des facteurs qui peuvent influencer le comportement des feux (Guiguindibaye *et al.*, 2013). Il s'agit de déterminer la corrélation entre les paramètres climatiques et le nombre de détections de feux ainsi que la surface brûlée. L'analyse statistique consiste à évaluer la dépendance par le calcul du coefficient de corrélation de

Pearson « r » qui mesure la relation linéaire entre les variables aléatoires. Cette analyse permet d'infirmer ou de confirmer la première hypothèse qui stipule que l'ampleur des feux varie en fonctions des saisons et des variables climatiques.

Il s'agit donc d'analyser les relations entre :

- les nombres de feux ou les surfaces brûlées et la température maximale de l'air ;
- les nombres de feux ou les surfaces brûlées et la précipitation ;
- les nombres de feux, les surfaces brûlées et l'humidité relative moyenne.

3.3.2. Analyse temporelle des feux

Cette analyse concerne l'évolution des incendies dans le temps, présentant :

- les nombres des points de feux actifs totaux et moyens par année ; et
- les surfaces brûlées totales et moyennes par année.

3.3.3. Analyse spatiale des feux

Cette analyse est faite dans les unités administratives représentée par le district et concerne :

- le nombre de feux actifs total et moyen par unité administrative par année ; et
- les surfaces brûlées totales et moyennes par unité administrative par année.

Calcul de la fréquence des feux par unité administrative

La fréquence montre le pourcentage de feu dans chaque entité administrative. Elle est calculée par la formule suivante (Valea, 2005) :

$$F = \frac{n_i}{N_t} \times 100$$

n_i : nombre de points de feu dans la limite administrative

N_t : Nombre total de feu

Calcul de la densité des feux par unité administrative

La densité des feux indique le nombre de feu par unité de surface d'une entité administrative. Elle renseigne sur la répartition spatiale du feu en fonction de la superficie administrative.

Elle est obtenue par la formule suivante (Valea, 2005) :

$$D = \frac{n_i}{s_i}$$

- n_i : nombre de points de feu dans la limite administrative
- s_i : surface de l'entité administrative (en km²)

3.3.4. Analyse comparative de la dynamique des feux et de la couverture végétale

Il s'agit de faire une analyse comparative concernant le nombre de feux actifs dans chaque type d'occupation du sol en prenant en compte la période de 2010 à 2015. Les différentes zones identifiées dans le classement d'occupation du sol permettent de ressortir une analyse comparative sur la base d'une relation entre la dynamique des feux et la couverture végétale.

3.3.5. Analyse comparative de l'organisation spatio-temporelle des feux et des stratégies de lutte mises en œuvre

Les données relatives aux actions de lutte ont été classées par année et par entité administrative (district) afin de ressortir une analyse comparative par rapport aux résultats des données satellitaires obtenus moyennant des graphiques présentant les deux types de données. Cette analyse permettra de vérifier l'hypothèse concernant l'insuffisance ou non des actions de lutte contre les feux au niveau des zones potentiellement touchées par le feu.

CHAPITRE 4. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

4.1. Evolution spatio-temporelle des feux

4.1.1. Saisonnalité des feux

La saisonnalité des feux a été déterminée à partir du nombre de feux actifs et des surfaces brûlées au cours de chaque mois sur la période d'observation de 2010 à 2015. La figure 3 présente la répartition saisonnière des feux au niveau de la région Sofia et indique généralement que le feu de brousse persiste durant une grande partie de l'année. Il est constaté une forte variation de ces nombres de points de feux mensuellement.

D'une manière générale, la saison des feux dans la région Sofia s'étale d'avril à décembre. La saisonnalité est surtout caractérisée par un démarrage des feux actifs en avril, et qui se poursuit durant la période sèche avec un accroissement plus prononcé en octobre, novembre et décembre ayant connu respectivement des nombres d'occurrence de feux de 2242, 1559, et 1141 sur une période des données sur six (6) ans. Cette occurrence des feux s'estompe en décembre et devient quasi inexistant les trois mois suivants (janvier, février, mars).

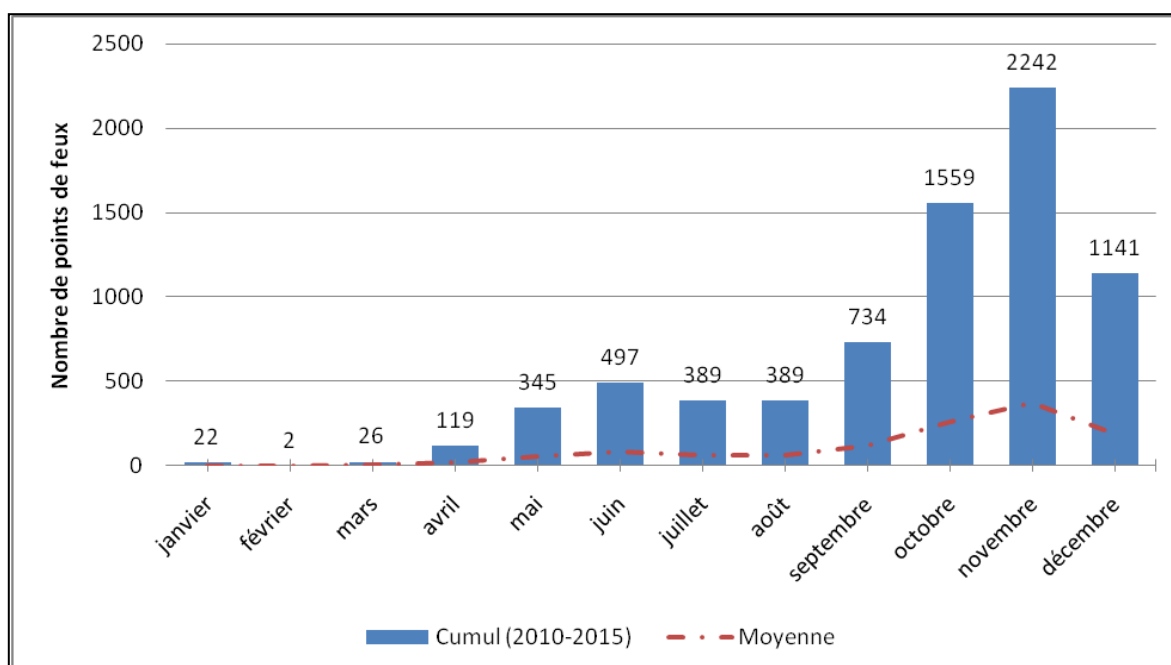


Figure 3 : Variation mensuelle des points de feux actifs (cumul et moyenne) dans la région Sofia de 2010 à 2015

Concernant les surfaces brûlées (Figure 4), le mois d'octobre est sujet aux plus grandes étendues brûlées, avec 797 903,36 ha au total sur 06 ans et en moyenne 132 983,89 ha traversés par les feux par an. Par contre, le mois de février ne connaît pas de surfaces brûlées, et les mois de janvier, mars et avril ont des surfaces brûlées nettement inférieures aux autres mois de l'année. En effet, ces mois coïncident à la saison pluvieuse dans la région.

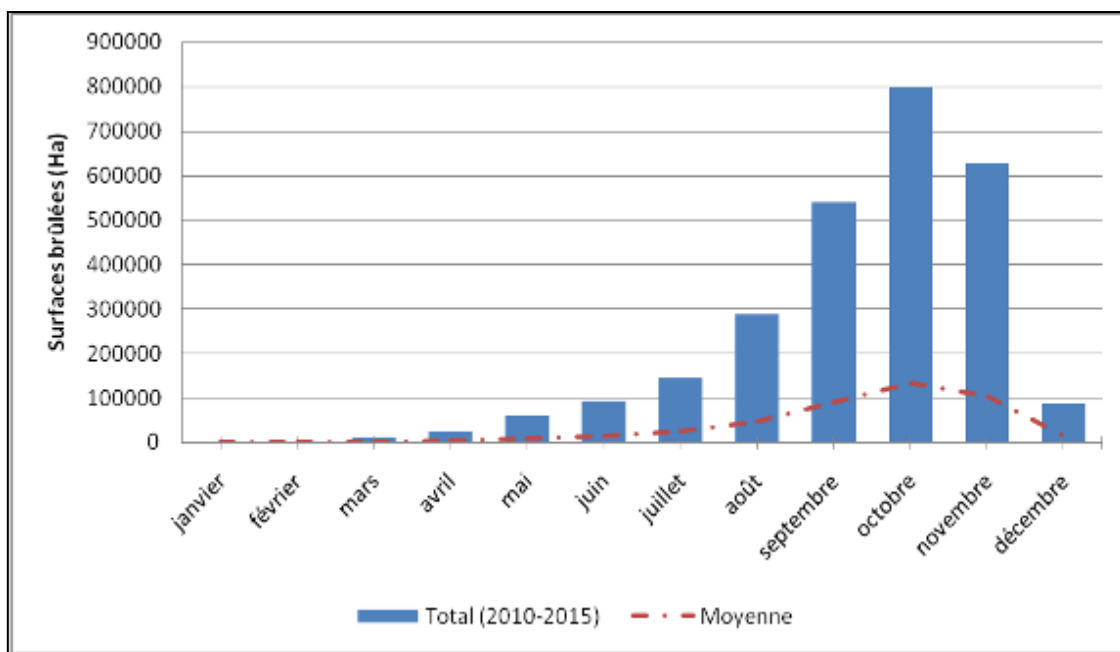


Figure 4 : Variation mensuelle des surfaces brûlées dans la région Sofia de 2010 à 2015

4.1.1.1. Corrélation entre occurrences de feux actifs et paramètres climatiques

Les résultats de l'analyse de la relation entre les feux actifs et les variables climatiques sont présentés dans le tableau 3 avec les détails des corrélations en Annexe 5.

Tableau 3 : Analyse de corrélation entre nombre de feux actifs et paramètres climatiques

Paramètres	Coefficient de Pearson	Test de signification (seuil 0.05)
Température maximale	0,551878	Significatif
Humidité relative moyenne	-0,307138	Significatif
Précipitation	-0,175866	Non significatif

Le paramètre climatique Température maximale observé de 2010 à 2015 a une corrélation positive significative de 0,55 avec les nombres de feux enregistrés au cours de la même période (Figure 5). Tandis que l'humidité relative est inversement corrélée avec une corrélation négative significative de -0,307 à l'observation des feux (Figure 6). La corrélation n'est pas significative en ce qui concerne la précipitation (Figure 7).

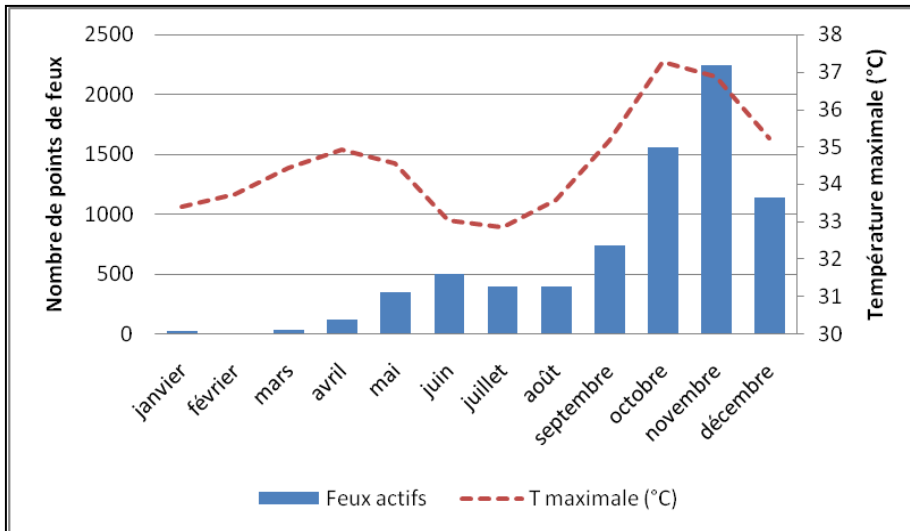


Figure 5 : Interrelation température maximale- nombre de feux actifs

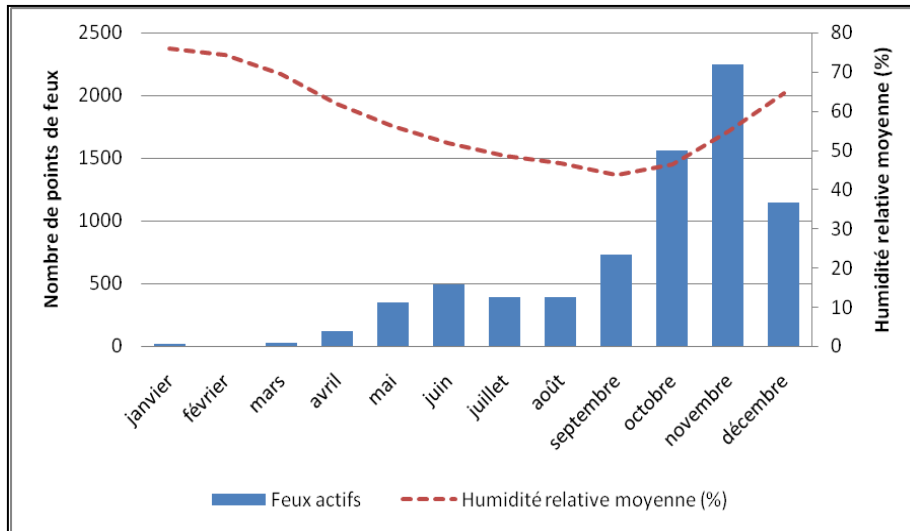


Figure 6 : Interrelation humidité relative moyenne- nombre de feux actifs

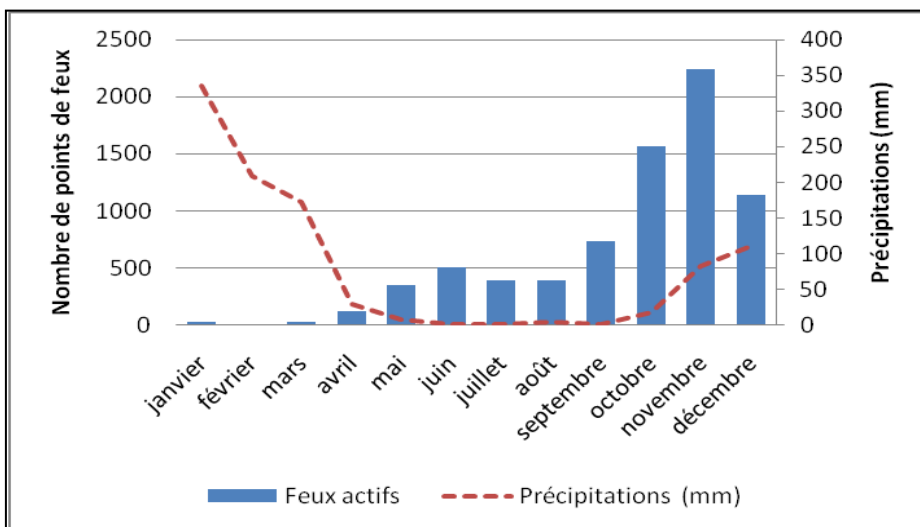


Figure 7 : Interrelation précipitations – nombre de feux actifs

4.1.1.2. Corrélation entre surfaces brûlées et paramètres climatiques

Le tableau ci-dessous résume les analyses de corrélations entre les paramètres climatiques observés et les surfaces brûlées de la période de 2010 à 2015, avec les détails en Annexe 6.

Tableau 4 : Analyse de corrélation entre surfaces brûlées et paramètres climatiques

Paramètres	Coefficient de Pearson	Test de signification (seuil 0.05)
Température maximale	0,620055	Significatif
Humidité relative moyenne	-0,600863	Significatif
Précipitation	-0,312608	Significatif

Les tests sont tous significatifs pour les trois paramètres observés. Le paramètre climatique Température maximale observé de 2010 à 2015 a une corrélation positive significative de 0,62 avec les surfaces brûlées enregistrées (Figure 8) tandis que l'humidité relative (Figure 9) et la précipitation (Figure 10) sont inversement corrélées avec respectivement des corrélations négatives significatives de -0,6 et -0,31 à l'observation des feux.

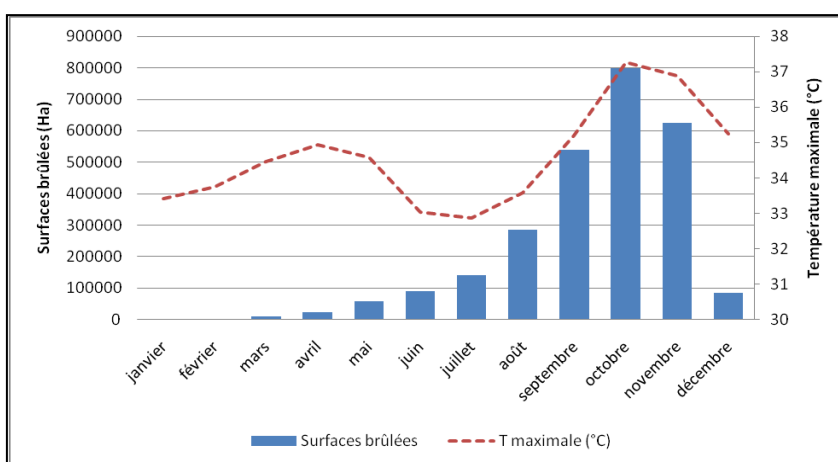


Figure 8 : Interrelation température maximale- surfaces brûlées

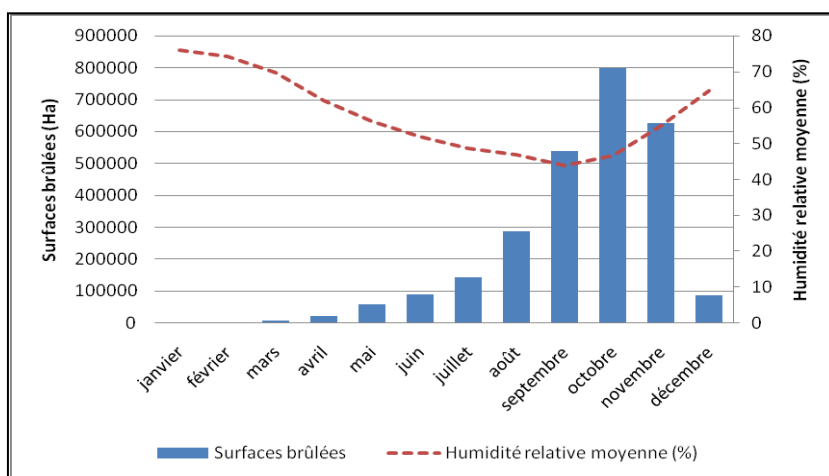


Figure 9 : Interrelation humidité relative moyenne- surfaces brûlées

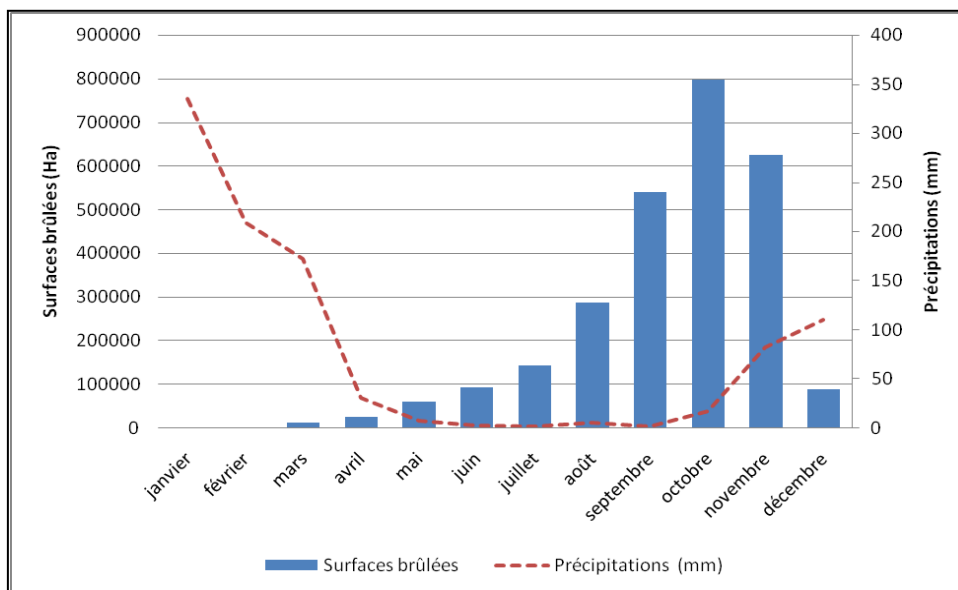


Figure 10 : Interrelation précipitations- surfaces brûlées

4.1.2. Evolution temporelle des feux

Nombres des points de feux actifs par an

La figure 11 indique l'évolution du nombre de détections de feux actifs totaux annuels dans la région Sofia pendant la période 2010 – 2015. Le nombre de feux ne suit pas une tendance générale mais varie énormément d'année en année. La variation est caractérisée par l'alternance d'une année à une abondance élevée de feu avec une autre moins abondante. L'année 2013 est celle qui est confrontée au nombre le plus élevé de points de feux avec 2018 points de feux, tandis que l'année 2012 est celle qui en a connu le moins avec 882 points de feux.

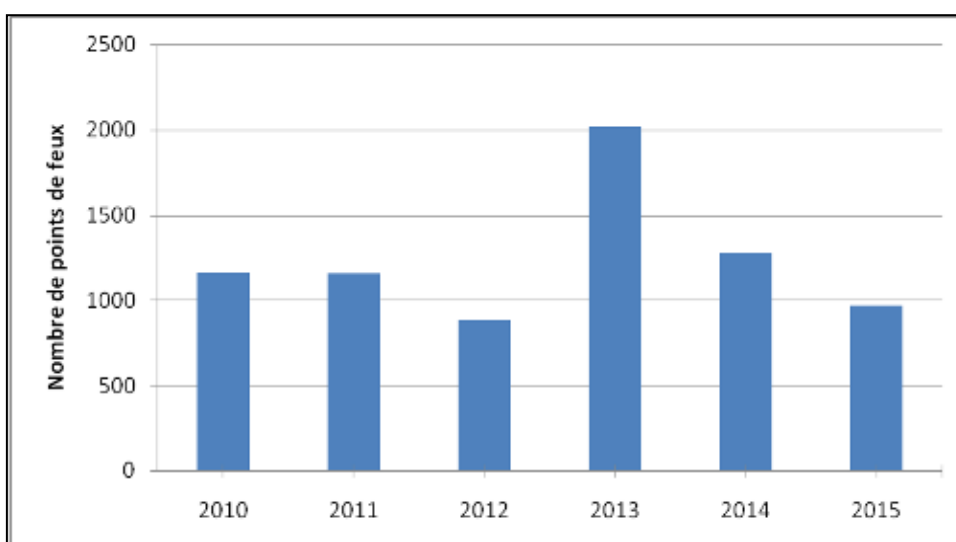


Figure 11 : Evolution annuelle de feux actifs dans la région Sofia de 2010 à 2015

Superficies brûlées annuelles par an

La figure 12 indique l'évolution de surfaces brûlées annuelles dans la région Sofia pendant la période 2010–2015. L'envergure des surfaces brûlées change énormément d'année en année. En général, les surfaces brûlées annuelles ne suivent pas une tendance définie. Il est constaté une diminution de surfaces brûlées en 2011, puis cela a largement augmenté en 2013, mais est redescendu en 2014 et 2015. L'année 2013 est confrontée à la plus grande surface brûlée en six ans, avec environ 605 662 ha de surfaces traversées par les feux. Ce qui représente environ 1,15% de la superficie de la région. L'année 2011 est par contre celle qui connaît le moins de dégâts avec 378 253 ha traversés par les feux.

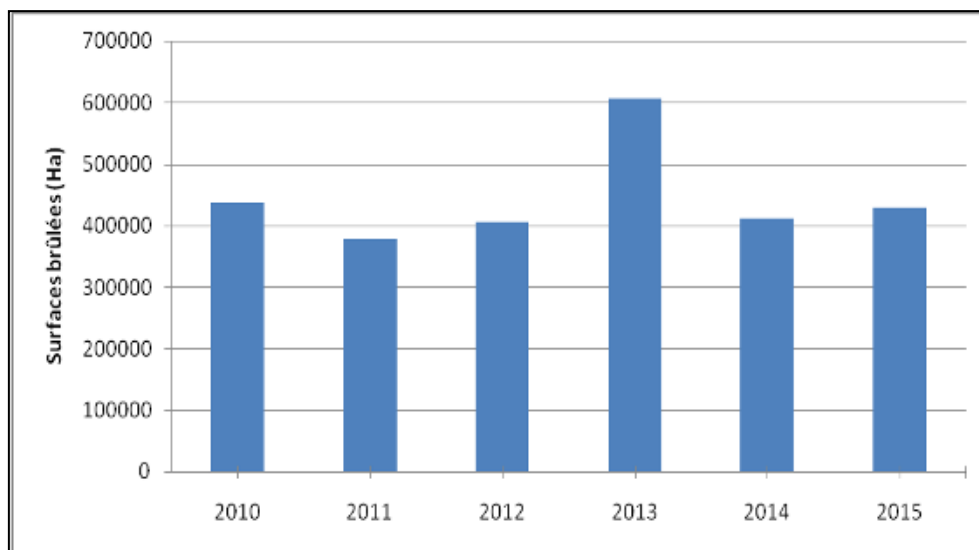


Figure 12 : Evolution annuelle de superficies brûlées dans la région Sofia de 2010 à 2015

4.1.3. Evolution spatiale des feux

Le traitement des toutes les images de la période 2010-2015 a permis d'avoir des résultats sous forme de cartes pour chaque mois qui ont été par la suite combinées par année. La compilation de ces résultats a abouti à l'établissement de six cartes des points de feux actifs (Carte 6 et 7) et six cartes de surfaces brûlées pour chaque année (Carte 8 et 9).

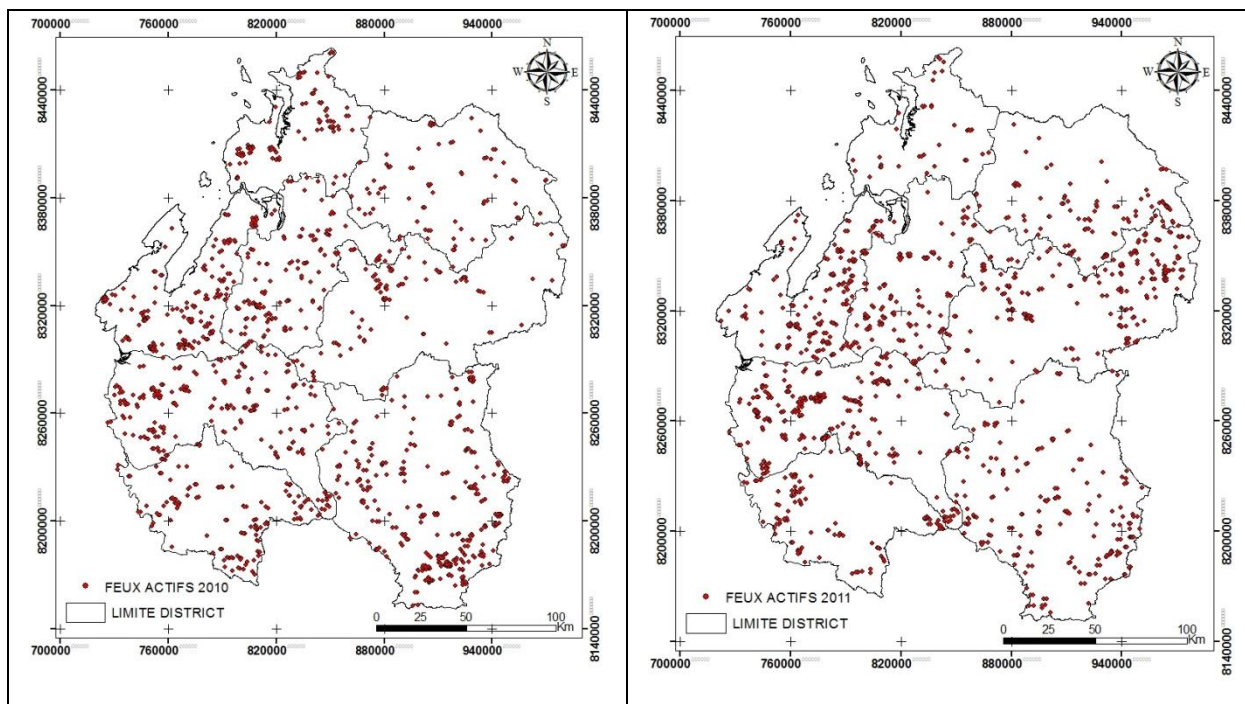
Le suivi de répartition spatiale des points de feux actifs entre 2010 et 2015 indique que les feux sont présents dans presque toute la totalité de la région. Au total, 7465 points de feux ont été recensés dans toute la région durant la période de 2010 à 2015. Les données MODIS (Burned Areas) des surfaces brûlées ont permis de cartographier et d'estimer les surfaces brûlées pour la période 2010-2015. Les résultats obtenus (Tableau 5) indiquent que 2,667 millions d'ha ont été brûlées dans toute la région soient environ 5,08% de la superficie de la

région. Ce qui montre l'ampleur de la dégradation de la végétation et des sols causés par les feux dans la région Sofia.

Tableau 4 : Récapitulatif des résultats concernant les feux (Région Sofia : 2010 à 2015)

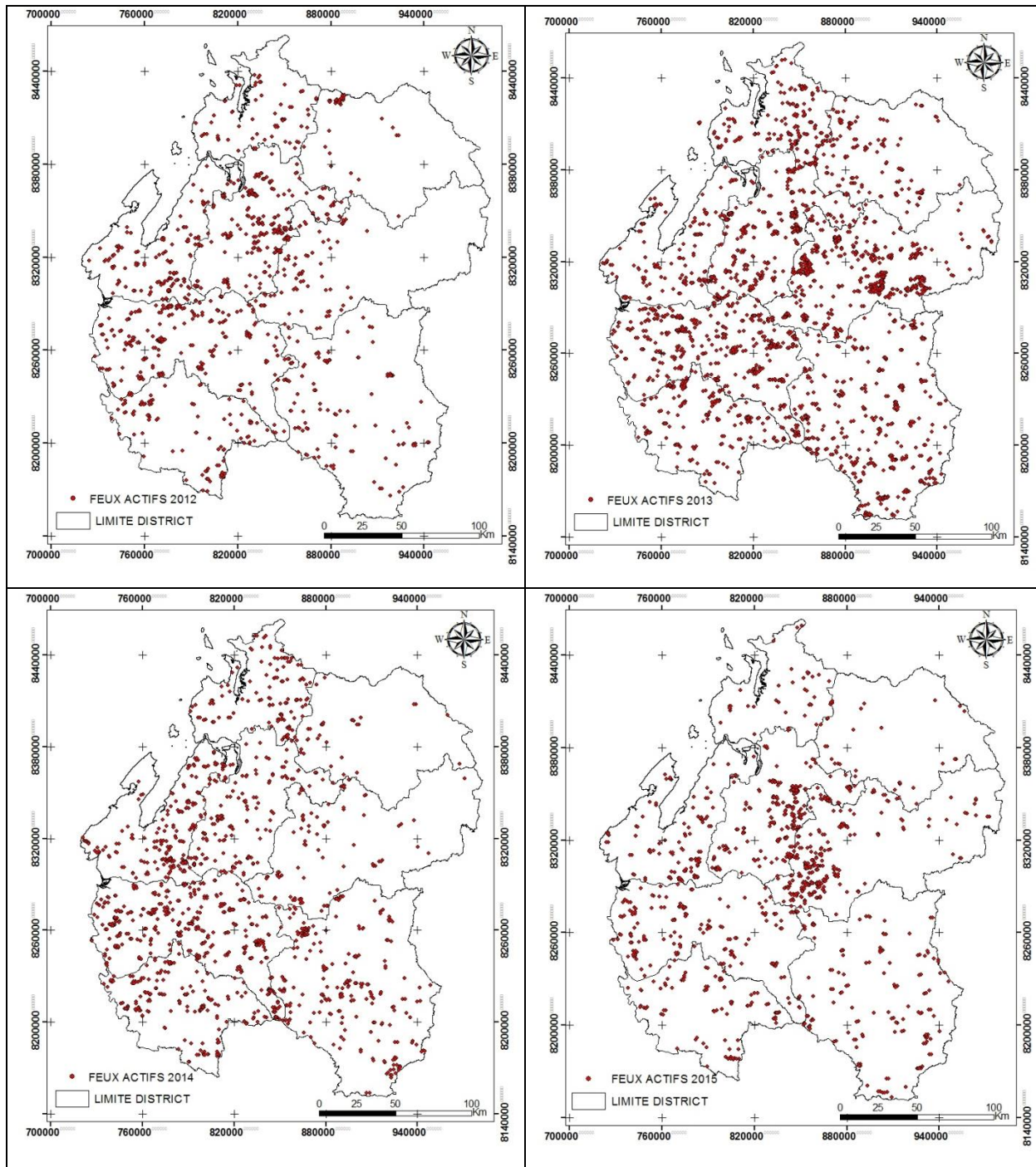
Année	Feux actifs	Surfaces brûlées (Ha)	Surfaces brûlées (%)
2010	1165	436520,82	0,83%
2011	1156	378253,562	0,72%
2012	883	406113,65	0,77%
2013	2018	605662,36	1,15%
2014	1272	410773,06	0,78%
2015	971	429923,26	0,82%
Total 2010-2015	7465	2667246,71	5,08%

La localisation des pixels de feux au cours des six années montre une différence de répartition de feu entre la partie sud et la partie nord de la région. D'une façon générale, cette différence de fréquence spatiale tient à deux facteurs essentiellement : d'une part la différence entre le climat, les formations végétales, la topographie et, d'autre part les pratiques en matière d'utilisation et de gestion des ressources naturelles. La partie nord est composée essentiellement de forêts denses humides tandis que la partie sud et centre est surtout composée par des formations sèches et des savanes. De cette façon, les pratiques pastorales sont plus fréquentes dans la partie centre et sud.



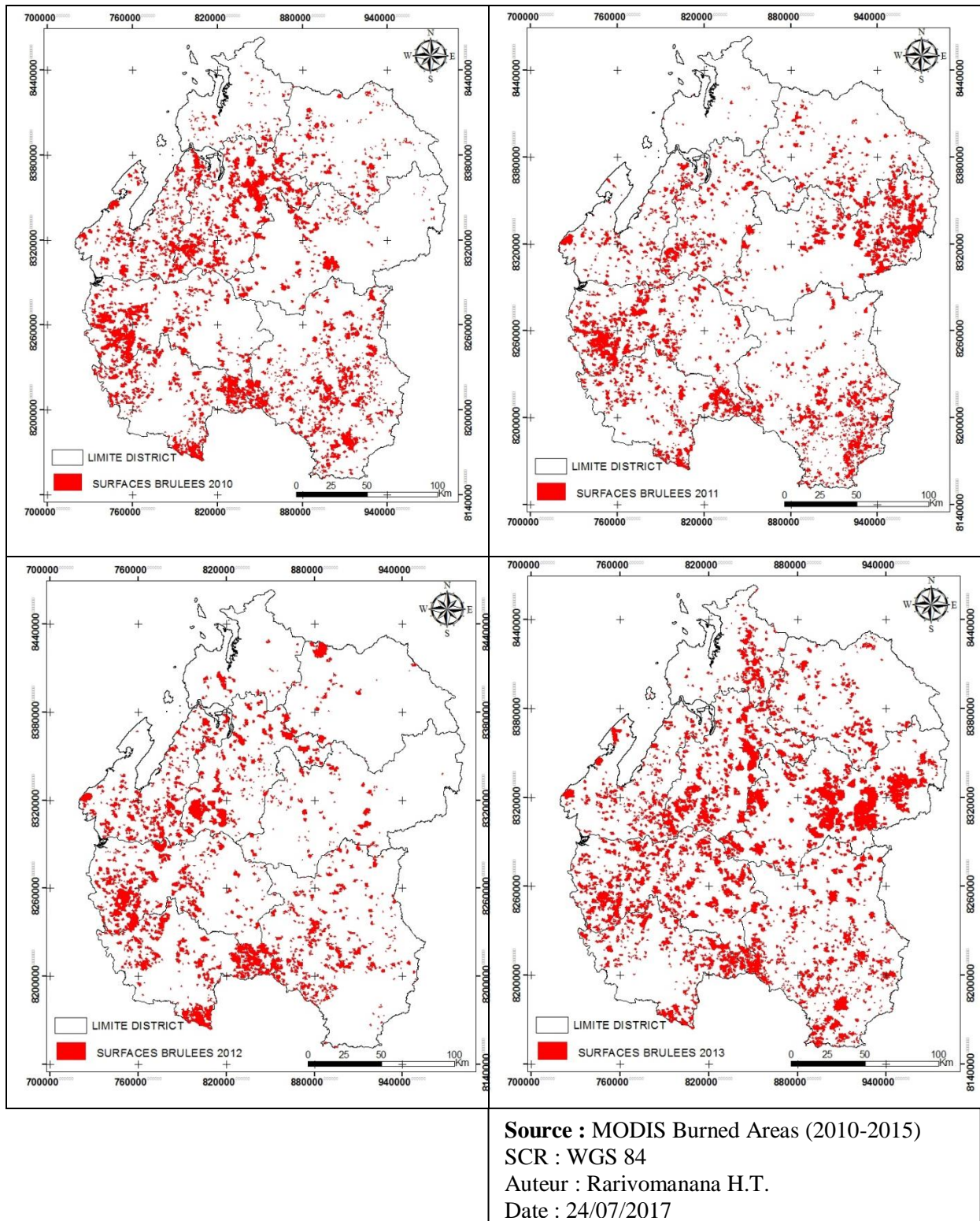
Carte 6 : Répartition spatiale des feux actifs 2010 et 2011

Source : MODIS Active fires (2010-2015)
 SCR : WGS 84 EPSG 4326
 Auteur : Rarivomanana H.T.
 Date : 24/07/2017

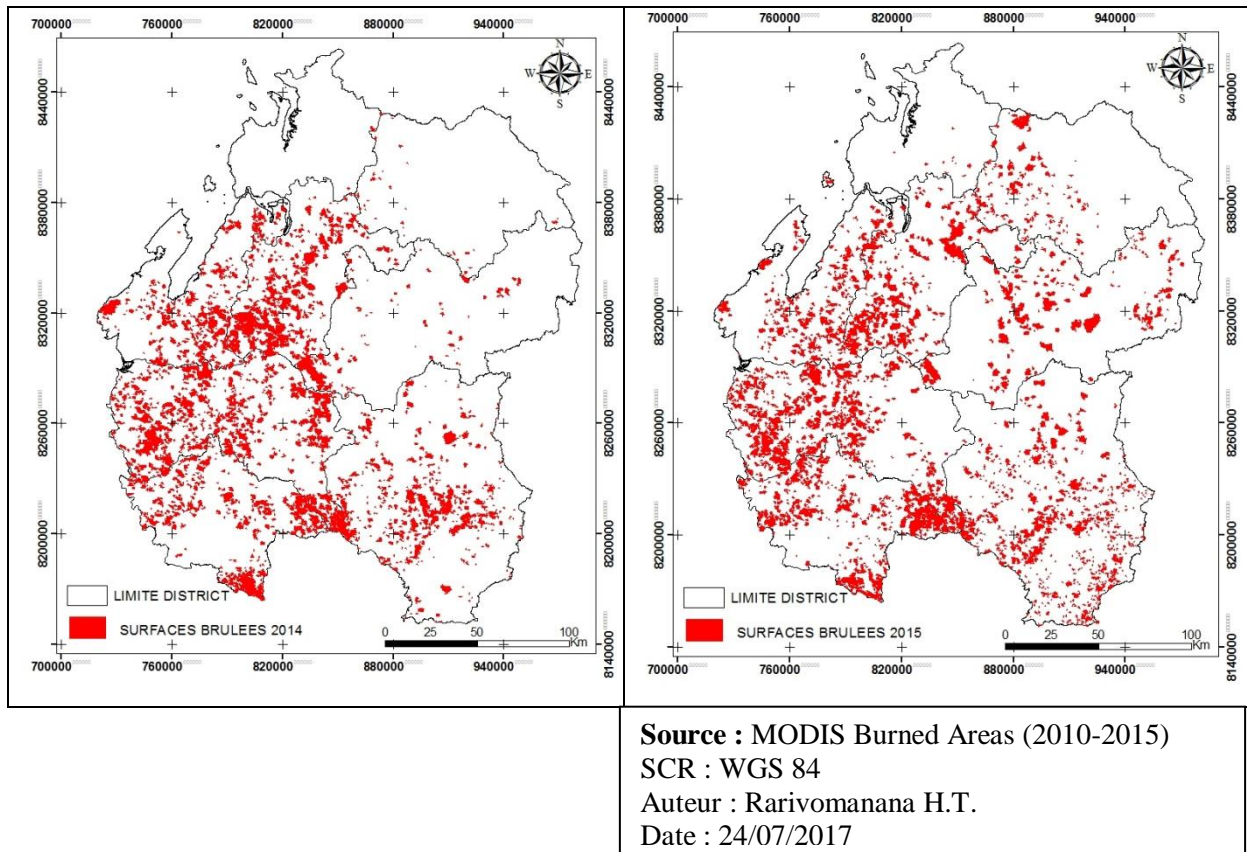


Source : MODIS Active fires (2010-2015)
SCR : WGS 84 EPSG 4326
Auteur : Rarivomanana H.T.
Date : 24/07/2017

Carte 7 : Répartition spatiale des feux actifs 2012, 2013, 2014 et 2015



Carte 8 : Répartition spatiale des surfaces brûlées 2010, 2011, 2012 et 2013



Carte 9 : Répartition spatiale des surfaces brûlées 2014 et 2015

Nombre de feux actifs par district de 2010 à 2015

La figure 13 présente le nombre de feux actifs au niveau des sept (07) unités administratives, de 2010 à 2015

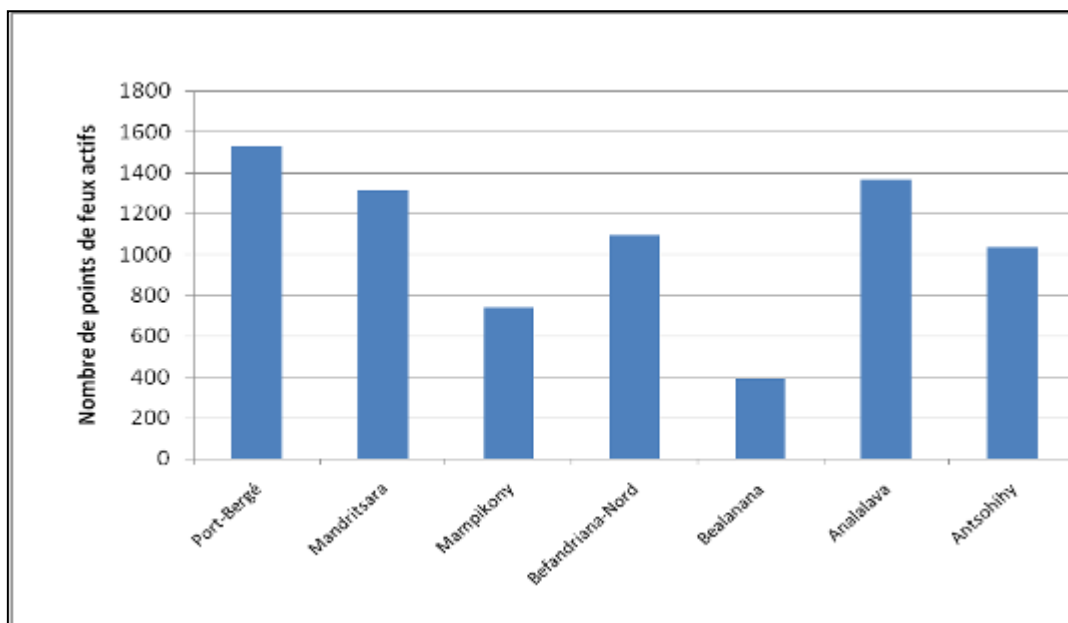


Figure 13 : Variation du nombre total de feux actifs par district de 2010 à 2015

L'analyse de la répartition des surfaces brûlées par unité administrative (Figure 13) montre de fortes occurrences des feux dans le district de Port-Bergé avec un total de 1526 feux actifs recensés pendant la période de 2010 à 2015 alors que celui de Bealanana a l'occurrence la plus faible enregistrant au total 392 points de feu.

Superficie brûlée par district de 2010 à 2015

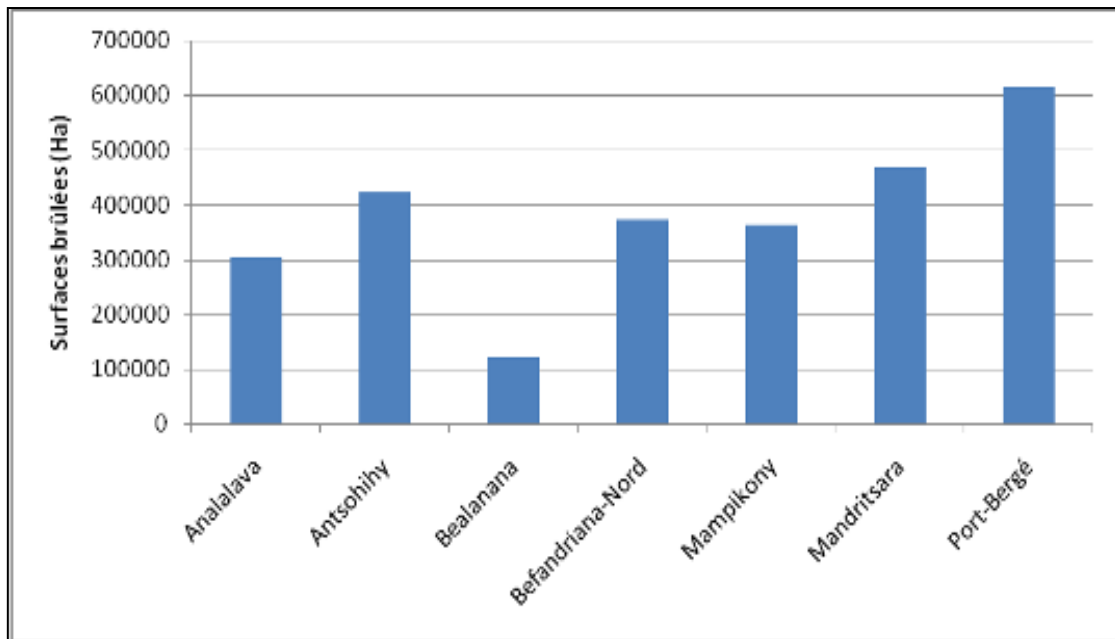
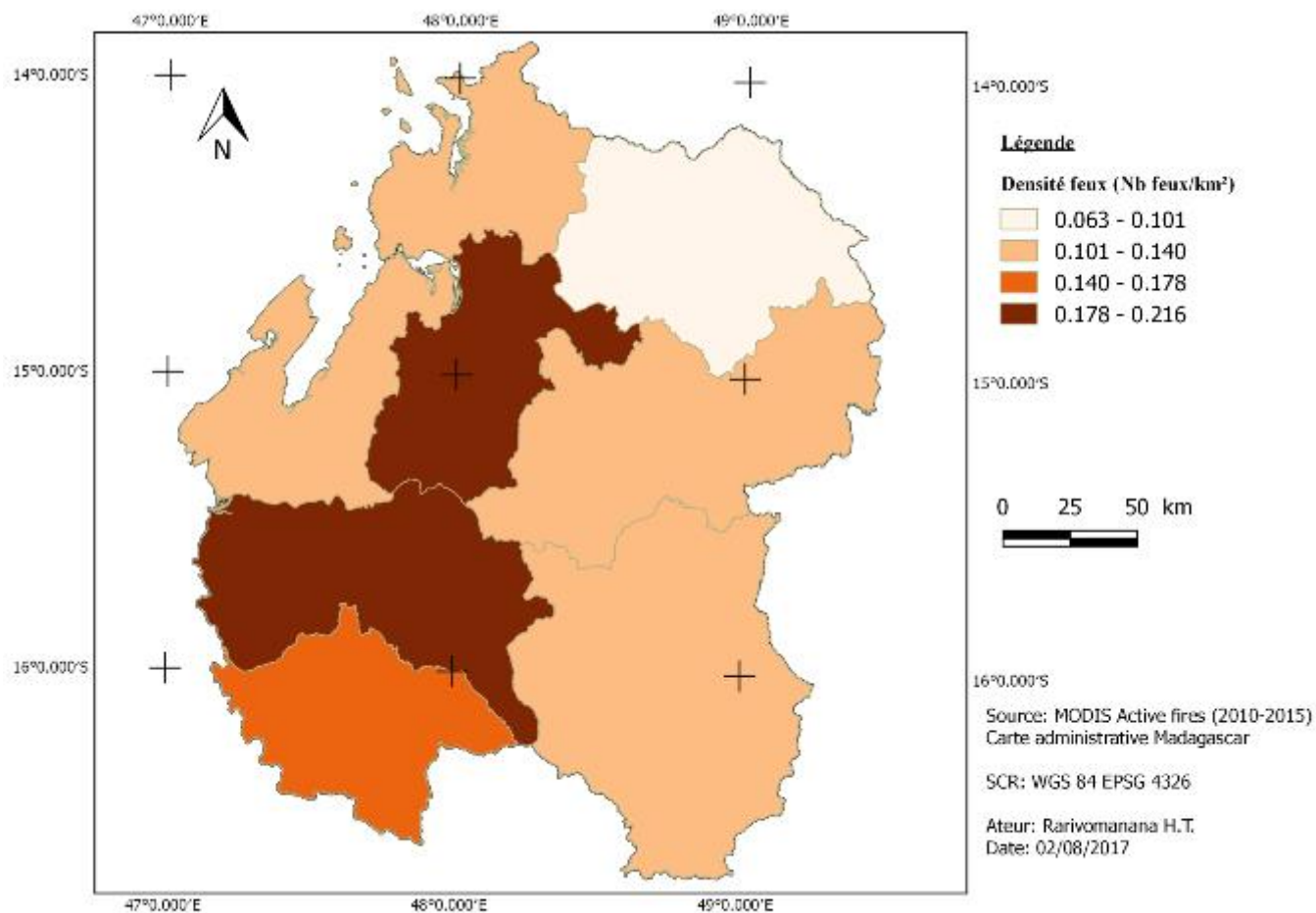


Figure 14 : Variation de la surface brûlée annuelle par district de 2010 à 2015

Tous les districts de la région sont affectés par le feu de l'année 2010 à 2015 (Figure 14). Le district de Port-bergé enregistre la plus grande surface brûlée de l'ordre de 614 326 ha tandis que le district de Bealanana est la moins affectée par les feux avec 121 052 ha de surfaces brûlées de 2010 à 2015.

Densité des feux par District

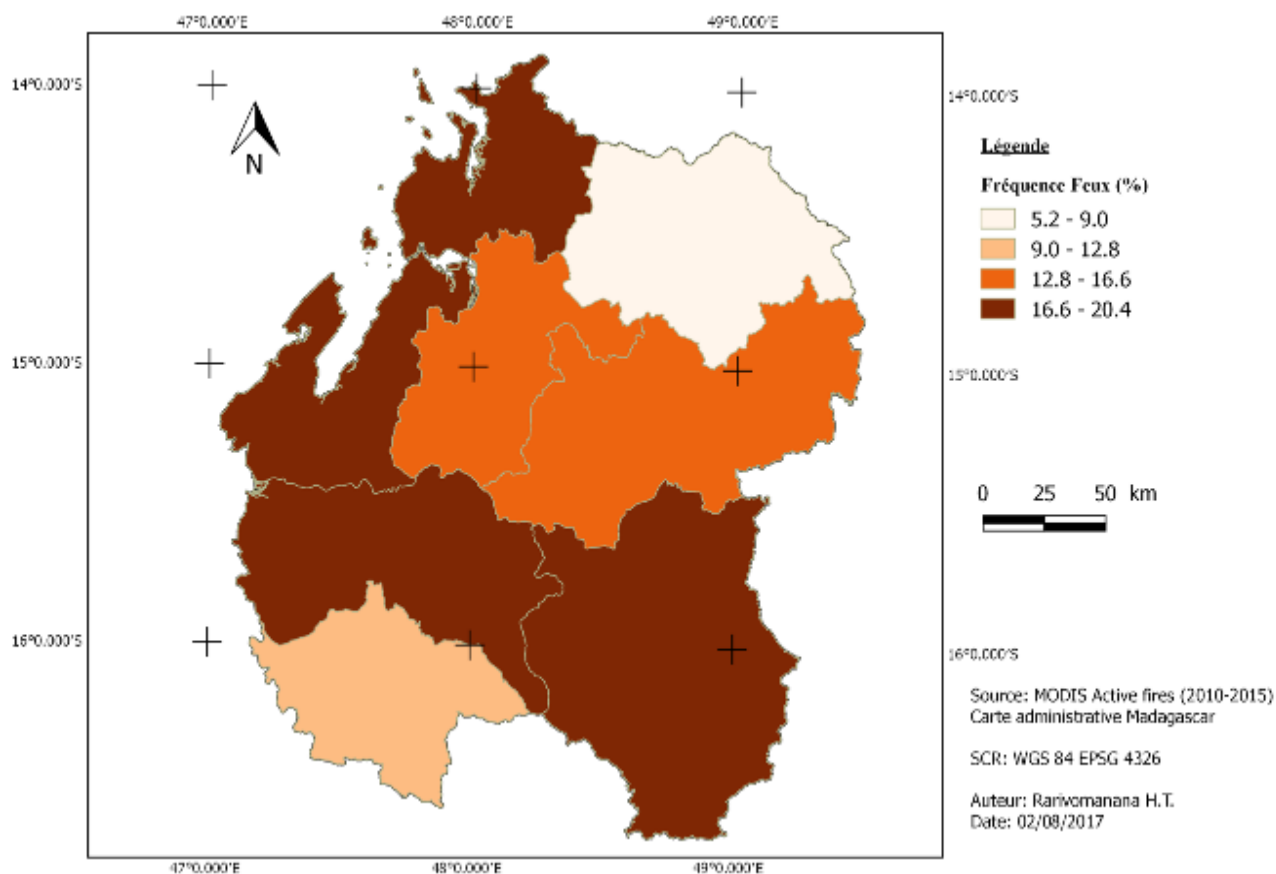
La carte 10 ci-après présente la densité des feux dans les sept (07) districts de la région Sofia. La distribution des feux ne sont pas les mêmes au niveau des 07 districts. Les districts d'Antsohihy et de Port-Bergé sont les zones les plus touchées par le feu tandis que le district de Bealanana est celui qui rencontre le moins de feux durant les six années. Ces différences peuvent donc provenir de la diversité de relief, du type de végétation et des climats.



Carte 10 : Densité de feux par district durant la période 2010-2015

Fréquence des feux actifs par District

La carte 11 présente les fréquences des feux actifs détectés au cours de la période 2010-2015. La fréquence d'occurrence est plus forte dans les 03 districts de Port-Bergé, de Mandritsara, et d'Analalava. Le district de Bealanana est celui où l'on rencontre une fréquence la plus faible.



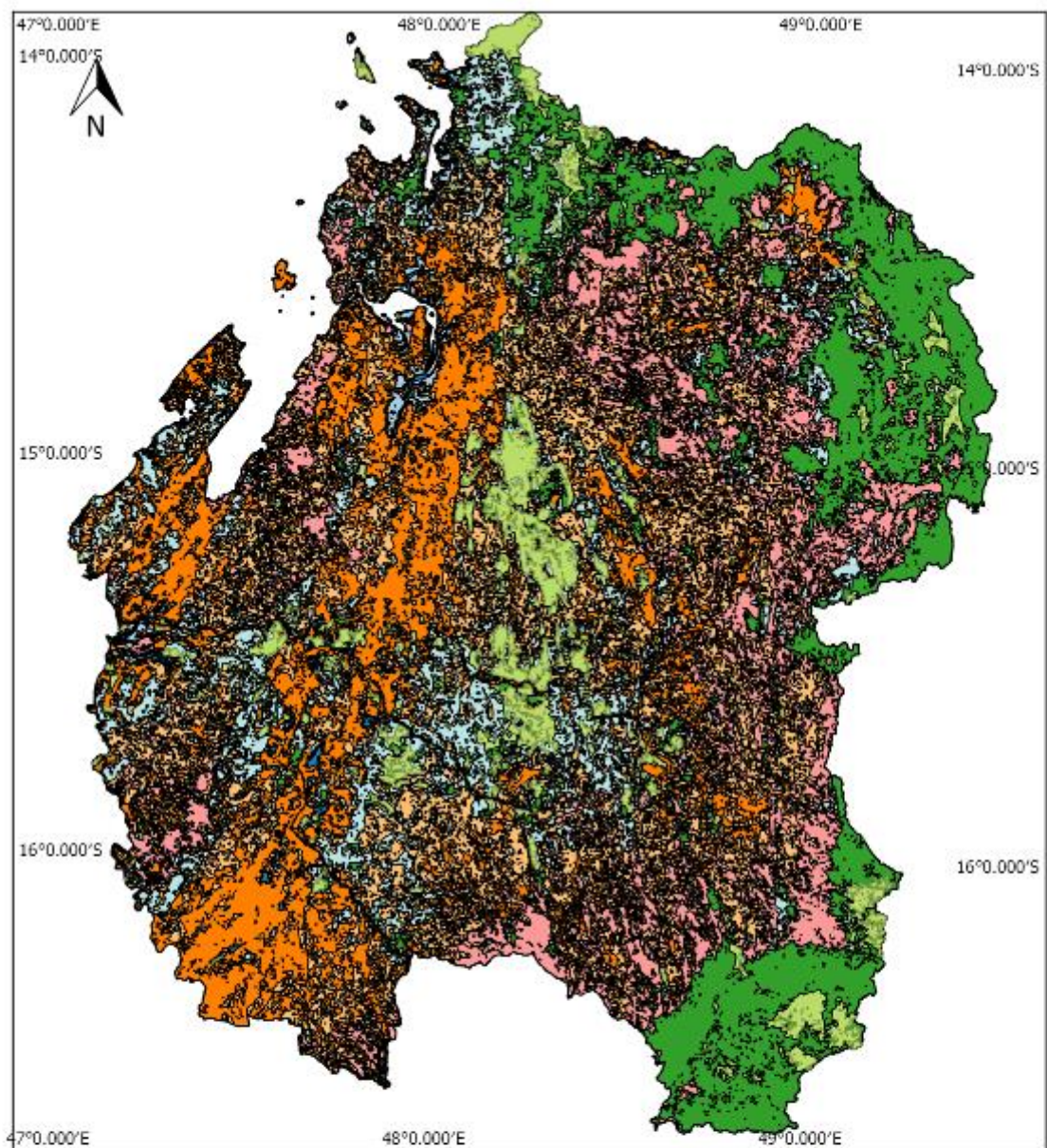
Carte 11 : Fréquence de feux par district durant la période 2010-2015

4.2. Occurrences de feux en fonctions des types d'occupation de sol

L'analyse de la carte d'occupation du sol a fait ressortir 09 types d'occupation de sol dans la région Sofia (Carte 12), mais essentiellement 07 occupations (Tableau 5) sont reliées avec le nombre de feux actifs des données Modis Active fires.

Tableau 6 : Nombre de feux actifs par occupation du sol

Types d'occupation du sol	Surface de l'occupation (km ²)	Nombre de feux actifs (2010-2015)
Mosaïque de végétation (prairie/formations arbustives/forêt) (50-70%) / terres cultivées (20-50%)	3774,86	777
Forêt humide sempervirente ou dégradée (>15%) ou forêt semi-décidue (>5m)	8234,21	803
Forêt sèche décidue (5m) (>40%)	7306,12	1211
Mosaïque de forêt ou formation arbustive (50-70%) / prairie (20-50%)	687,11	96
Mosaïque de prairie (50-70%) / Savane arbustive (20-50%)	14290,71	2132
Savane arbustive (<5m)	8315,5	1115
Prairie, savane herbacée (>15%)	10178,19	1316



Légende

Occupation du sol

- Mosaïque de végétation (prairie/formations arbustives/forêt) (50-70%) / terres cultivées (20-50%)
- Forêt humide sempervirente ou dégradée (>15%) ou forêt semi-décidue (>5m)
- Forêt sèche décidue (5m) (>40%)
- Mosaïque de forêt ou formation arbustive (50-70%) / prairie (20-50%)
- Mosaïque de prairie (50-70%) / Savane arbustive (20-50%)
- Savane arbustive (<5m)
- Prairie, savane herbacée (>15%)
- Mangroves
- Plans d'eau

Source: Globcover 2009
 Carte administrative Madagascar
 SCR: WGS 84 EPSG 4326
 Auteur: Rarivomanana H.T.

Carte 12 : Occupation du sol dans la région Sofia

D'après l'analyse de l'occupation du sol, la zone d'étude dispose de 7 types d'unité de couverture végétale (Tableau 6). Les résultats démontrent que les savanes et les prairies sont les plus exposées au feu avec 5338 points de feux totaux, de la période 2010 à 2015, si on tient compte de l'ensemble : Mosaïque de végétation (prairie/formations arbustives/forêt) (50-70%) / terres cultivées (20-50%), Mosaïque de prairie (50-70%) / Savane arbustive (20-50%), Savane arbustive (<5m), et Prairie, savane herbacée (>15%). Ce qui représente environ 71,53 % en proportion des points de feux totaux. Nous pouvons donc dire que le risque de feu est lié au type et surtout l'état de la couverture végétale. La savane herbeuse, caractérisée par la dominance d'*Aristida spp.*, *Hyparrhenia rufa* et *Heteropogon contortus*, constitue des combustibles herbacés facilement inflammables (Randrianasolo, 2013). Les formations forestières denses humides ont un risque de feu plus faible avec 803 points de feux recensés. En effet, ces formations sont surtout composées par des combustibles lourds qui requièrent de l'énergie excessive pour s'enflammer (Randrianasolo, 2013).

En général, on peut distinguer donc deux grands groupes d'occupation du sol (Figure 15) :

- La formation savanicole ; et
- La formation forestière.

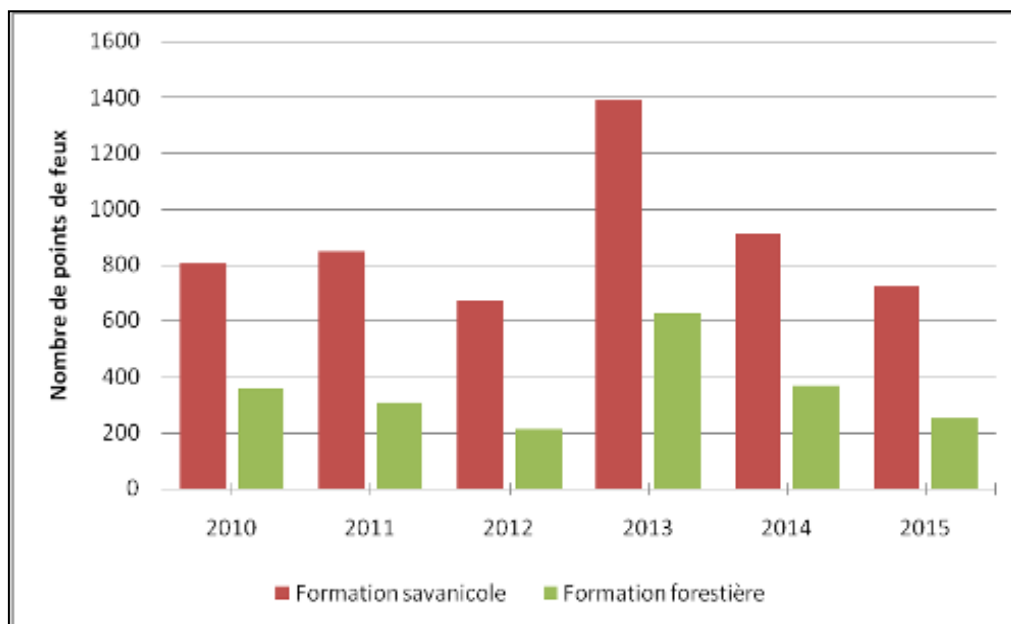


Figure 15 : Détection de feux actifs en formation savanicole et en formation forestière

Densité des feux par type d'occupation

L'étude a pu montrer que la répartition des feux n'est pas homogène, avec des densités variables suivant les types d'occupation du sol. Le feu est donc régi par la structure de la végétation.

Tableau 7 : Densité des feux par type d'occupation du sol

Types d'occupation du sol	Densité (Nb feux/km ²)
Mosaïque de végétation (prairie/formations arbustives/forêt) (50-70%) / terres cultivées (20-50%)	0,206
Forêt humide sempervirente ou dégradée (>15%) ou forêt semi-décidue (>5m)	0,097
Forêt sèche décidue (5m) (>40%)	0,166
Mosaïque de forêt ou formation arbustive (50-70%) / prairie (20-50%)	0,140
Mosaïque de prairie (50-70%) / Savane arbustive (20-50%)	0,149
Savane arbustive (<5m)	0,134
Prairie, savane herbacée (>15%)	0,129
Mangroves	0,012

Fréquence des feux par type d'occupation

A travers les nombres des points actifs dans chaque type d'occupation du sol, nous avons pu constater les discontinuités paysagères qui déterminent les possibilités d'extensions des feux. Les feux sont surtout fréquents dans les formations savaniques, où le risque de feu est très élevé (Figure 16). La partie couverte par les forêts denses humides sempervirentes ou les forêts humides dégradées sont moins concernées par le feu de brousse.

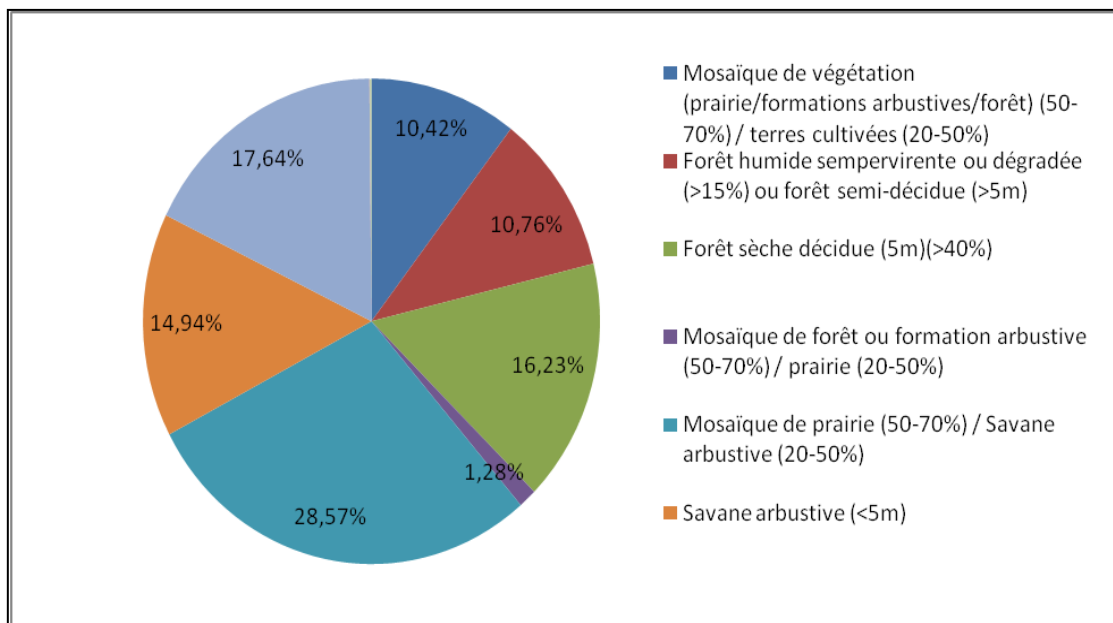


Figure 16 : Fréquence des feux par type d'occupation du sol

En utilisant les données interprétées de la carte de Globcover, combinées avec les résultats de l'interprétation des images MODIS, la fréquence des feux est surtout élevée dans les formations savaniques et les prairies.

4.3. Analyse des stratégies de lutte contre les feux

Les stratégies de lutte contre les feux menées par la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Ecologie et des Forêts de la région Sofia, inscrites dans ses grandes lignes d'activités, se basent essentiellement sur deux aspects : les actions de lutte préventive et les actions de lutte active.

4.3.1. Sensibilisation en matière de lutte contre les feux de brousse

Lors de la réunion de sensibilisation, les travaux réalisés se résument comme suit :

- Sensibiliser, conscientiser, enseigner la population sur les causes, les méfaits, les impacts négatifs de feux de brousse et défrichement sur l'environnement, l'agriculture et même l'élevage ; et expliquer les mesures préventives et actives sur les feux de brousse en introduisant les textes en vigueur relatifs aux feux et aux défrichements.
- Poser aux villageois des questions concernant les feux de brousse afin de tirer leur constatation et leurs idées (Focus group (Photo 8a), entretien individuel, enquête, ...).
- Expliquer les rôles des différentes parties prenantes : villageois, comités, chef du village, Maire, Chef cantonnement, ...

Les activités de sensibilisation des populations locales sont réalisées suivant une approche visant à l'implication et la participation effective de la population. Durant les réunions, les

composantes sociales et démographiques (autorités administratives, autorités coutumières, hommes, femmes, associations, ...) sont assurées d'être représentées. En effet, la présence des autorités administratives (Photo 8b) lors des séances témoignent de leur volonté de participer aux activités de lutte contre les feux, et qu'elles puissent à leur tour transmettre tous les messages véhiculés lors des séances.

La DREEF Sofia a réalisé, de 2010 à 2015, 602 séances de sensibilisations (Figure 17). En notant que les sensibilisations sont effectuées au niveau des villages (fokontany), ceci représente un taux de sensibilisation de 45% pour toute la région en notant qu'il existe 1329 fokontany au total dans toute la région. Les séances de sensibilisations sont largement insuffisantes comparées au nombre de points de feux (7465) qui sont éparpillés dans presque toutes les localités de la région.

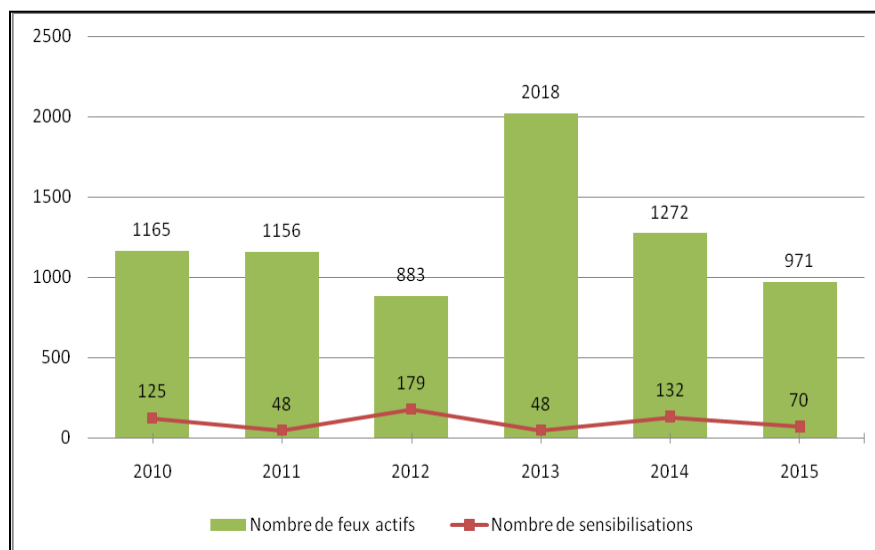


Figure 17 : Nombre de sensibilisations par rapport au nombre de feux actifs détectés



Photo 8 : Sensibilisations : (a) Focus group avec association féminine à Anjozoromadosy (Auteur, 2014) ; (b) Réunion villageoise à Ankazotokana (Auteur, 2014)

4.3.2. Mise en place de comités de lutte contre les feux

Pour pouvoir mettre en place les structures locales de lutte contre les feux dans chaque localité, il est tout d'abord indispensable que la population soit informée et sensibilisée sur toutes les thématiques relatives aux feux. Par la suite, les comités de lutte sont constitués par des représentants des villages. C'est l'ensemble des villageois qui choisissent les personnes qui seront les plus à même, d'après leurs compétences ou leurs rôles dans le village, de faire partie des membres du comité de lutte (Photo 9a). Une formation est ensuite octroyée pour les comités mis en place (Photo 9b) afin de leur permettre d'agir au mieux dans la lutte contre les feux. Au total, 273 comités ont été créés dans toute la région durant la période 2010-2015 (Figure 18). La mise en place des comités locaux de lutte contre les feux n'est pas systématique puisque seulement 21% de toute la région ont bénéficié d'une mise en place de comités de lutte contre les feux.

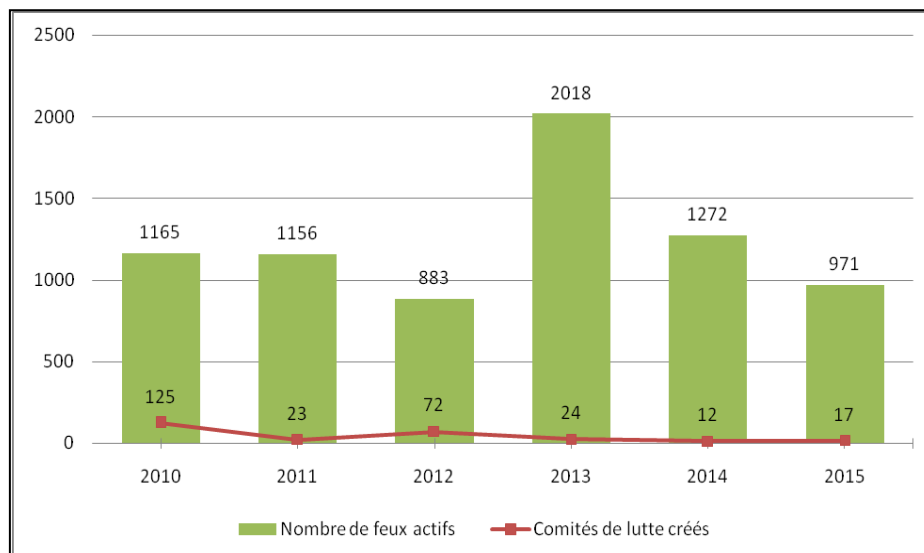


Figure 18 : Nombre de comités de lutte créés par rapport au nombre de feux actifs détectés



Photo 9 : Ankazotokana : (a) Membres de comités de lutte élus (b) Formation des comités de lutte par l'équipe de la DREEF Sofia (Auteur, 2014)

4.3.3. Transfert de gestion des ressources naturelles

La Gestion Contractualisée des Forêts (GCF) est un mode de transfert de gestion des forêts aux communautés de base en vue d'une gestion locale durable et sécurisée des ressources forestières. Les populations locales peuvent ainsi gérer elles-mêmes leurs ressources sur la base d'un contrat de transfert de gestion conclu avec l'État. Les outils de gestion comprennent un plan d'aménagement et de gestion simplifié, un cahier des charges, un plan de travail annuel et un dina⁴. Ainsi, les activités de lutte contre les feux figurent parmi les activités inscrites dans ces outils de gestion. Au total, 71 COBA (Tableau 8) ont été mises en place depuis l'année 2015 (Photo 10), ce qui représente une superficie totale gérée (forêts et savanes) estimée à 63 538,7 Ha dans toute la région.

Tableau 8 : Communautés de base et superficie gérée dans la région Sofia

District	Nombre de COBA	Superficie gérée (Ha)
Antsohihy	1	3910
Bealanana	36	57713
Mandritsara	1	-
Port-Berger	2	3204,75
Analalava	11	18620
Mampikony	3	3231
Befandriana-Nord	17	38482,95
TOTAL	71 COBA	63 538,7 Ha



Photo 10 : (a) Mise en place de TGRN à Beandrarezona (Auteur, 2013) ; (b) Dotation de tenues pour les membres de COBA par WWF (WWF, 2014)

⁴ Dina : normes sociales ou codes de conduite qui régissent les relations au sein des ou entre communautés (Andriamalala & Gardner, 2010)

4.3.4. Mesure répressive

Contrôle forestier

Le contrôle forestier, une des fonctions régaliennes de l'Etat, joue un rôle important dans l'atteinte de l'objectif de gérer durablement les ressources forestières. La réalisation du contrôle consiste à :

- ✓ Constatation (ou recherche d'infraction) ;
- ✓ Audition et prise de déclaration des délinquants et des éventuels témoins ;
- ✓ Si nécessaire, retenir les présumés délinquants pour une garde à vue aux fins de terminer l'investigation ;
- ✓ Investigation pour identifier les complices et soutenir l'effectivité ou non de l'infraction ;
- ✓ Établissement des procès-verbaux ; et
- ✓ Arrestation et déferrement, saisie et confiscation et assignation

Des contrôles sont ainsi menés en matière de constatation des infractions concernant les feux sauvages ou les défrichements. Au total, 191 PV sont dressés de 2010 à 2015 (Figure 19).

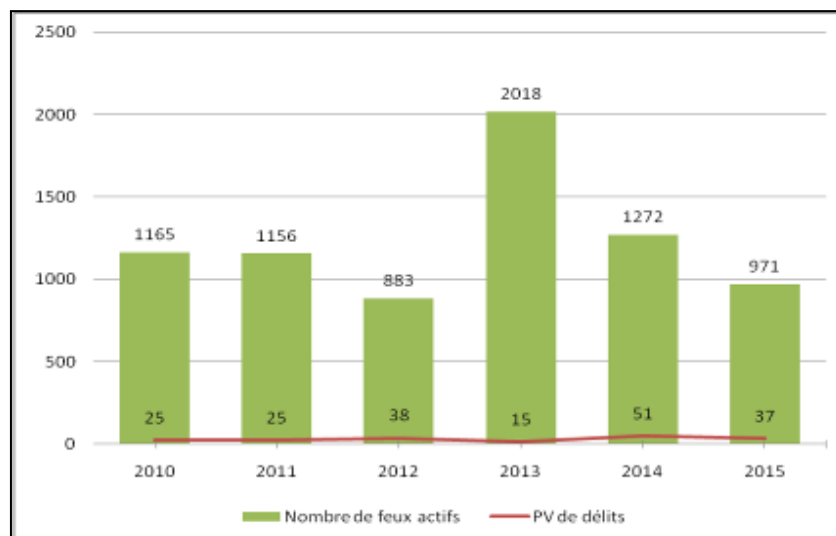


Figure 19 : Nombre de PV de délit sur les feux sauvages et défrichement par rapport au nombre de points de feux

Application de Dina

Des DINA, qui règlementent les feux de brousse ainsi que les forêts, ont été mis en place dans chaque district. Les dina sont élaborés et agréés par la population locale, avec l'appui de l'administration forestière, et pour finir une homologation auprès du Tribunal. Les 07 dina dans les 07 districts sont tous homologués. Ainsi, les prescriptions qu'ils contiennent sont conformes aux dispositions constitutionnelles, législatives et réglementaires en vigueur. Les

clauses des Dina relatives aux feux de brousse et de forêt reprennent plus ou moins les articles des textes officiels au niveau national. Les éléments utiles, à savoir, la définition, l'interdiction, les modalités pour avoir l'autorisation et les obligations techniques (métrage du pare feu, reboisement, période, endroit...) pour chaque type de feux (défrichage ; feux de végétation : feux de culture/nettoisement / pâturage ; feux sauvages).

4.3.5. Lutte active

Concernant la conduite de la lutte active contre le feu, chaque localité, met en place un système organisationnel, fondé sur un règlement pour la mise en œuvre des actions collectives. La lutte contre les feux est obligatoire pour tous les citoyens selon les textes en vigueur. Généralement, les matériels utilisés dans la lutte sont les machettes, les branchages, les feuilles. Les succès obtenus sont fortement liés aux intérêts des populations pour la protection de leurs villages et du pâturage pour leur bétail. Jusqu'ici, les actions de lutte active mises en œuvre à l'intérieur de la région Sofia n'ont pas été répertoriées.

4.3.6. Etablissement des rapports sur les feux

Les rapports concernant les feux ont permis de ressortir une estimation de surfaces brûlées dans toute la région (Figure 20) sur la période de 2010 à 2015. Les rapports proviennent des comités de lutte contre les feux, des communautés de base, de la brigade de lutte contre les feux de brousse, et des cantonnements au niveau de chaque district. D'après ces rapports, 22701,33 ha ont été brûlés de 2010 à 2015, ce qui ne représente que 0,85% des surfaces brûlées des données satellitaires.

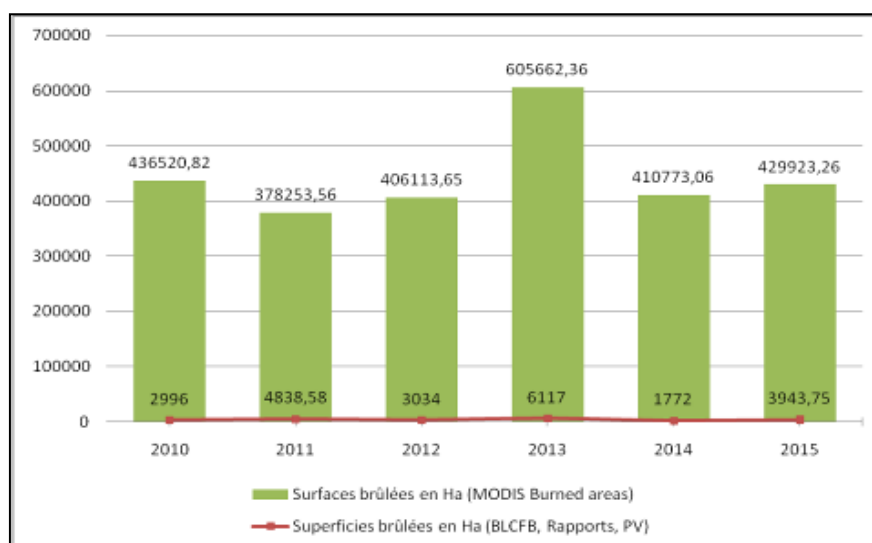


Figure 20 : Superficies brûlées issues des données sur terrain et surfaces brûlées issues des données satellitaires

4.3.7. Mesures de conservation : AP et NAP

Les mesures de conservation garantissent la protection de la biodiversité, des ressources naturelles. Elles contribuent ainsi au développement économique local, régional et national. Le tableau 9 présente les différentes mesures de conservation dans les domaines forestiers de la région.

Tableau 9 : Domaine Forestier National de la région Sofia

DFN	Nombre	Superficie (ha)	Gestion
Réserve Spéciale	4	127 930	Sans promoteur (02) MNP (02)
Forêt classée	3	151 950	Sans promoteur (02) TPF (01)
Réserve Forestière	1	15 620	Sans promoteur
Station forestière	2	14 385	Sans promoteur (01) MAAF (01)
Réserve Naturelle Intégrale	1	48 000	MNP
NAP, Catégorie VI	2	Une partie des 630 491	WWF et TPF
Parc national marin et côtier Reserve de biosphère	1	63 000	MNP
Parc naturel	1	Une partie des 312 000	WCS Makira

Source : DREEF Sofia, 2015

4.3.8. Reboisement

Les activités de reboisement permettent d'accroître les superficies forestières, et de compenser les pertes générées entre autres par les feux de brousse. La superficie totale reboisée dans la région de 2010 à 2015 s'élève à 2 170,09 ha (Figure 21) seulement alors que la superficie brûlée est de 2 667 246,71 ha.

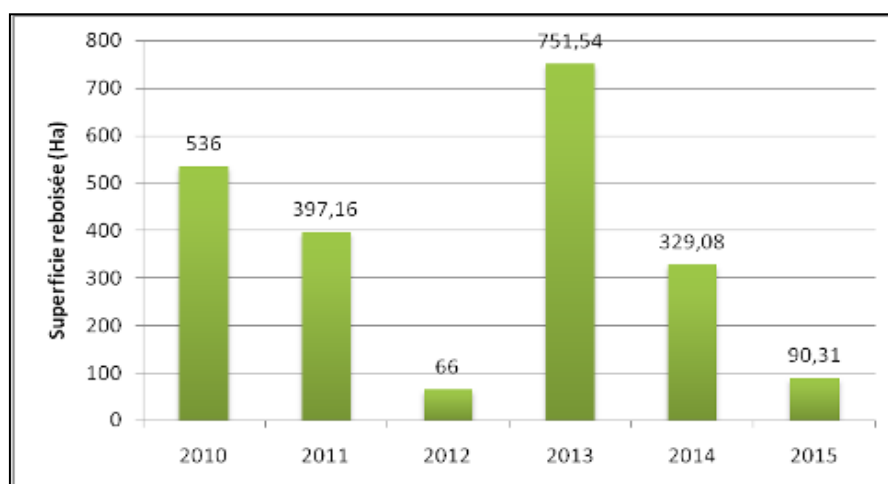


Figure 21 : Superficie reboisée dans la région Sofia (2010 – 2015)

4.3.9. Acteurs en matière de lutte contre les feux

Les parties prenantes concernées dans les mesures de lutte contre les feux comprennent :

- Les autorités administratives : Région, District, Commune ;
- Les Forces de l'ordre, et les Tribunaux de Première Instance ;
- Les partenaires techniques et financiers (WWF, TPF, Durell, AEECL, MAAF, MNP, etc ;
- Les comités de gestion : comités de lutte contre les feux, communautés de base,... ;
- La population locale ; et
- La Direction Régionale de l'Environnement et des Forêts Sofia (DREEF) : disposant d'un Service du Contrôle, d'un Service des Forêts, d'un Service de l'Environnement, qui ont respectivement des activités relatives aux luttes contre les feux. Il existe également une équipe de Brigade de lutte contre les feux de brousse dont les principales activités reposent sur la lutte contre les feux, à savoir la sensibilisation, la formation, la création et la redynamisation des comités. Et enfin, sept (07) cantonnements (services déconcentrés), répartis dans les districts, qui y représentent l'administration. Ils ont comme rôle de constater les délits, faire la sensibilisation,....

4.4. Discussions

4.4.1. Discussions sur l'analyse de la dynamique spatio-temporelle des feux

Limites des données satellitaires Modis

La résolution spatiale des produits Modis Burned areas de 500m peut surestimer ou sous estimer l'étendue des surfaces brûlées par endroit. Des erreurs d'omission des feux surviennent quand l'extension spatiale est insuffisante ou très fragmentée pour être discriminés en tant que feux (Roy & Landmann, 2005) ; ou ceux qui sont cachées par les couvertures nuageuses et des observations du satellite (Roy *et al.*, 2006; Giglio *et al.*, 2009). Pour les feux actifs, certains cas de feux sont perdus quand ils se retrouvent sous les nuages ou quand ils se passent en dehors des heures de passage du satellite (Valea, 2005). Par contre, des changements spectraux non liés aux feux peuvent induire des erreurs de commission comme les zones déboisées, conduisant à une surestimation des feux (Roy *et al.*, 2005 ; Giglio *et al.*, 2009).

Comparaison des données des feux actifs aux données des surfaces brûlées

Il est constaté une tendance générale, plus le nombre de points de feux augmente, plus les surfaces brûlées sont vastes, aussi bien pour les comparaisons mensuelle (Figure 22) qu'interannuelle (Figure 23). Concernant la comparaison mensuelle, la figure 22 montre tout de même des écarts d'octobre à novembre puisque les surfaces brûlées diminuent tandis que les points de feux augmentent. Conséquemment, certains paramètres, autres que le nombre de feux, peuvent influencer sur l'importance des surfaces incendiées.

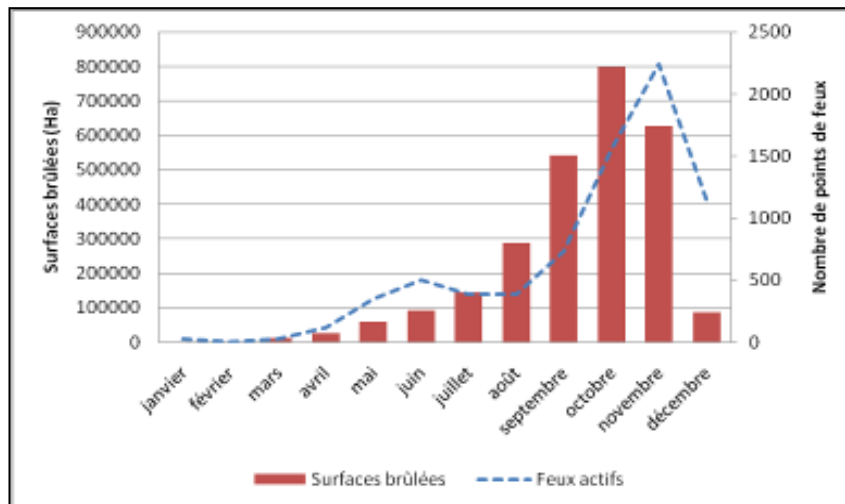


Figure 22 : Comparaison par mois du nombre des feux avec les surfaces brûlées (2010-2015)

La figure 23 montre la comparaison interannuelle entre les points de feux actifs et les surfaces brûlées. Il est remarqué que pour les années 2012 et 2015, les nombres points de feux diminuent alors que les surfaces brûlées augmentent. Cela montre que d'autres facteurs tels que les types de végétation ou les facteurs climatiques peuvent influencer l'étendue des surfaces brûlées.

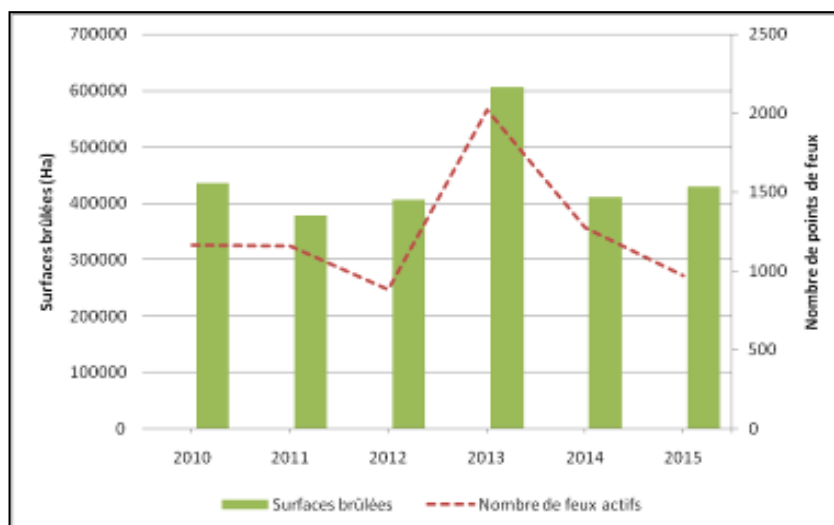


Figure 23 : Comparaison par an du nombre des feux avec les surfaces brûlées (2010-2015)

Saisonnalité

Les feux sont plus courants au dernier trimestre, surtout en fin de saison sèche. Les analyses statistiques confirment l'existence d'une corrélation entre paramètres climatiques et les données des feux. Cinq (05) tests sont significatifs pour les paramètres climatiques étudiés (température maximale, humidité relative moyenne, précipitation). Le test est non significatif pour la corrélation de la précipitation avec les feux actifs. Généralement, la corrélation n'est pas forte ce qui signifie que les feux ne sont pas uniquement générés par ces paramètres climatiques mais il existe d'autres facteurs qui leur sont reliés.

→ *Ainsi, l'hypothèse 1 : « L'ampleur des feux varie en fonction des saisons et des paramètres climatiques » est ici confirmée.*

Répartition des feux sur les 06 ans (2010-2015)

Aussi bien pour les feux actifs que pour les surfaces brûlées, un très grand nombre de feux a été enregistré en 2013. Cette particularité peut être expliquée par l'évènement survenu à Madagascar en cette période qui correspond à l'année d'une élection présidentielle. Les explications peuvent être la non-reconnaissance des résultats de l'élection mais peuvent être aussi le résultat d'un relâchement dans la politique de lutte contre les feux au niveau local. L'utilisation des feux comme mode de contestation est très courante à Madagascar. Plusieurs auteurs (Dez, 1968 ; Kull 2002) confirment que les évènements politiques sont des facteurs de propagations des feux comme expression populaire de mécontentement. Dans la mesure où les causes des feux n'ont pas été relevées dans cette étude, cette affirmation n'a pas été vérifiée.

4.4.2. Discussions sur l'analyse de l'occupation du sol

Les résultats de l'analyse d'occupation du sol ont permis de distinguer deux grands groupes de formations : la formation savanicole et la formation forestière. Le récapitulatif des superficies ci-après pour ces deux types d'occupation du sol permet de conclure une nette différence entre les deux (02) types de formations.

Comparaison entre surfaces brûlées en formation savanicole et forestière

2010 - 2015	Formation savanicole	Formation forestière
Nombre de feux actifs	5338	2121

Les savanes herbeuses constituent des combustibles herbacés facilement inflammables tandis que les formations denses humides sont surtout composées par des combustibles lourds qui requièrent de l'énergie excessive pour s'enflammer (Randrianasolo, 2009).

→ *Ainsi, le résultat permet de confirmer l'hypothèse 2 : « La répartition spatiale des surfaces brûlées varie suivant l'occupation du sol ».*

Par ailleurs, les données de Globcover ont permis de ressortir une carte d'occupation du sol, mais la cartographie par télédétection aurait permis de réaliser une meilleure classification, par des images telles que Landsat (Kana & Etouna, 2006), pour mieux définir et discrétiser les différentes zones affectées par les feux.

4.4.3. Discussions sur l'analyse des stratégies de lutte contre les feux

Sensibilisation en matière de lutte contre les feux de brousse

602 séances de sensibilisations sont effectuées de 2010 à 2015. Ceci représente 45% des localités de toute la région alors que la répartition spatiale des feux a démontré que les feux touchent presque toute la totalité de la région. Ainsi, les actions de sensibilisations sont encore insuffisantes.

Mise en place de comités de lutte contre les feux

273 comités ont été créés durant la période 2010-2015. Ceci ne représente que 21% des localités de toute la région. Ainsi, les comités de lutte mis en place sont largement insuffisants.

Transfert de gestion des ressources naturelles

D'après Montagne *et al.* en 2007, sur 70% des situations analysées à Madagascar, les personnes concernées reconnaissent une réduction de feux de brousse depuis l'instauration du transfert de gestion. Jusqu'à l'année 2015, 71 transferts de gestions de ressources naturelles ont été réalisés dans la région, soit une superficie gérée estimée à 63 538,7 Ha (forêt et savane), ce qui représente seulement 1,4% des superficies des formations végétales de la région. Ainsi, les transferts mis en place sont encore très insuffisants.

Mesure répressive

191 procès-verbaux de délits de feux sauvages et/ou défrichement sont dressés de 2010 à 2015, ce qui ne représente que 2,55% du nombre de points de feux actifs relevés. La difficulté de l'application des lois relatives aux feux est un des problèmes majeurs rencontrés dans la lutte contre les feux. Les auteurs des délits forestiers restent inconnus dans la plupart des cas.

A cause de la relation sociale locale, la recherche et la dénonciation de délinquants sont souvent très compliquées.

Estimation des surfaces brûlées sur terrain

L'estimation sur terrain a donné 22 701,33 ha de surfaces brûlées de 2010 à 2015, ce qui ne représente que 0,85% des surfaces brûlées issues des données satellitaires. Ainsi, les données sur terrain sont nettement inférieures aux données satellitaires. Ce qui démontre l'insuffisance des actions sur terrain vu le manque et la sous-estimation des données de terrain obtenues. Toutefois, ces données sur terrain sont indispensables pour assurer le recoupement des données satellitaires. Mais ces données ne sont pas tout à fait fiables dans le cadre des études scientifiques (Mbow, 1997).

Vérification de l'hypothèse 3

A partir de l'analyse et de l'évaluation des différentes actions de lutte contre les feux mises en œuvre de 2010 à 2015, on a pu démontrer l'insuffisance des différentes mesures accomplies jusqu'ici.

→ ***Ainsi l'hypothèse 3 : « Les actions de lutte contre les feux sont insuffisantes au niveau des zones potentiellement touchées par le feu » est vérifiée.***

4.5. Propositions/recommandations

Cette étude fait office d'outil d'aide à la prise de décision dont de grands intérêts opérationnels pour la gestion et le contrôle des incendies de végétation dans la Région Sofia. Les résultats permettent de prioriser les mesures de préventions et de luttes dans les zones à fort risque notamment celles qui sont fréquemment touchées par les feux. Etant donné les résultats de l'analyse spatio-temporelle des feux dans la région de 2010 à 2015, la priorisation des actions doivent être faites surtout au niveau des districts de Port-bergé et d'Antsohihy qui sont les plus atteints par les feux. Une proposition de plans d'action est donnée en annexe 7.

4.5.1. Stratégie de prévention

Compte tenu des capacités d'intervention limitées (insuffisance de moyens technique, financier et humain) et des coûts élevés liés à la lutte active, la prévention devrait être privilégiée.

Analyse des causes et origines des feux

La détermination des causes exactes et des motivations qui occasionnent les feux ainsi que du processus aboutissant à l'acte de dégradation s'avère fondamentale, voire primordiale, pour pouvoir combattre les feux de brousse. Les feux de pâturage constituent l'une des causes les plus répandues dans la région. Aussi, une attention particulière doit se porter au niveau des familles propriétaires de zones de pâturage afin de les responsabiliser sur la prévention en matière de feux de pâturage, en commençant par un recensement de ces familles.

Sensibilisation et responsabilisation des différents acteurs

La sensibilisation revêt une importance capitale à cause de l'origine anthropique des feux de brousse. La responsabilisation des populations locales est fondamentale pour la surveillance, la détection et la lutte contre les feux dans leurs terroirs. Mais, toute action de prévention devra aussi impliquer davantage les élus locaux et les notables, et il ne faut pas non plus négliger l'implication des femmes. En outre, des descentes massives avec les autorités concernées tels que la région, le district, les maires et les services techniques sont importantes pour intensifier la mobilisation de population de combattre les méfaits de feux de brousse.

La mise en œuvre de la sensibilisation est cependant compliquée compte tenu de plusieurs facteurs : niveau intellectuel très faible des paysans, rareté des médias, difficulté d'accès au terroir, moyens matériels limités, etc. Dans cette optique, un plan de communication selon le contexte local et régional mérite d'être établi pour organiser et diffuser au mieux les messages clés de cette lutte.

Compte tenu des résultats d'analyse évoqués précédemment, il est important de programmer les séances de sensibilisations vers la fin de la saison humide, soit à partir du mois de mars, étant donné que la saison des feux coïncide avec la saison sèche. Il faudrait également prioriser les missions de sensibilisations dans les zones les plus affectées par le feu : les districts de Port-Bergé et d'Antsohihy.

Système de détection de feux

Un système d'alerte automatique des feux en temps réels, initié par l'Université de Maryland (UMD), NASA et Conservation International (CI), est fonctionnel à Madagascar depuis l'année 2000 (<http://www.conservation.org>). C'est un outil efficace pour avertir à temps contre les risques de feux, afin de pouvoir limiter les dégâts et combattre le fléau. Au niveau de la région Sofia, la mise en application de ce système reste jusqu'ici négligeable. Toutefois,

des efforts doivent être investis pour l'utilisation effective de ce système pour la gestion de feux.

L'utilisation des données Modis permet également de pouvoir assurer la gestion des feux et mérite d'être exploitée au niveau régional mais aussi national. En effet, le système d'alerte des feux existant ne permet pas encore d'évaluer les surfaces brûlées alors que la connaissance des surfaces brûlées permet d'estimer les dégâts occasionnés et de pouvoir agir en conséquence.

Mesures de répression

Les mesures de répression concernent tout autant l'action préventive que la lutte active. L'application de dina doit être effective pour tous les auteurs de feux. Les missions de contrôle et de répression concernant les délits sur les feux doivent également être renforcées. Par ailleurs, des mesures de sanctions positives doivent davantage être mises en œuvre pour renforcer la lutte contre les feux. Cette action pourra se faire par une classification des communes méritantes, défailtantes et médiocres au niveau chaque district.

Reboisement et ouverture de pare-feux

La réalisation de reboisement permettrait d'accroître le potentiel forestier de la région et de compenser les pertes dues à la dégradation forestière dont principalement le feu. En même temps, cette activité responsabilise les populations locales en matière de gestion des ressources forestières. La mise en place de pare-feu est une mesure de prévention contre le feu qu'il faudrait appliquer en parallèle à ces activités de reboisement.

4.5.2. Stratégie d'intervention

La lutte active nécessite une bonne organisation, des moyens, et une maîtrise des techniques de combat. Une formation en techniques de lutte contre les feux doit être organisée pour la population locale et surtout pour les comités de lutte contre les feux mis en place. De plus, pour être plus efficace, la lutte doit s'appuyer en priorité sur les outils manuels dont il convient d'équiper les comités villageois de lutte contre les feux de brousse (battoirs, coupe-coupe, râtaux, pelles). Les comités de lutte doivent être dotés de tenues et de moyens techniques adéquats. Le succès dans ce combat réside dans la participation effective des populations munies de ces matériels.

CONCLUSION

Les feux de brousse s'inscrivent dans une problématique à l'échelle mondiale. Pour Madagascar, les feux de brousse constituent une situation préoccupante. Ce travail constitue un soutien important dans le cadre de l'orientation stratégique concernant la lutte contre les feux, et s'est focalisée particulièrement dans la région Sofia. La compréhension de la dynamique spatio-temporelle des feux permet d'anticiper et de minimiser le plus possible l'ampleur et l'intensité des incendies (Valea, 2005).

L'analyse des données satellitaires relatives aux feux a fourni des informations indispensables pour comprendre leur distribution spatio-temporelle, leur relation avec les variables climatiques et leur distribution au niveau de l'occupation du sol. Cette étude a pu montrer que, pendant la période de 2010 à 2015, les feux de brousse surviennent pendant la saison sèche dans presque toute la totalité de la région. La distribution et l'ampleur des feux ne sont pas les mêmes dans toute la région. Ces différences s'expliquent par les types de végétation et les variations de climat. L'analyse temporelle des images conduit à un caractère saisonnier des feux. La saison des feux dans la région est circonscrite d'avril à décembre. Les zones les plus affectées sont situées dans le district de Port-Bergé et le district d'Antsohihy.

L'utilisation des méthodes de télédétection et des Systèmes d'Information Géographique peut aider à une meilleure orientation des efforts de gestion en terme de prévention des feux et en terme d'évaluation des enjeux pour les populations. L'analyse critique des stratégies mises en œuvre avec les résultats de l'évolution spatio-temporelle des feux montre qu'il y a une nette insuffisance des actions de lutte qui ont été entreprises.

Vu la complexité de la gestion des feux, une meilleure stratégie en adéquation aux problèmes constatés à partir de ces résultats d'analyse, est nécessaire. Faisant partie des pays en développement, les problèmes d'ordre matériel et financier font souvent défaut, et particulièrement dans la région d'étude. En outre, l'insuffisance d'agents forestiers handicape indubitablement les différentes actions à mettre en œuvre dans le cadre de cette lutte.

Des mesures sont nécessaires, à savoir : la sensibilisation et l'éducation environnementale ; la mobilisation des moyens matériels et humains la responsabilisation des différentes parties prenantes ; l'utilisation du système de détection de feux en temps réel ; le renforcement des mesures répressives mais aussi des sanctions positives ; et le renforcement des moyens de communication et équipement des comités de lutte villageois

BIBLIOGRAPHIE

- Alvarado S.T., 2012. Evaluation du rôle des feux de brousse sur la composition, la structure, la phénologie, et la résistance de la végétation des bois de tapia (*Uapaca bojeri*) du massif d'Ibity, Nouvelle Aire Protégée, en vue de sa gestion durable. Sciences agricoles. Université d'Avignon, Antananarivo, 200p.
- André D. & Müller A., 2008. Le Ferlo des feux de brousse ou l'expérience du PAPF en matière de lutte contre les feux de brousse. PAPF, St. Louis, Sénégal, 29p.
- Andriamalala, G. and Gardner, C. J. 2010. L'utilisation du dina comme outil de gouvernance des ressources naturelles: leçons tirés de Velondriake, sud-ouest de Madagascar. Tropical Conservation Science Vol. 3 (4), 447-472.
- Bartlett H.H., 1955. Fire in relation to primitive agriculture and grazing in the tropics: annotated bibliography. Vol. 2. Department of Botany, University of Michigan (MI).
- Bekdouche F., 2010. Evolution après feu de l'écosystème subéraie de Kabylie (Nord 4. algérien). Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri. Algérie, 175p.
- Bertrand A., 1998. Revue documentaire préalable à l'élaboration d'une politique et d'une stratégie de gestion des feux de végétation à Madagascar. In : Feux et déforestation à Madagascar. Revues bibliographiques, Bertrand and Sourdat (Eds) Cirad - ORSTOM - CITE éditeurs, Antananarivo.
- BIODEV, 2013. Rapport de Mission d'inventaires. Inventaire de Référence du Projet MRPA, Lot 3: COMATSA, 169p.
- Boschetti L., Roy D. & Hoffmann A., 2009. MODIS Collection 5 Burned Area Product - MCD45, User's Guide Version 2.0.
- Broucke S., 2009, État de l'art sur la détermination du régime du feu par des moyens de télédétection, Unité ESPACE, Projet ANR Biodiversité INC (« Incendie et Biodiversité »), 14p.
- Caillault S., Ballouche A. & Delahaye D., 2010, Organisation spatio-temporelle des feux de brousse. Approche comparative au Burkina Faso, in : Foltête J.-C. (dir.), Actes des Neuvièmes Rencontres de Théo Quant, Besançon. ISSN 1769-6895, 10p.
- Chuvienco E., 1996. Remote sensing and GIS applications for forest fire management. Paris. European Association of Remote Sensing Laboratories (EARSeL).
- Cochrane M.A. & Ryan K.C., 2009. Fire and fire ecology: Concepts and principles. In: Tropical fire ecology - climate change, land use, and ecosystem dynamics, Springer Praxis Books, 25–62.
- Colin P.Y., Jappiot M., Mariel A., Lampin-Cabaret C., Veillon S., & Brocchiero F., 2001. Protection des forêts contre l'incendie, Fiches techniques pour les pays du bassin méditerranéen, Cahier FAO Conservation 36, Thème 3: Les causes des incendies.
- CREAM, 2013. Monographie Région Sofia. Antananarivo, Madagascar, 240p.

Dale V.H., Joyce L.A., McNulty S., Neilson R.P., Ayres M.P., Flannigan M.D., Hanson P.J., Irland L.C., Lugo A.E., Peterson C.J., Simberloff D., Swanson F.J., Stocks B.J. & Wotton B.M., 2001. Climate Change and Forest Disturbances. *BioScience*, 51, 723-734.

Dez J., 1968. Un des problèmes du développement rural : limitation des feux de végétation. *Terre Malgache Tany Malagasy* 4, 97-123.

DGEF, 2009. Résultats de suivi des feux à Madagascar, Service responsable de suivi de Feu, Service Régional de Lutte contre le Feu de Brousse (SRLFB), Bâtiment N ; Direction Générale de l'Environnement et de Forêt à Nanisana, Antananarivo, 2 p.

Du Puy D.J, Moat J., 1996. A refined classification of the vegetation types of Madagascar, and their current distribution in W. R. Lourenço (ed.), *Biogéographie de Madagascar*. Editions de l'ORSTOM, Paris, 205-218.

FAO, 2006. Evaluation des ressources forestières mondiales 2005, Progrès vers la gestion forestière durable. 315 p.

FAO, 2009. Feux de forêts : Les pays en développement plus vulnérables. FAO. Rome.

FAO, 2010. Evaluation des ressources forestières mondiales 2010. FAO. Rome. 206 p.

Faratiana T.E, 2005. Contribution à l'élaboration de plan d'aménagement simplifié et au transfert de gestion des forêts naturelles aux communautés de base dans le cadre d'une gestion contractualisée des forêts (GCF) dans la zone de Masiloka à Analalava. Mémoire d'Ingénierat, Université d'Antananarivo, Madagascar. 98p.

Faye M., 2003. Radio, Internet et satellite au Sénégal pour lutter contre les feux de brousse, *Annuaire suisse de politique de développement*.

Fournier A., Douanio M. & Bene A., 2014. Pratique et perception des feux de végétation dans un paysage de vergers. Le pays sèmè (Kéné Dougou, Burkina Faso). Regards scientifiques croisés sur le changement global et le développement - Langue, environnement, culture : Actes du Colloque international de Ouagadougou (8-10 mars 2012), *Sciencesconf.org*, 201-229.

Gachet, 1959. Les paléontologues de Madagascar. *Bulletin de Madagascar* 153, 1-8.

Giglio L., Desclotres J., Justice C.O. & Kaufman, Y.J., 2003. An Enhanced Contextual Fire Detection Algorithm for MODIS. *Remote Sensing of Environment* 87, 273-282.

Giglio L., Randerson J.T., van der Werf G.R., Kasibhatla P.S., Collatz G.J., Morton D.C. & DeFries R.S, 2010. Assessing Variability and Long-Term Trends in Burned Area by Merging Multiple Satellite Fire Products. *Biogeosciences* 7, 1171-1186.

Giglio L., Boschetti L., Roy D., Hoffmann A.A. & Humber M.M., 2016. Collection 6 MODIS Burned Area Product User's Guide Version 1.0. 26p.

Goldammer J.G. & de Ronde C., 2004. *Wildland fire management handbook for Sub - Sahara Africa*. Cape Town. Oneworldbooks.

Guiguindibaye M., Belem M.O. & Boussim J.I., 2013. Caractéristiques des feux dans un incendie en savane soudanienne au Tchad. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 7(3), 1147-1156.

- Hennessy K., Lucas C., Nicholls N., Bathols J., Suppiah R. & Ricketts J., 2005. Climate change impacts on fire-weather in south-east Australia. CSIRO Marine and Atmospheric Research; Bushfire CRC; Australian Bureau of Meteorology, 91p.
- Hirsch K.G. & Fuglem P., 2006. Stratégie canadienne en matière de feux de forêt : synthèses de fond, analyses et perspectives. Conseil canadien des ministres des Forêts, Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Nord, Edmonton, AB, 125p.
- Hufty M., 2007. La gouvernance est-elle un concept opérationnel ? ; Proposition pour un cadre analytique ; Fédéralisme Régionalisme 7 – Société civile, globalisation, gouvernance : aux origines d'un nouvel ordre politique ?
- International Tropical Timber Organization, 1997. Guidelines on fire management in tropical forests, ITTO Policy Development Series N°6, 45p.
- Jacquin A., 2010. Dynamique de la végétation des savanes en lien avec l'usage des feux à Madagascar. Analyse par série temporelle d'images de télédétection. Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse, 146p.
- Kana C.E & Etouna J.E., 2006. Apport de trois méthodes de détection des surfaces brûlées par imagerie Landsat ETM+ : application au contact forêt- savane du Cameroun, *Cybergeo : European Journal of Geography*, Environnement, Nature, Paysage, document 357.
- Kaufman Y.J., Hobbs P.V., Kirchhoff V., 1998. Smoke, Clouds, and Radiation-Brazil (SCAR-B) Experiment. *J. Geophys. Res.*, 103 (D24), 31, 783-808.
- Koechlin J., 1993. Grasslands of Madagascar. In Coupland R.T. (ed.) (Ed.), *Natural grasslands. Ecosystems of the World 8B*, 291-301.
- Koechlin J., Guillaumet J.L. & Morat P., 1997. Flore et végétation de Madagascar. in *Flora et vegetatio mundi*. Tüxen R. Vaduz : A.R.G. Gantner 5, 701 p.
- Kull C.A., 2000. Deforestation, erosion, and fire: degradation myths in the environmental history of Madagascar. *Environment and History*, 6, 423–450.
- Kull C.A., 2002. Madagascar aflame : landscape burning as peasant protest, resistance, or a resource management tool? *Political Geography*, 21, 927 - 953.
- Lowry P.P., Schatz G.E & Phillipson P.B., 1998. Classification de la végétation naturelle et anthropique de Madagascar. *Bull. Acad. Natl. Madagascar*, n.s., 7, 219–233.
- Madagascar National Parks & Ministère de l'Environnement et des Forêts, 2012. Plan d'aménagement et de gestion du Parc National de Sahamalaza – Iles Radama, 84p.
- Madhow A., Andriatsarafara S., Raveloharisoa C., Razafindrakoto L. & Razafindratandra A., 1994. Rapport sur l'état de l'environnement à Madagascar, PNUD - Banque Mondiale. Office national de l'environnement.
- Masahiro O., 2003. Manuel sur la Lutte contre les Feux de Végétation: Compilation du Savoir- faire actuel Série I: Les Techniques Existantes dans la Lutte contre les Feux de Végétation, 144p.

- Mbow C., 1997. Méthodologie d'identification et de cartographie des feux de brousse par télédétection, utilisation des images NOAA-AVHRR et LANDSAT. Dakar UCAD. Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du DEA en sciences de l'environnement, 88p.
- Mbow C., 2000. Caractéristiques spatio-temporelles des feux de brousse et leur relation avec la végétation dans le Parc National du Niokolo Koba (Sud-est du Sénégal). Thèse de Doctorat de Troisième Cycle en Sciences de l'Environnement. ISE, Faculté des Sciences et Techniques, UCAD, 120p.
- Ministère de l'Environnement, de l'Ecologie et des Forêts, 2016. Programme environnemental pour le développement durable, Document de référence pour les liens entre le développement durable et les dimensions environnementales, Madagascar, 77p.
- Monnier Y., 1990. La poussière et la cendre : Paysages, dynamique des formations végétales et stratégies des sociétés en Afrique de l'Ouest. 2ème édition, Paris, Ministère de la coopération et du Développement.
- Montagne P., Razanamaharo Z. & Cooke A., 2007 - Tanteza, Le transfert de gestion à Madagascar, dix ans d'efforts. Antananarivo: Resolve Conseil & Cirad éditeurs.
- Moretti B, 2015. Modélisation du comportement des feux de forêt pour des outils d'aide à la décision. Modélisation et simulation. Université Pascal Paoli.
- Morisette J.T., Giglio L., Csiszar I. & Justice C. O., 2005. "Validation of the MODIS active fire product over Southern Africa with ASTER data", International Journal of Remote Sensing, 26, 4239-4264.
- Nations Unies, 2016. Mise en œuvre du Cadre de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe (2015-2030), Rapport du Secrétaire général, 28p.
- Office National pour l'Environnement, 2009. Tableau de bord environnemental, Région Sofia. Antananarivo, 216p.
- Office National pour l'Environnement, Direction Générale des Forêts, FTM, Madagascar National Parks & Conservation International, 2013. Evolution de la couverture de forêts naturelles à Madagascar, 2005- 2010. Antananarivo, 48p.
- Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal, 2007. Etude d'impacts des feux de brousse sur l'eau, les sols et la végétation dans la partie guinéenne du bassin du fleuve du Sénégal, 131p.
- Orlando C., 2015. Effets des incendies de forêts sur la séquestration du carbone et la minéralisation de l'azote, et la typologie des sols dans les écosystèmes forestiers du Rif centro-occidental, Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs (Maroc), 88p.
- Peel M.C., Finlayson B.L. & McMahon T.A., 2007. Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification, Hydrol. Earth Syst. Sci., 11, 1633-1644.
- Prior T. & Roth F., 2015. La réduction des risques de catastrophes après Sendai, Politique de sécurité : analyses du CSS №173, 4p.

- Rabevahiny S.A., 2010. Impacts réels du feu sur la couverture végétale. Mémoire de Master I, Université de Mahajanga, 44p.
- Rajaonson, B., 1995. Proposition d'une politique de décentralisation de la gestion des ressources renouvelables et des feux de végétation. Antananarivo : OSIPD / ONE, 112p.
- Rajeriarison C. & Faramalala M., 1999. Nomenclature Des Formations Végétales De Madagascar. Association nationale pour la gestion des aires protégées (ANGAP), Antananarivo, Madagascar.
- Rakotoarijaona J.R., 2004. Système d'informations, aide à la décision et lutte contre les feux de brousse. In: Colloque international Développement durable, leçons et perspectives. Ouagadougou (Burkina Faso), 93-100.
- Rakotoarimanana, V., 2002. Feu, pâturage et dynamique des savanes à *Heteropogon contortus* (L) P. Beauv. Ex Roem & Shult. Dans le sud ouest de Madagascar (région de Sakaraha). Thèse de 3ème cycle, Université d'Antananarivo, 177p.
- Rakotoarisoa F.H., 2015. Analyse spatio-temporelle de la dynamique des feux de végétation dans la Région Melaky. Mémoire de DEA. Université d'Antananarivo. Madagascar.
- Rakotoarivony M., 2014. Etude des effets des feux sur une plantation forestière, en vue d'une proposition de plan d'action axé sur la réduction des dégâts dus aux feux. Cas de la zone Centre de la Fanalamanga. Mémoire d'ingénieur. Université d'Antananarivo. Madagascar, 63p.
- Ralaimihoatra S.N., 2008. "Le système de suivi satellitaire des feux, un outil de gestion des Madagascar". Les XIèmes Journées Scientifiques du Réseau ressources naturelles à Télédétection de l'AUF 03 au 07 novembre 2008 Antananarivo (Madagascar), 279 - 281.
- Ramahefamanana N.M., 2012. Evolution spatio-temporelle des feux de brousse et dynamique de végétation de Kiboy (massif d'Ibity). Master en Sciences. Université d'Antananarivo. Madagascar, 93p.
- Randrianarivelo C.S., 2003. Essai d'aménagement agro-pastoral de la zone riveraine ouest du site de patrimoine mondial du Tsingy de Bemaraha. Thèse de doctorat de troisième cycle Université d'Antananarivo. Faculté des Sciences. Département de Biologie et Ecologie Végétales, Antananarivo, Madagascar.
- Randrianasolo H.E., 2013. Suivi de l'évolution du feu dans le corridor forestier Ranomafana-Andringitra-Ivohibe et son impact sur la végétation : cas de Namoly. Mémoire de DEA. Université d'Antananarivo. Madagascar, 72 p.
- Riou G., 1995. Savanes : l'herbe, l'arbre et l'homme en terres tropicales, Paris, Masson/Armand colin, 270p.
- Roy D.P., Jin Y., Lewis P. E. & Justice C.O., 2005. Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data. Remote sensing of environment, 97, 137 – 162

Roy D.P. & Landmann T., 2005. "Characterizing the surface heterogeneity of fire effects using multi-temporal reflective wavelength data", *International Journal of Remote Sensing*, 26, 4197–4218.

Sarr M.A., Faye G., Beye G., Ndione J.A., Codjia C., 2015. Utilisation des données MODIS et de SPOT pour l'analyse de la dynamique de deux territoires : (réserve protégée) et (unités pastorales) au Ferlo (Sénégal), XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège 2015, 5p.

Shuanghe S. & Yuanshu J., 2004. *Agrometeorology*. WMO Regional Meteorological Training Center. International Training Course. Nanning China. Chapter 5 pp 1-27, chapter 6, 1- 61.

Stocks B.J., Fosberg M.A., Lynham T.J., Mearns L., Wotton B.M., Yang Q., Jin J.Z., Lawrence K., Hartley G.R., Mason J.A. & McKenney D.W., 1998. Climate change and forest fire potential in Russia and Canadian boreal forests. *Climatic Change*, 38, 1-13.

Valea F., 2005, Guide méthodologique. Élaboration d'une méthode de suivi et d'analyse spatio-temporelle des feux de brousse en Afrique de l'ouest : cas du Sénégal et du Burkina faso, Laboratoire d'Enseignement et de Recherche en Géomatique, 93p.

Van Wagner, 1977. Conditions for the start and spread of crown. fire. *Can. J. For. Res.* 7, 23-34.

Van der Werf G.R., Randerson J.T., Giglio L., Collatz G. J, Mu M., Kasibhatla P.S., Morton D.C., DeFries R.S., Jin Y., & van Leeuwen T.T., 2010. Global Fire Emissions and the Contribution of Deforestation, Savanna, Forest, Agricultural, and Peat Fires (1997–2009). *Atmospheric Chemistry and Physics* 10, 11707–11735.

Whelan, R.J., 1995. *The Ecology of Fire*. Cambridge University Press.

Sites web :

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Déforestation>, consulté le 10 août 2017.

<http://www.7sur7.be>, consulté le 13 juillet 2017.

<http://balises.bpi.fr/geographie/migrations-et-changements-climatiques>, consulté le 01 août 2017.

<http://www.army-armee.forces.gc.ca>, consulté le 01 août 2017.

<http://www.conservation.org>, consulté le 18 juillet 2017.

<http://gsdm-mg.org>, consulté le 05 août 2017.

<http://www.instat.mg>, consulté le 15 juin 2017.

<ftp://fuoco.geog.umd.edu/modis/C6/mcd14ml/>, consulté le 15 février 2017.

<http://modis-fire.umd.edu>, consulté le 15 février 2017.

<https://fr.tutiempo.net/climat/>, consulté le 02 juillet 2017.

http://due.esrin.esa.int/page_globcover.php, consulté le 02 juillet 2017.

ANNEXES

Annexe 1 : Rapport de détection de feux dans les 22 régions de Madagascar

Annexe 2 : Les principaux simulateurs

Annexe 3 : Recensement des causes d'utilisation du feu à Madagascar

Annexe 4: Textes et Lois qui régissent les feux à Madagascar

Annexe 5 : Corrélation linéaire entre paramètres climatiques et nombre de feux actifs

Annexe 6 : Corrélation linéaire entre paramètres climatiques et surfaces brûlées

Annexe 7 : Proposition de plans d'action stratégique de lutte contre les feux dans la région
Sofia

Annexe 1 : Rapport de détection de feux dans les 22 régions de Madagascar

Période du : vendredi 1 janvier 2010 au : jeudi 31 décembre 2015

Nom de la Région	Feux : Forêts	Feux : Non forêts	TOTAL
MENABE	15 233	35 128	50 361
MELAKY	4 551	37 160	41 711
SOFIA	4 388	34 007	38 395
ATSIMO-ANDREFANA	13 993	24 058	38 051
BETSIBOKA	724	29 745	30 469
BOENY	2 308	19 055	21 363
ALAO TRA-MANGORO	4 414	16 738	21 152
BONGOLAVA	99	17 549	17 648
IHOROMBE	291	15 715	16 006
ANOSY	1 970	13 508	15 478
AMORON'I MANIA	459	10 889	11 348
ATSINANANA	1 285	9 832	11 117
ANALAMANGA	324	9 495	9 819
HAUTE MATSIATRA	235	9 440	9 675
ANALANJIROFO	1 954	7 352	9 306
ATSIMO-ATSINANA	1 122	8 178	9 300
SAVA	2 170	6 897	9 067
DIANA	1 880	7 119	8 999
VATOVAVY-FITOVINANY	515	7 699	8 214
VAKINANKARATRA	32	7 176	7 208
ANDROY	1 676	1 995	3 671
ITASY	1	1 778	1 779
TOTAL NATIONAL :	59 624	330 513	390 137

Source : Service de reforestation et de lutte contre les feux, 2016

Annexe 2 : Les principaux simulateurs

SFM = feux de surface ; CFIM = modèle d'ignition des feux de cimes; CFMSM = modèle de propagation des feux de cimes ; SM = modèle de sautes de feux

<i>Nom</i>	<i>Pays</i>	<i>Principales caractéristiques</i>		<i>Utilisation opérationnelle</i>	<i>Testé en Méditerranée</i>
BEHAVE	États-Unis	SFM Rothermel		Feux dirigés ; lutte ; aménagement du territoire	oui
CARDIN	Espagne	SFM Rothermel	Automate cellulaire	Feux dirigés	oui
DYNAFIRE	États-Unis	SFM Rothermel	Automate cellulaire	Simulation des feux de surface allant des intensités faibles à modérées	
EMBYR	États-Unis	SFM Hargrove et al.	SM Automate cellulaire	Simulation des aires brulées à l'échelle du terrain	
FARSITE	États-Unis	SFM Rothermel	SM Technique de propagation des ondes ; CFMSM	Feux dirigés ; lutte ; aménagement du territoire	oui
FIREGIS	Portugal	SFM Rothermel	Automate cellulaire	Entraînement	oui
FIREMAP	États-Unis	SFM Rothermel	Automate cellulaire	Simulation des feux de surface allant des intensités faibles à modérées	
FIRESTATION	Portugal	SFM Rothermel	Automate cellulaire	Feux dirigés ; lutte ; aménagement du territoire	oui
FIRESTAR	France			Recherche	oui
FOOREFIRE	France (Corte)	SFM	Technique de propagation des ondes	Recherche	oui
GEOFOGO	Portugal	SFM Rothermel	Automate cellulaire	Recherche	oui
MEFISTO- AIOLOS-F	Grèce	SFM	Automate cellulaire		
NEXUS	États-Unis	SFM Rothermel; CFMSM Rothermel			
PROMETHEUS	Canada	SFM	CFMSM Technique de propagation des ondes	Feux dirigés	
SIROFIRE	Australie	SFM	Technique de propagation des ondes	Feux dirigés	
WILDFIRE	Canada	SFM	CFMSM	Simulation des feux de surface allant des intensités faibles à modérées	

Source : Moretti, 2015

Annexe 3 : Recensement des causes d'utilisation du feu à Madagascar

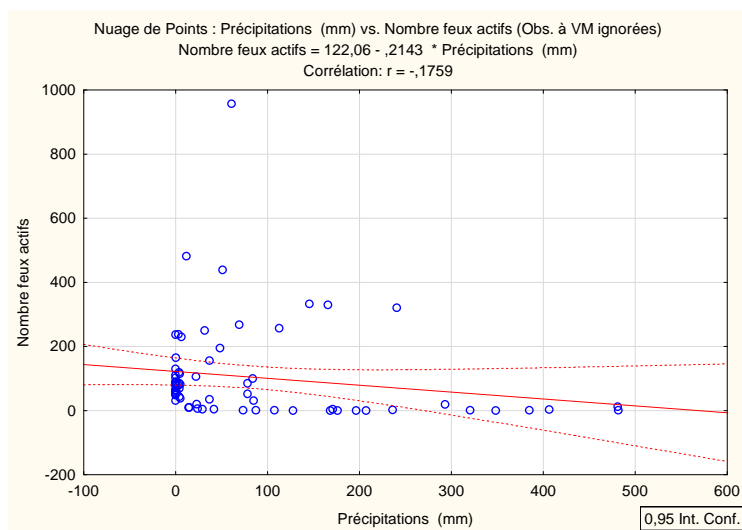
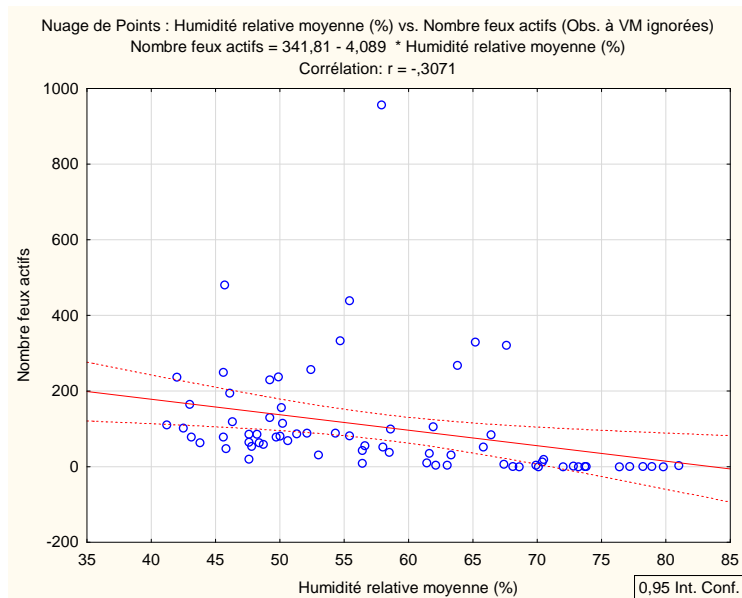
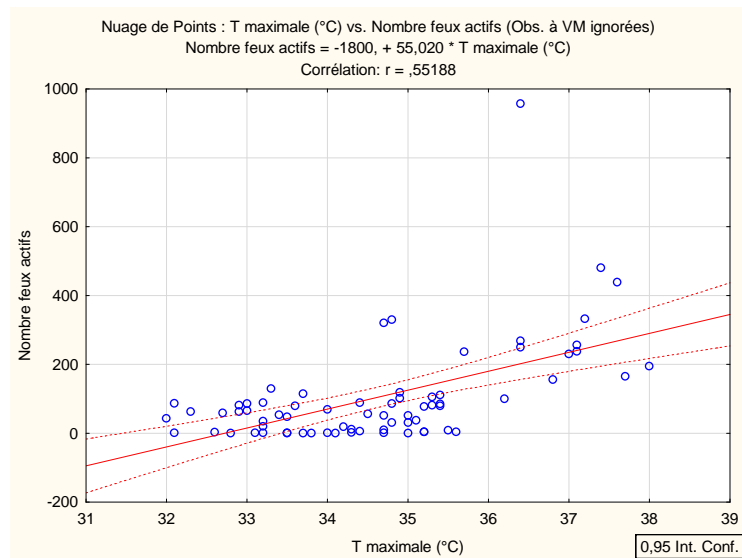
Secteur	But	Commentaires
Elevage	Maintenance des pâturages	Combattre l'embroussaillage
	Contrôle des parasites	Contrôler les tiques et moustiques
	Surveillance du troupeau	Faciliter l'observation et les déplacements des animaux
		Améliorer l'appétence de l'herbe
Cultures	Préparation des parcelles	Faciliter le labour
	Mouvements de terrain	Augmenter l'érosion pour fertiliser les parcelles en contrebas
	Nettoyage des infrastructures d'irrigation	Nettoyer les canaux d'irrigation
		Ecarter les rats et oiseaux qui nichent dans les canaux
Autres	Prévention et contrôle par des feux précoces dans la saison sèche	Protéger la strate ligneuse, utilisée en bois de chauffe
		Créer des coupe-feux pour limiter les feux destructeurs de fin de saison
	Ravageurs	Eloigner les sauterelles
		Contrôler les populations de rats
	Gestion du bois et de l'énergie	Produire du bois mort utilisé comme bois de chauffe et de cuisine
	Déplacements	Entretien des voies de transports et des chemins
	Nettoyage du sol	Mettre à nu les sols pour la recherche de minerais précieux
		Découvrir les tubercules comestibles
	Cérémonies, spectacles	Utiliser comme feux d'artifice, d'amusements
	Criminel	Masquer les traces lors de vols de troupeaux
	Politique	Exprimer un mécontentement

Source : Kull, 2002 *in* Alvarado, 2012

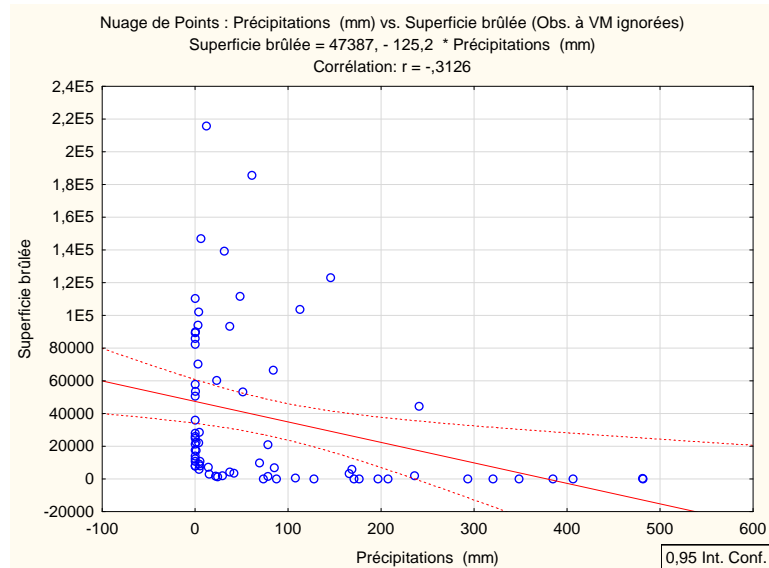
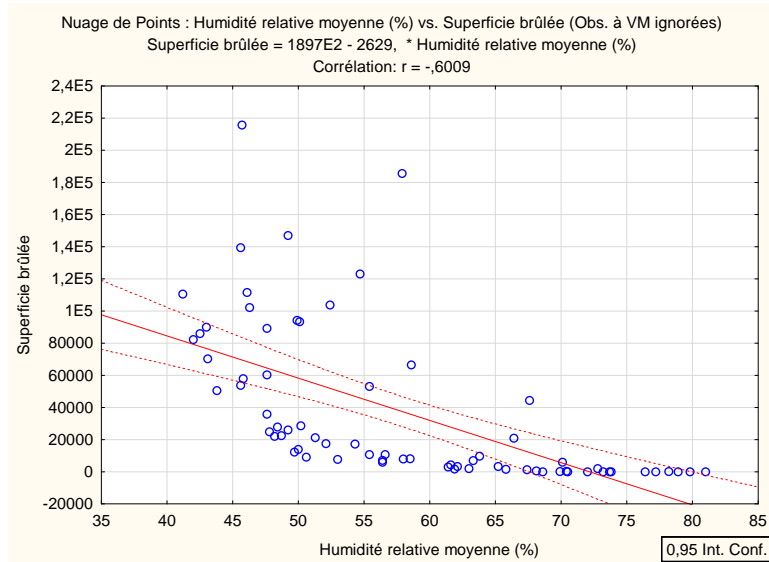
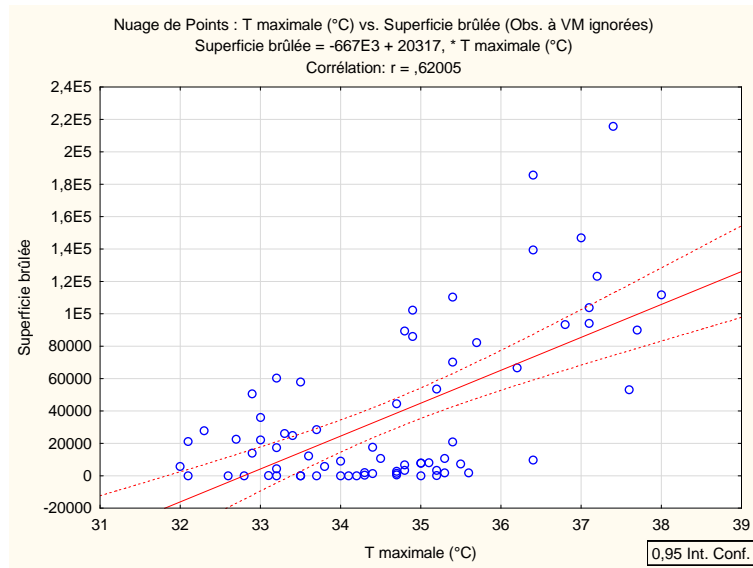
Annexe 4: Textes et Lois qui régissent les feux à Madagascar

- L'ordonnance 60-127 du 03/10/60 fixant le régime de défrichage et des feux de végétation. Le décret 61-078 du 08/02/61 fixant les modalités d'application de l'ordonnance 60-128 du 03/10/60 fixant la procédure applicable à la répression des infractions à la législation forestière, de la chasse, de la pêche et de la protection de la nature.
- L'arrêté 058 du 07/10/61, portant autorisation de feux précoces de pâturage.
- L'ordonnance 76-030 du 21/08/76 édictant les mesures exceptionnelles pour la poursuite des auteurs de feux de végétation.
- Le décret 82-313 du 19/07/82 instituant le cahier des charges des pâturages ;
- Le décret 87-143 du 20/04/87 fixant les modalités des défrichements et des feux de végétation.
- Le décret 99-951 du 15/12/99, portant création, organisation, fonctionnement du Comité Interministériel de Coordination du Programme « Gestion Locale Communautaire des Feux de Végétation à Madagascar ».
- Le décret 2002-793 du 07/08/02 sur les mesures incitatives de prévention et d'éradication de feux de brousse

Annexe 5 : Corrélation linéaire entre paramètres climatiques et nombre de feux actifs



Annexe 6 : Corrélation linéaire entre paramètres climatiques et surfaces brûlées



Annexe 7 : Proposition de plans d'action stratégique de lutte contre les feux dans la région Sofia

PLAN D'ACTION STRATEGIQUE DE LUTTE CONTRE LES FEUX DANS LA REGION SOFIA						
AXE	RESULTAT	ACTIONS PRIORITAIRES	ECHEANCE	LEAD	CIBLES	ZONES CIBLES
Axe n°1: Lutte préventive contre les feux						
<i>Résultat: Les populations locales seront conscientisées sur les thématiques de lutte contre les feux</i>						
		A1. Sensibiliser la population locale sur les thématiques de la lutte contre les feux	CT	DREEF/Projet/Programme	Population locale, Comités villageois, Autorités locales	07 districts
		A2. Systématiser l'éducation environnementale auprès des cibles	MT	DREEF/MEDIAS	Population locale, Comités villageois, Autorités locales	07 districts
		A3. Réaliser des études pour collecter les informations (détection de feux, enquête sur les causes de feux et les facteurs influençant le régime des feux) afin d'établir un plan de gestion des feux	CT	DREEF/Projet/Programme	Région Sofia, Gouvernement Malagasy, Bailleurs	07 districts
Axe n°2: Lutte active contre les feux						
<i>Résultat: Les populations locales seront responsabilisées pour la lutte active contre les feux de brousse</i>						
		A1. Equiper les comités villageois de lutte contre les feux de brousse par des outils	CT	DREEF/Projet/Programme	Comités villageois	07 districts
		A2. Délimiter les aires de contrôle	CT	Comités villageois	DREEF, Autorités locales	07 districts
		A3. Former les comités villageois de lutte sur les techniques de combat contre les feux déclarés	MT	DREEF/Projet/Programme	Comités villageois	07 districts
Axe n°3: Sanctions/Mesures correctives face aux						
<i>Résultat: Les infractions seront réprimées</i>						
		A1. Sensibiliser la population locale sur les textes législatifs et réglementaires en matière des feux	MT	Tribunal/DREEF/MEDIAS	Population locale, Comités villageois, Autorités locales	07 districts
		A2. Poursuivre les délinquants par des peines d'amendes sévères	MT	Tribunal /DREEF	Délinquants et complices	07 districts
		A3. Mettre en place un système de sanction positive pour les méritants	MT	DREEF/Projet/Programme	Méritants	07 districts

RESUME

A Madagascar, les feux de brousse constituent un phénomène récurrent et contribuent à la dégradation des ressources naturelles. La présente étude a été entreprise dans la région Sofia dans le but d'analyser la mise en œuvre des stratégies de lutte contre les feux. En effet, la région Sofia est particulièrement atteinte par ce fléau chaque année. Ainsi, ce travail analyse la dynamique spatio-temporelle des feux ; l'occupation du sol par rapport aux données des feux ; et les stratégies de feux adoptées. Il exploite six (06) années de séries temporelles de feux actifs et de surfaces brûlées issues des produits Modis Active fires MCD14ML et Modis Burned area MCD60A1 pour la période allant de 2010 à 2015. La méthodologie se base sur l'évaluation de la saisonnalité et des occurrences des feux, et sur l'évolution spatio-temporelle des feux. L'analyse des données a ressorti qu'en moyenne, la saison des feux se situe entre les mois d'avril à décembre, correspondant généralement à la saison sèche. Les paramètres climatiques : la température maximale, l'humidité relative et la précipitation influencent donc la propagation des feux. Les feux les plus importants sont enregistrés en 2013. L'analyse spatiale montre que les superficies de feux plus importantes avec une occurrence plus significative sont retrouvées dans les districts de Port-Bergé et d'Antsohihy. Par ailleurs, l'occurrence des feux selon les différents types d'occupation, tirés de l'image satellitaire Globcover, a démontré que les formations savaniques et prairies sont les plus touchées par les feux. Et enfin, l'analyse des différentes stratégies de lutte préventive et active a démontré l'insuffisance des mesures entreprises par rapport à l'ampleur des feux constatés à partir des données satellitaires. Compte tenu des analyses spatio-temporelles et des analyses des stratégies mises en œuvre jusqu'ici, le renforcement des mesures de lutte contre les feux, est à préconiser. Les mesures de lutte préventive sont essentielles pour la réussite de la lutte contre les feux à travers les sensibilisations et la mise en place des comités de lutte au niveau de chaque localité.

Mots-clés : feux de végétation, données MODIS, feux actifs, surfaces brûlées, occupation du sol, stratégies de lutte, région Sofia, Madagascar.