

REPARTITIONS SPATIALE ET TEMPORELLE DES FEUX A MADAGASCAR

HASINA ANDRIAMANANTENA, Narovana ⁽¹⁾ ; RAKOTONDRAOMPIANA, Solofo ⁽¹⁾ ; RAZANAKA, Samuel ⁽²⁾ ; RAKOTONIAINA, Solofoarisoa ⁽¹⁾

- 1 Institut & Observatoire de Géophysique d'Antananarivo (IOGA), Université d'Antananarivo, Madagascar
- 2 Centre National de Recherche sur l'Environnement (CNRE), Antananarivo, Madagascar

Résumé

Cette publication participe à la compréhension de la dégradation de l'environnement à Madagascar. Spécifiquement, il s'agit d'analyser la distribution spatiale et temporelle des feux à Madagascar et d'identifier les facteurs à l'origine des feux. Les données fournies par le capteur MODIS sur l'ensemble du territoire de Madagascar pour les années 2014 à 2018 sont utilisées. Les résultats obtenus indiquent une certaine stabilité des points de feux actifs observés à Madagascar pendant la période 2014 à 2018, sauf pour l'année 2016, année de forte sécheresse mondiale. Les feux brûlent en moyenne une superficie de 3 757 792 ha par an. La majorité de ces feux est observée pendant la saison sèche et leur maximum en nombre et en superficie est atteint aux mois de septembre et octobre. Au premier abord, les feux couvrent la quasi-totalité du pays. Toutefois, les analyses spatiales et temporelles montrent que les points de feu sont regroupés en agrégats d'ordre 1, 2, 3 ou 4. Les agrégats indiquent les zones où l'on retrouve une concentration de points de feux. Les régions contenant des agrégats d'ordres supérieurs sont les plus exposées. Ce sont des zones auxquelles il est nécessaire d'accorder une attention particulière. Les résultats de l'analyse par permutation spatio-temporelle indiquent que les feux proches dans l'espace le sont aussi dans le temps. La répartition des agrégats par rapport aux pistes et aux villages démontre que les feux se propagent essentiellement à proximité des lieux habités et des voies d'accès.

Mots clés : Feux, points de feux actifs, superficies brûlées, MODIS, statistique spatiale, Madagascar.

Abstract

This paper contributes to the understanding of the degradation of the environment in Madagascar. Specifically, it analyzes spatial and temporal distribution of fires in Madagascar and identifies the factors behind these fires. Data provided by MODIS sensor between year 2014 and year 2018 over the entire territory of Madagascar are used. The results indicate that the number of fire points observed in Madagascar is stable during the period 2014 to 2018, except for the year 2016, a year of severe global drought. The fires burn on average an area of 3,757,792 ha per year. The majority of these fires are observed during the dry season and reach their maximum in number and area in September and October. At first glance, fires cover almost the entire country. However, spatial and spatio-temporal analysis show that the fire points are grouped into aggregates of order 1, 2, 3 or 4. Aggregates indicate areas where there is a concentration of fire points. Areas including higher order aggregates are the most exposed to fires. These are areas for which special attention must be paid. The results of the spatiotemporal permutation analysis indicate that fires close in space are also close in time. The distribution of aggregates in relation to tracks and villages is presented and shows that fires mainly spread near inhabited places and tracks.

Keywords: Fires, active fire, burnt area, MODIS, spatial statistics, Madagascar.

1. Introduction

Le feu observé dans la nature est un phénomène qui peut être d'origine naturelle ou anthropique (Colin *et al.*, 2002). Les feux détruisent les végétations, les sols et toute la biodiversité (Kull, 2000; FAO, 2011). Ils émettent dans l'atmosphère des gaz à effet de serre. Les feux de végétation dans le monde consomment annuellement 5130 millions de tonnes de biomasse, dont 42 % en Afrique (FAO, 2007). Les gaz à effet de serre émis ont des impacts directs sur le bilan radiatif de la surface terrestre et le réchauffement climatique, ainsi que des impacts indirects sur les processus de dégradation des terres (AGRHYMET, 2014; Loehman *et al.*, 2014).

L'île de Madagascar est aussi régulièrement touchée par le feu (Cf. figure 1). Selon Kull (2002), 25% à 50% des zones non forestières et non cultivées de Madagascar brûlent chaque année pendant la saison sèche. Rakotoarijaona (2004) estime les superficies brûlées à 650 000 ha par an. Le feu est utilisé par la population locale dans leurs activités agro-pastorales pour le maintien des zones de pâturage, la culture sur brûlis, le nettoyage des terres après la récolte et pour la production de charbon (Kull, 2000).

Cet article a pour objectif de préciser les configurations spatiales des différents types de feu à Madagascar.



Figure 1: Feu de brousse d'origine anthropique, observé au bord d'une piste dans la région Nord-Ouest de Madagascar (aux abords de l'aire protégée d'Antrema).

Ces configurations mettent en évidence les zones les plus exposées aux feux, ainsi que les facteurs en sont à l'origine. Les aires protégées constituent un dispositif important dans le système de protection de

l'environnement ; la configuration spatiale des feux par rapport à ces aires protégées a retenu notre intérêt.

2. Milieu d'étude

Madagascar est une île de l'océan indien occidental. Elle se situe entre 12° et 26° de latitude Sud et 43° et 50° de longitude Est. La superficie totale de l'île est de 587 041 km² avec une longueur nord-sud de 1600 km et une largeur maximale est-ouest de 600 km. La population était, en 2018, de 25 680 342 habitants avec une densité moyenne de 43,7 au km² (INSTAT, 2019).

Le climat est globalement de type tropical avec deux saisons bien distinctes : une saison chaude et pluvieuse de novembre à avril et une saison sèche de mai à octobre (Rabefitia *et al.*, 2008). 5 régions climatiques peuvent être distinguées (Direction Générale de la Météorologie, 2020)(cf figure 2):

- La région de l'Est avec un climat de type tropical chaud et humide ;
- La région littorale longeant la côte Est avec un climat équatorial très humide ;
- La région centrale des hauts-plateaux avec un climat de type subtropical ;
- La région Ouest qui se distingue par un été chaud et sec ;
- La pointe Sud de l'île, très sèche avec un climat subdésertique.

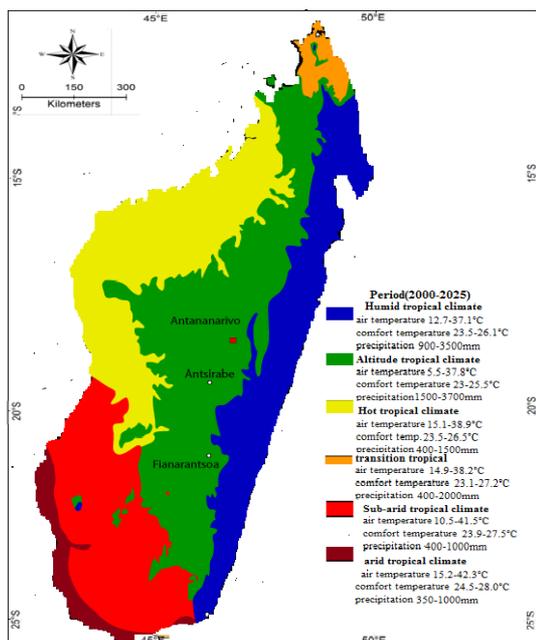


Figure 2 : Les régions climatiques de Madagascar (d'après Nematchoua, 2017)

La couverture végétale de Madagascar est très diversifiée et est répartie en différents écosystèmes. La côte est de l'île est dominée par la forêt dense et humide. A l'ouest de Madagascar, on observe plutôt de la forêt tropicale sèche. Le long des côtes, existent parfois des bandes de mangroves. La région Sud est caractérisée par des forêts épineuses. Les savanes herbeuses couvrent environ 70% du territoire. Elles dominent les hauts plateaux, mais s'étendent à l'ouest et au nord. (Koechlin *et al.*, 1974, Moat et Smith, 2007).

3. Données utilisées et Méthodes

3.1. Données utilisées

Les données de points de feu utilisées dans cet article sont les données MODIS MCD14ML des années 2014 à 2018, avec une résolution spatiale de 1 km (Giglio *et al.*, 2016a). Les superficies brûlées sont obtenues à partir des données mensuelles MODIS Burned Area Product – collection 6 (MCD64A1), grilles h22v10, h22v11 et h21v11, avec une résolution au sol de 500 m (Giglio *et al.*, 2018).

Les autres données utilisées sont :

- une carte d'occupation du sol réalisée par l'Office National pour l'Environnement (ONE *et al.*, 2015). Cette carte comporte 23 classes correspondant aux différents types de couverture forestière et d'occupation du sol à Madagascar entre 2005 et 2013.
- une carte des aires protégées terrestres (SAPM, 2016).
- les données des principales localités, des infrastructures routières terrestres et des découpages administratifs.

3.2. Prétraitement et traitement des données feux

Les points de feu sont d'abord regroupés annuellement et mensuellement afin d'avoir une vision générale des tendances saisonnières.

Les données des superficies brûlées comprennent un attribut 'Burn date' qui fournit des informations utiles sur chaque pixel (Giglio *et al.*, 2016b):

- -2 : pixel correspondant à de l'eau maritime (mer et océan) ;
- -1 : pixel non classifié (pas assez de données).
- 0 : pixel correspondant à une zone non brûlée ;
- 1-366 : numéro du jour julien durant lequel le feu a été observé sur le pixel considéré.

Ces données, initialement en format raster, sont converties en format vecteur et regroupées par mois et par année.

3.3. Agrégation des points de feu

Trois méthodes de statistiques spatiales sont utilisées ici afin d'obtenir des informations sur la répartition des points de feu. Il s'agit de la méthode du plus proche voisin, de la méthode d'agrégation hiérarchique des plus proches voisins (*Nearest Neighbor Hierarchical clustering-NNH*) (Zaninetti, 2005 ; Levine, 2015) et de la méthode des permutations spatio-temporelles ou « scan spatio-temporel » (Kulldorff *et al.*, 2005). Ces méthodes sont appliquées annuellement pour chaque saison sur les données de points de feu

3.4.1. Analyse du plus proche voisin

L'analyse du plus proche voisin est une méthode s'intéressant à la structure spatiale globale d'un semis de points, à son organisation (concentrée, aléatoire ou répartie) et à l'échelle de cette organisation (Zaninetti, 2005). Elle est fondée sur les distances entre les différents points (Clark et Evans, 1954)..

L'analyse du plus proche voisin conduit au calcul d'un indice R du plus proche voisin. C'est le rapport des distances entre les points les plus proches et la distance aléatoire du plus proche voisin (Clark et Evans, 1954 ;

Levine, 2015a). Une série de distances est ainsi mesurée pour chaque point en utilisant soit tous les autres points présents, soit un échantillon choisi au hasard. La valeur de la distance moyenne au plus proche voisin est calculée sur le même ensemble.

La statistique R du plus proche voisin est obtenue comme suit :

$$R = \frac{D_1}{D_0} \quad (1) \quad (\text{Clark et Evans, 1954; Levine, 2015a})$$

où D_1 est la distance moyenne observée des plus proches voisins et D_0 est la distance aléatoire du plus proche voisin ou distance moyenne attendue.

La distance moyenne observée D_1 est donnée par :

$$D_1 = \frac{1}{N} \sum_i \min(d_{ij}) \quad (2) \quad (\text{Levine, 2015a})$$

où d_{ij} est la distance du voisin le plus proche pour tout point ij et N le nombre de points.

Pour une répartition aléatoire théorique, la distance moyenne attendue entre les voisins les plus proches est donnée par :

$$D_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{S}{N}} \quad (3) \quad (\text{Levine, 2015a})$$

où N est le nombre de points dans la distribution et S est la superficie de la zone étudiée.

3.4.2 Agrégation des points voisins

Cette approche consiste à regrouper les points qui sont spatialement proches afin de former un agrégat (Levine, 2015b). Pour détecter un agrégat, on utilise une distance-seuil et on compare cette valeur aux distances entre le point considéré et tous les autres points. Tous les points dont la distance au point de référence est inférieure à la distance-seuil sont considérés comme des proches voisins, formant ainsi un même agrégat.

La distance-seuil utilisée est la distance aléatoire des proches voisins donnée par :

$$D_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{S}{N}} \quad (4) \quad (\text{Levine, 2015b})$$

Avec : N nombre de points dans la distribution et S la superficie de l'agrégat considéré.

Le nombre minimum de points à inclure dans un agrégat est un critère arbitraire que l'on se donne.

L'intervalle de confiance est donné par les limites inférieure et supérieure suivantes (Levine, 2015b):

$$I = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{S}{N}} \pm t \cdot \frac{0.26136}{\sqrt{\frac{N^2}{S}}} \quad (5)$$

où t est la valeur associée à un niveau de probabilité de la distribution de Student. On obtient alors des agrégats dits du premier ordre.

Un agrégat est représenté par une ellipse dont le grand axe est orienté selon la direction de la plus grande variation des éléments de l'agrégat en question.

Les agrégats du premier ordre peuvent eux-mêmes être regroupés en agrégats du second ordre avec des nouvelles valeurs de distance-seuil et du nombre minimal d'éléments par agrégat. Les agrégats du second ordre, à leur tour, peuvent être regroupés en agrégats de troisième ordre, et ainsi de suite. La procédure s'arrête

lorsqu'il n'y a plus d'éléments qualifiés pour être rattachés à un agrégat. montré

3.4.3 Méthode des permutations spatio-temporelles

Afin de prendre en compte la dimension temporelle du phénomène, Kulldorff *et al.* (2005) ont étendu la méthode du scan spatial en y introduisant le temps. Cette méthode est construite à partir de fenêtres cylindriques de base circulaire et dont l'axe vertical correspond au temps.

La base circulaire est définie exactement comme pour l'analyse spatiale, tandis que la hauteur du cylindre correspond à la période de recherche. La fenêtre cylindrique est ensuite déplacée dans l'espace et dans le temps, de sorte que pour chaque zone géographique et pour chaque taille d'agrégat possible, toutes les périodes de temps possibles soient testées.

Le nombre total de cas attendus dans une zone z et pour une période d est donné par la formule suivante (Kulldorff *et al.*, 2005) .

$$\mu_{zd} = \frac{1}{C} \left(\sum_z C_{zd} \right) \left(\sum_d C_{zd} \right) \quad (6)$$

où μ_{zd} désigne le nombre total de cas attendus dans la zone z à la période d , C le nombre total de cas observés sur toute la zone et durant toute la période et C_{zd} le nombre de cas observés dans la zone z , pour la période d .

Le nombre de cas attendus μ_A pour une fenêtre cylindrique A est la somme des cas attendus μ_{zd} (le nombre de cas attendus par période et par zone) à l'intérieur du cylindre A (Kulldorff *et al.*, 2005).

$$\mu_A = \sum_{z,d \in A} \mu_{zd} \quad (7)$$

On balaie ensuite la zone étudiée avec cette fenêtre cylindrique. La fenêtre est placée successivement sur différents centroïdes de la zone étudiée. On dit qu'un agrégat est détecté lorsque le nombre de cas à l'intérieur de la fenêtre est significativement supérieur à celui observé en dehors de cette fenêtre.

3.4. Répartition des feux par rapport aux aires protégées et facteurs de feu

Les *agrégats des points* de feu sont superposés à la carte d'occupation du sol et à celle des aires protégées. On compte ensuite le nombre d'agrégats dans chaque type d'occupation des sols et dans chaque aire protégée.

Les distances entre le centre de chaque agrégat du 1^{er} ordre et les voies de communication d'une part, et les localités d'autre part, sont également calculées afin de pouvoir évaluer les influences de ces facteurs.

4. Résultats

4.1. Répartition spatiale et temporelle des feux à Madagascar

La figure 3a représente la distribution spatiale des points de feux actifs et des superficies brûlées pour la période de 2014 à 2018. Un exemple de superficie brûlée observée sur une image Google Earth, dans la région Nord-Ouest de Madagascar est présenté figure 3b.

Les variations annuelles des nombres de points de feu et des superficies brûlées sont fournies figure 4. Les

figures 5 et 6 fournissent les distributions mensuelles des points de feu et des superficies brûlées.

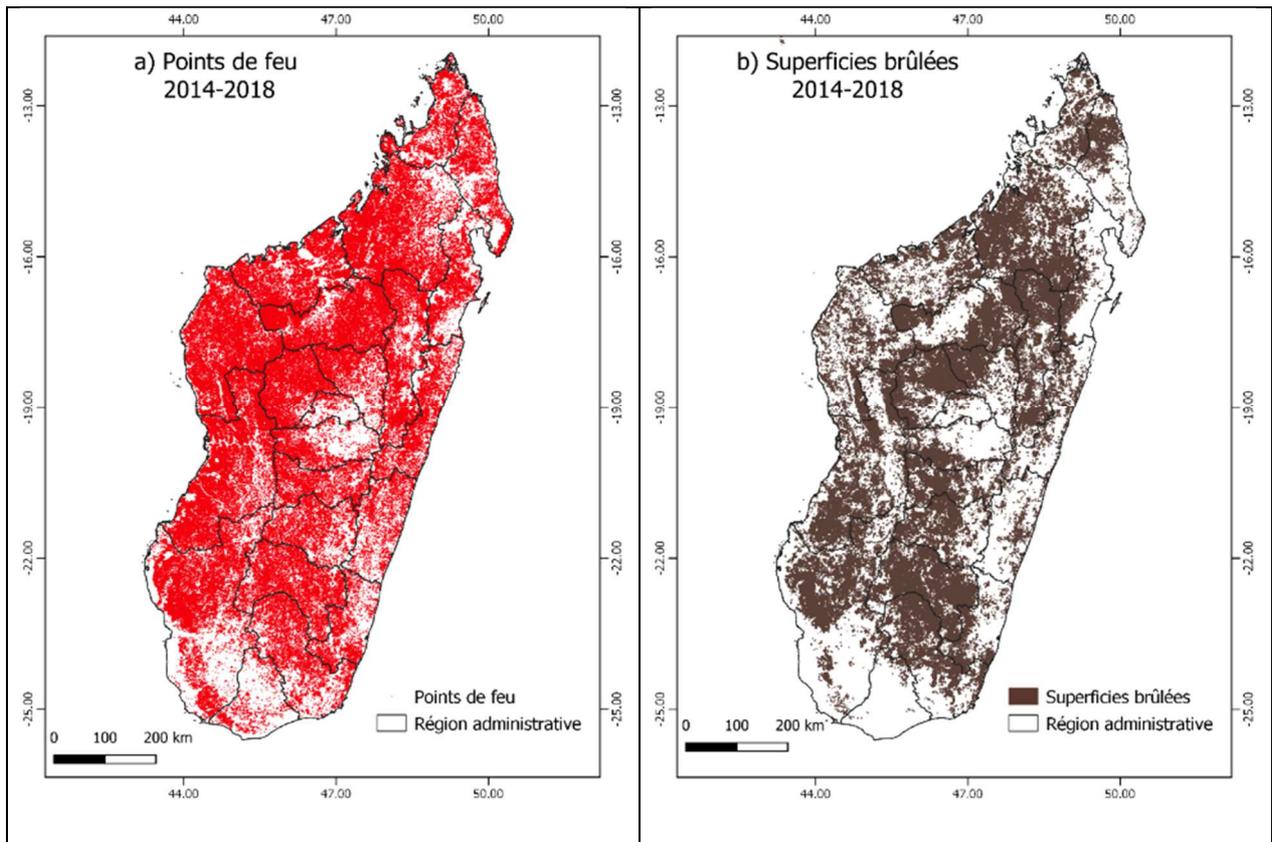


Figure 3a : Distribution spatiale des points de feu (a) et des superficies brûlées (b) pendant la période 2014-2018

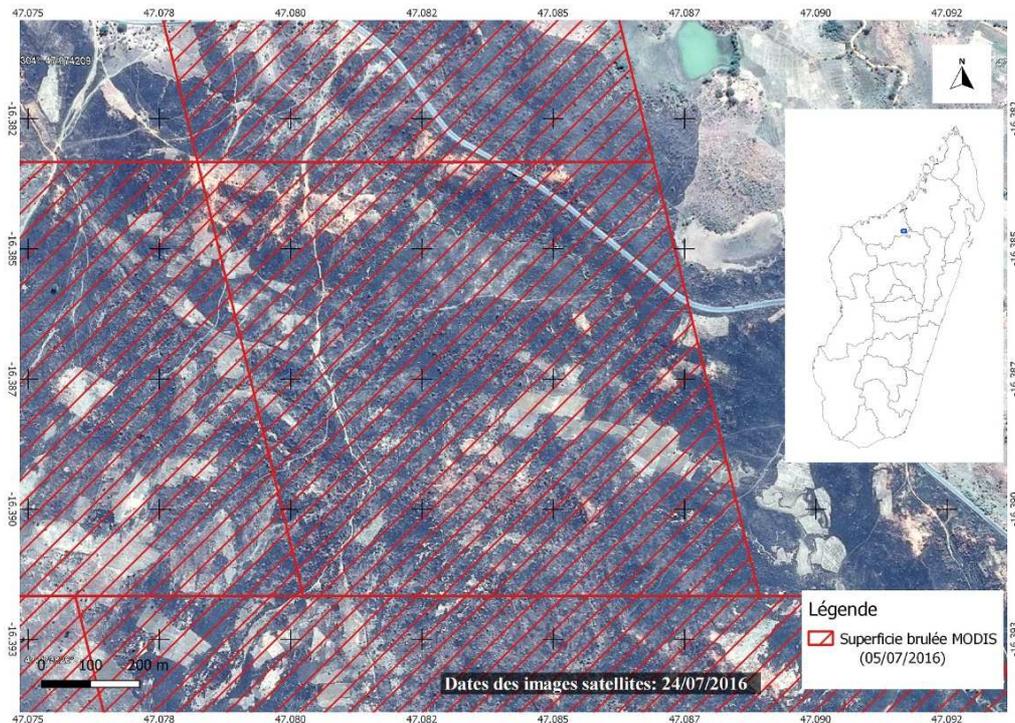


Figure 3b : Un exemple de superficie brûlée repérée par le capteur MODIS et observable sur une image à très haute résolution dans la région N-O de l'île. L'image Google Earth est datée du 24 juillet 2016, tandis que la superficie brûlée est identifiée la première fois par le capteur MODIS le 05 juillet 2016.

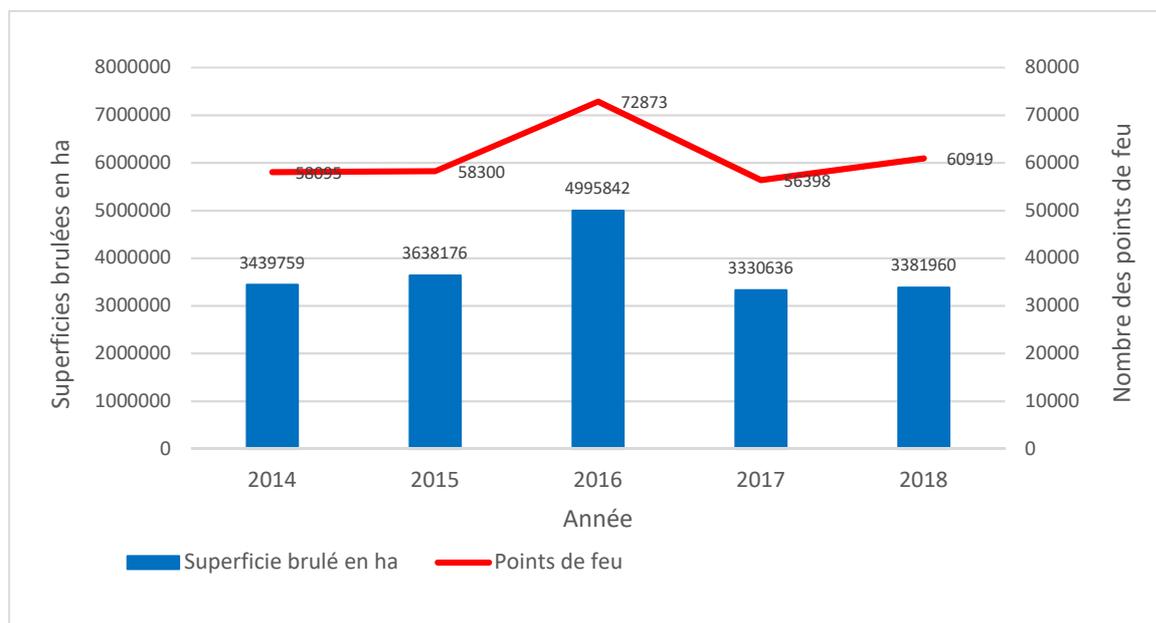


Figure 4 : Variation annuelle du nombre de points de feu et des superficies brûlées détectées par les capteurs MODIS à Madagascar pour la période 2014 à 2018

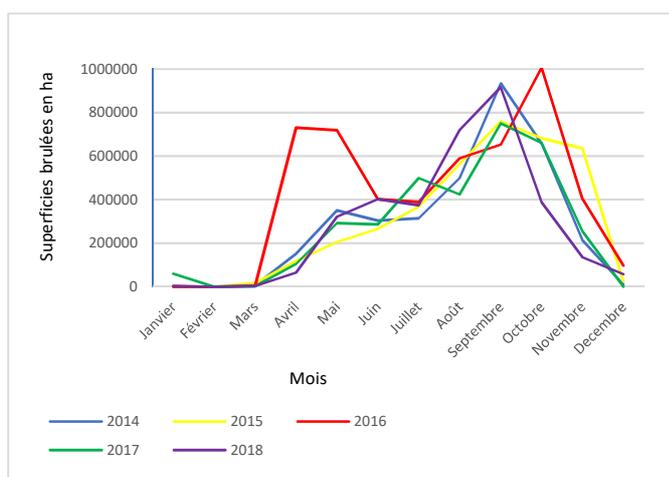


Figure 5 : Variations mensuelles de nombre de points de feu détectés à Madagascar entre 2014 à 2018

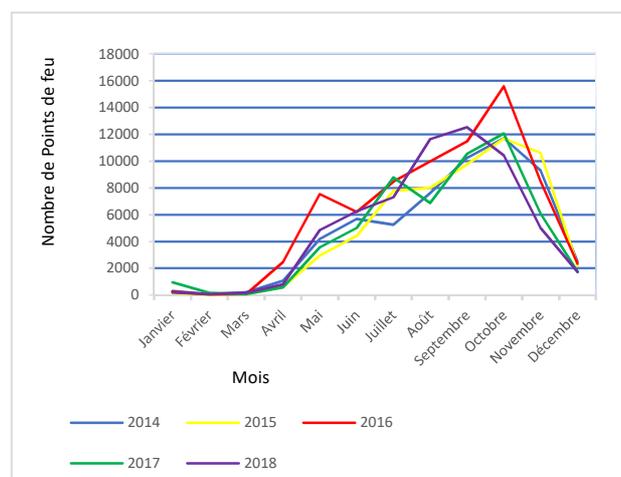


Figure 6 : Variations mensuelles des superficies brûlées détectées à Madagascar entre 2014 à 2018

4.2. Résultats des approches par les statistiques spatiales

Les méthodes des statistiques spatiales sont appliquées d'une part sur les données de points de feu observés durant les saisons sèches (mai à octobre) et d'autre part sur les données correspondant aux saisons humides (novembre à avril). La distribution des points de feu par saison est présentée sur les figures 7 à 11 :

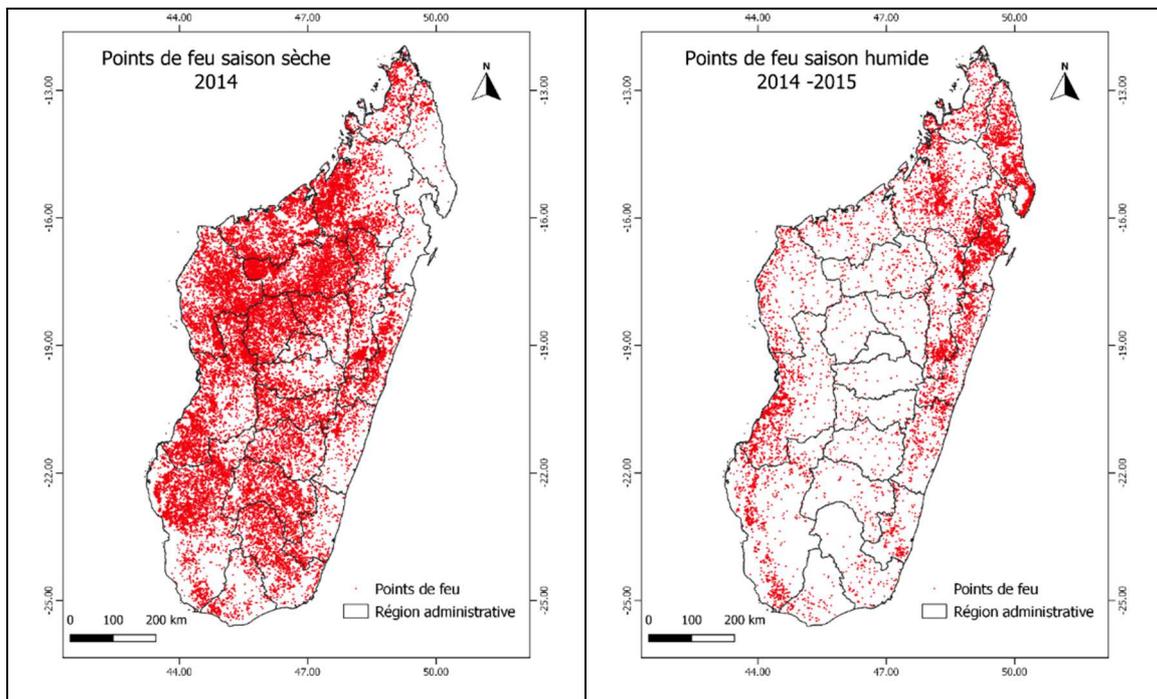


Figure 7 : Cartes de la distribution spatiale des points de feu par saison. A gauche : saison sèche (mai. - oct. 2014) ; à droite : saison humide (nov. 2014-avr. 2015)

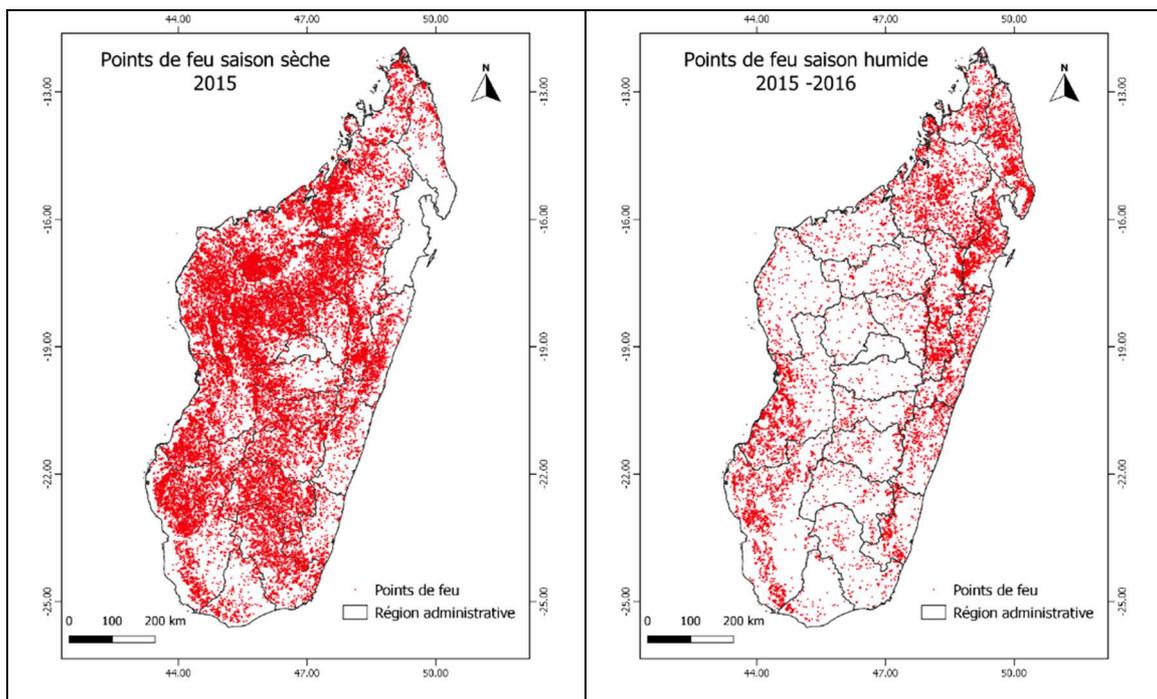


Figure 8 : Cartes de la distribution spatiale des points de feu par saison. A gauche : saison sèche (mai. - oct. 2015) ; à droite : saison humide (nov. 2015-avr. 2016)

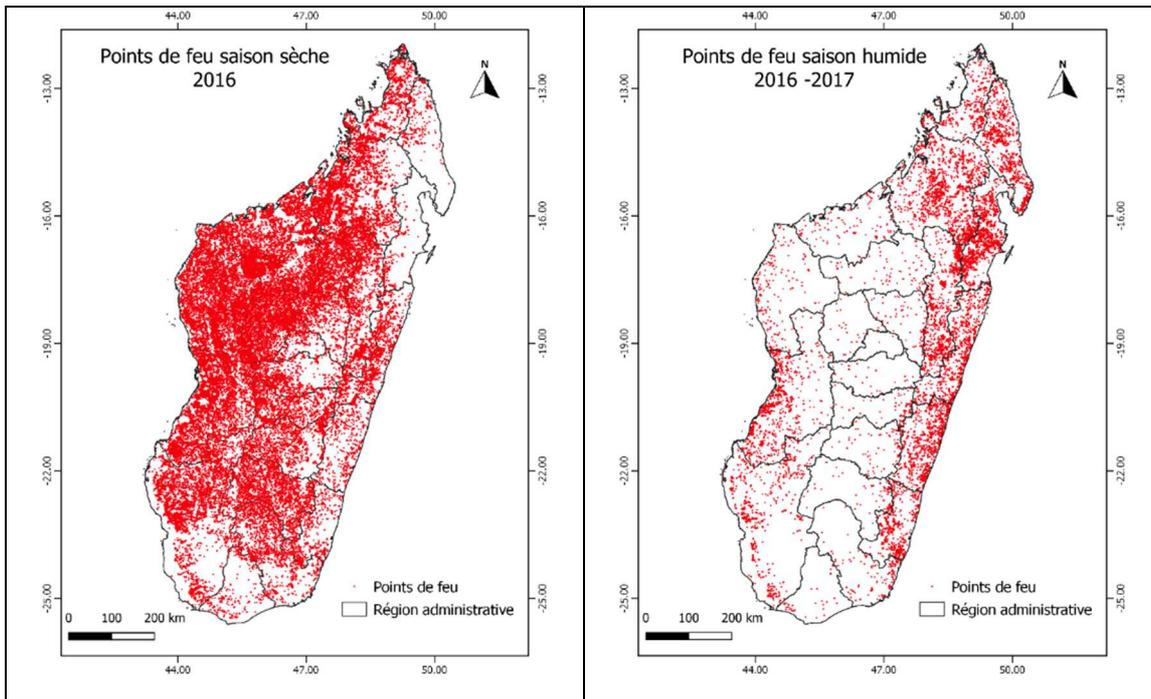


Figure 9 : Cartes de la distribution spatiale des points de feu par saison. A gauche : saison sèche (mai. - oct. 2016) ; à droite : saison humide (nov. 2016-avr. 2017)

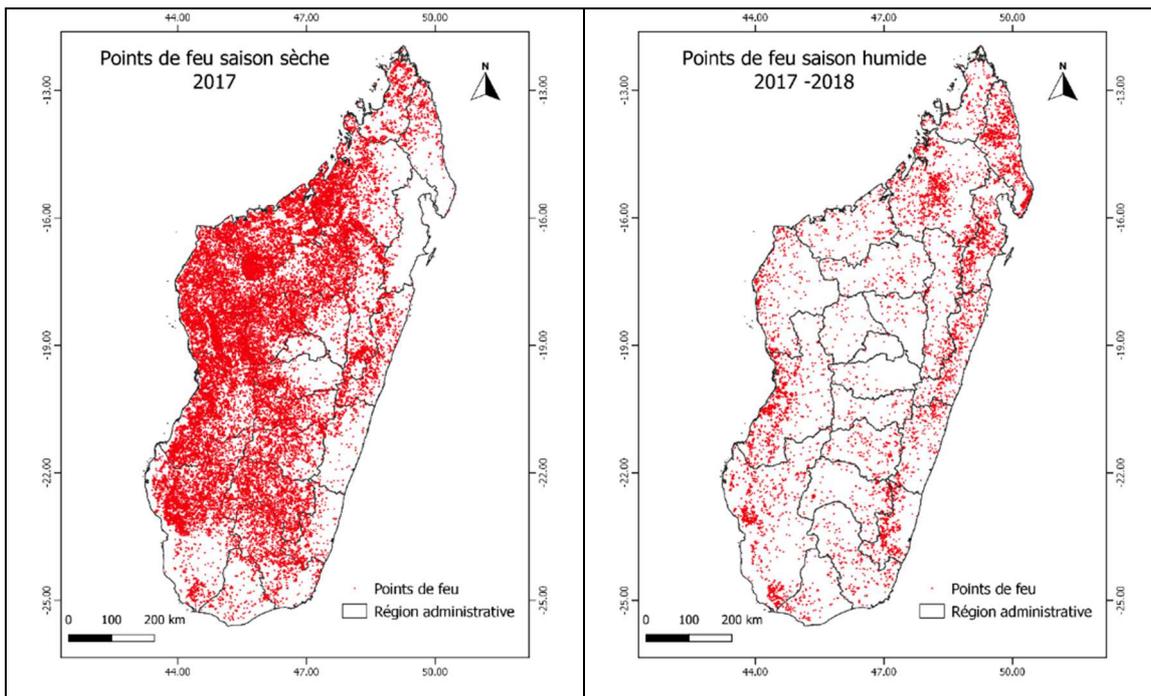


Figure 10 : Cartes de la distribution spatiale des points de feu par saison. A gauche : saison sèche (mai. - oct. 2017) ; à droite : saison humide (nov. 2017-avr. 2018)

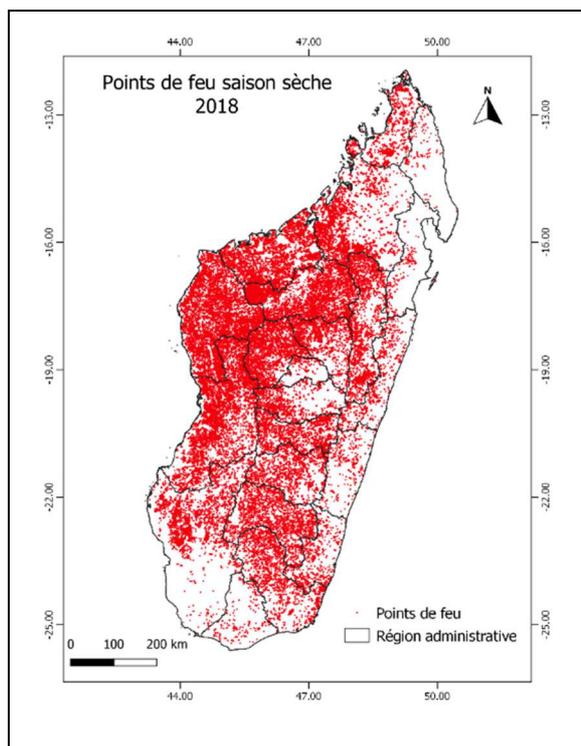


Figure 11 : Cartes de la distribution spatiale des points de feu par saison. Saison sèche (mai. - oct. 2018)

4.2.1. Analyse des distances aux plus proches voisins

Les tableaux 1 et 2 présentent les résultats de l'analyse des distances aux plus proches voisins correspondant respectivement aux saisons sèches et humides.

Tableau 1 : Distances aux plus proches voisins durant les saisons sèches

Année	Distance moyenne du voisin le plus proche d'un point de feu (m)	Distance aléatoire du voisin le plus proche d'un point de feu (m)	R
2014	1245	1812	0,69
2015	1245	1814	0,69
2016	1120	1574	0,71
2017	1194	1770	0,67
2018	1144	1664	0,69
Distance moyenne	1189	1727	0,69

Tableau 2 : Distances aux plus proches voisins durant les saisons humides

Année	Distance moyenne du voisin le plus proche d'un point de feu (m)	Distance aléatoire du voisin le plus proche d'un point de feu (m)	R
2014-2015	1888	3404	0,55
2015-2016	1775	3061	0,58
2016-2017	1799	3414	0,53
2017-2018	2247	3926	0,57
Distance moyenne	1927	3451	0,56

4.2.2. Analyse NNH

Pour cette approche, la distance aléatoire des plus proches voisins et un nombre minimum de points égal à 5 par agrégat sont utilisés. Les cartes des agrégats de

points de feu pendant les saisons sèches entre 2014 à 2018 et celles correspondant aux saisons humides pendant cette même période sont fournies figures 12 à 16.

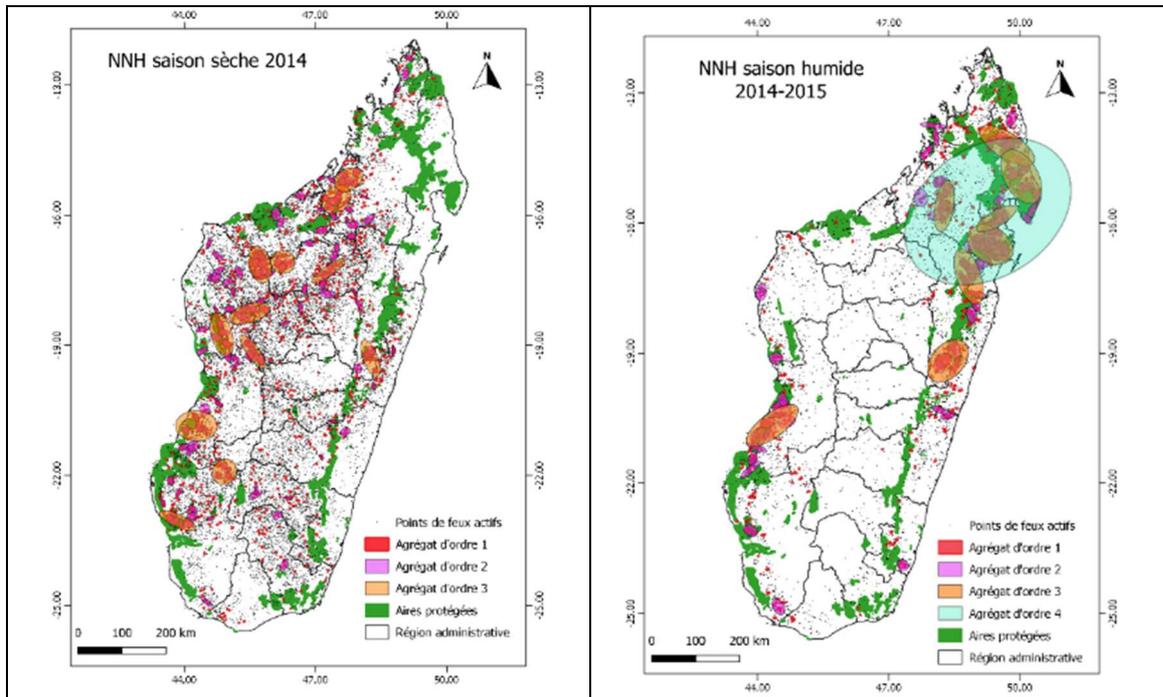


Figure 12 : Cartes des agrégats de points de feu : à gauche : durant la saison sèche (mai - oct. 2014) et à droite durant la saison humide (nov. 2014 - avril 2015)

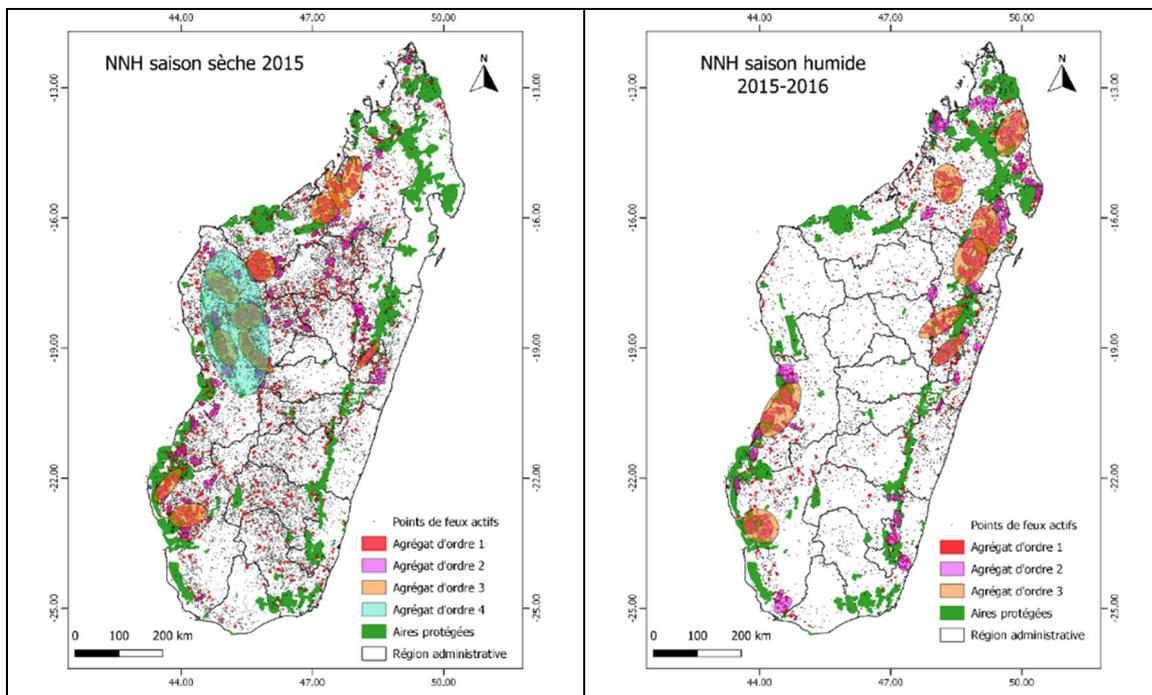


Figure 13 : Cartes des agrégats de points de feu : à gauche, durant la saison sèche (mai - oct. 2015) et à droite, durant la saison humide (nov. 2015 - avril 2016)

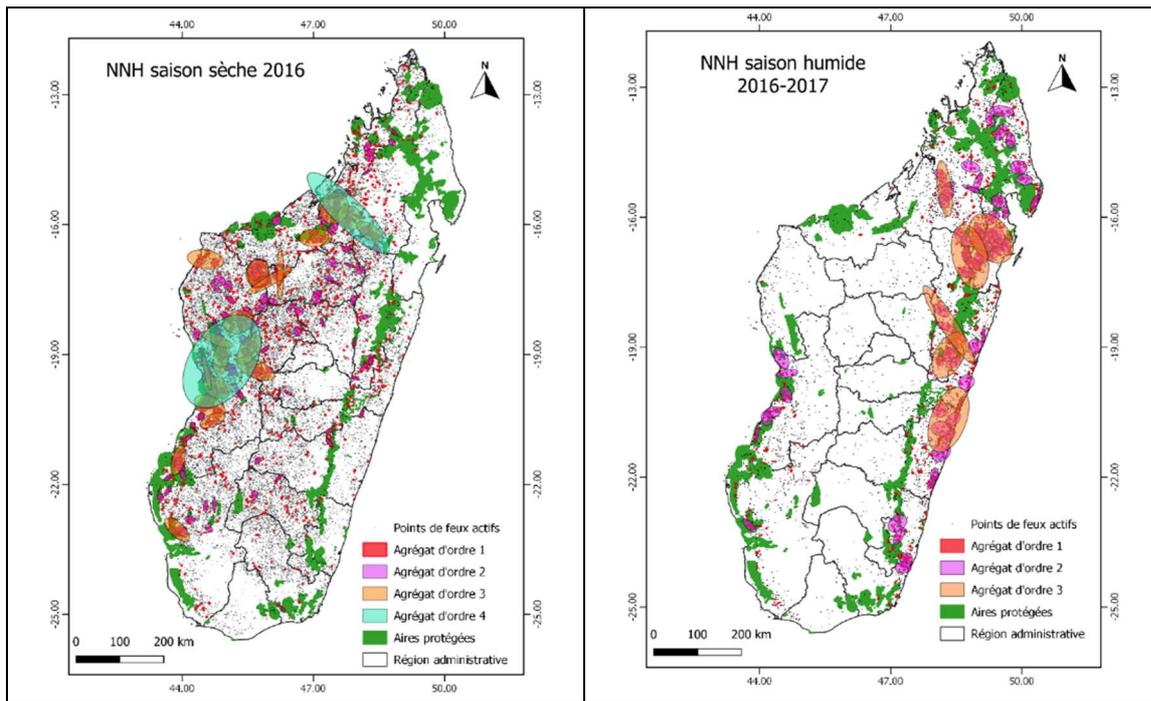


Figure 14 : Cartes des agrégats de points de feu : à gauche : durant la saison sèche (mai - oct. 2016) et à droite durant la saison humide (nov. 2016 - avril 2017)

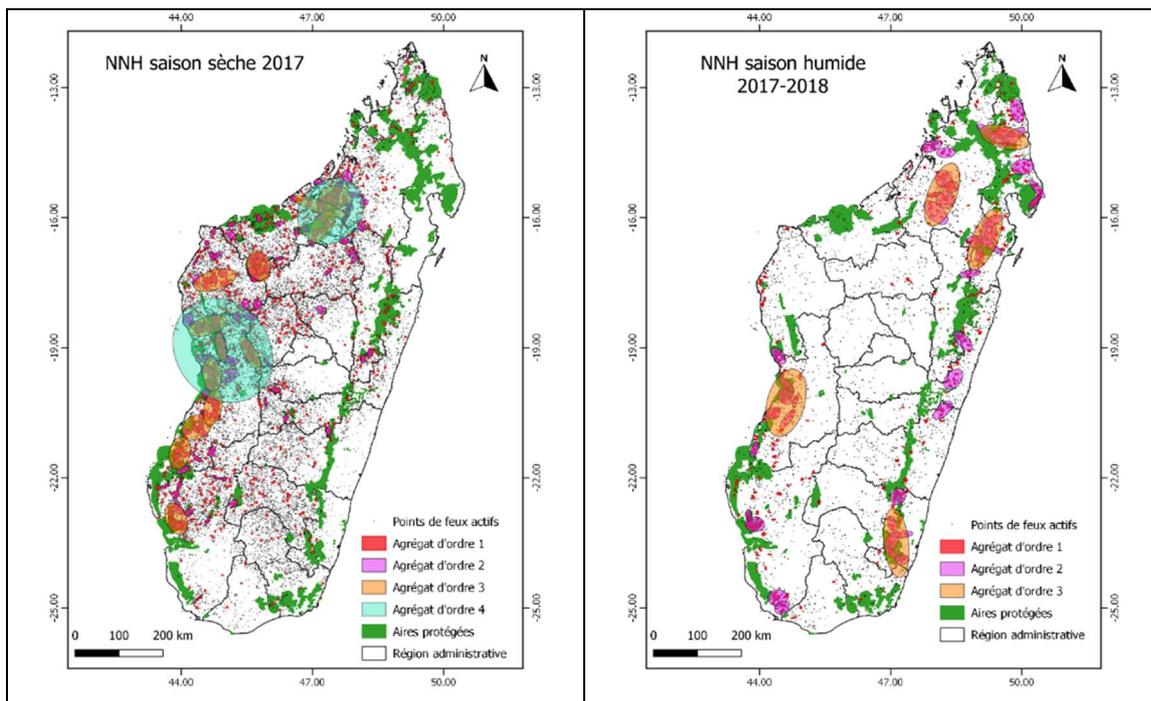


Figure 15 : Cartes des agrégats de points de feu : à gauche : durant la saison sèche (mai - oct. 2017) et à droite durant la saison humide (nov. 2017 - avril 2018)

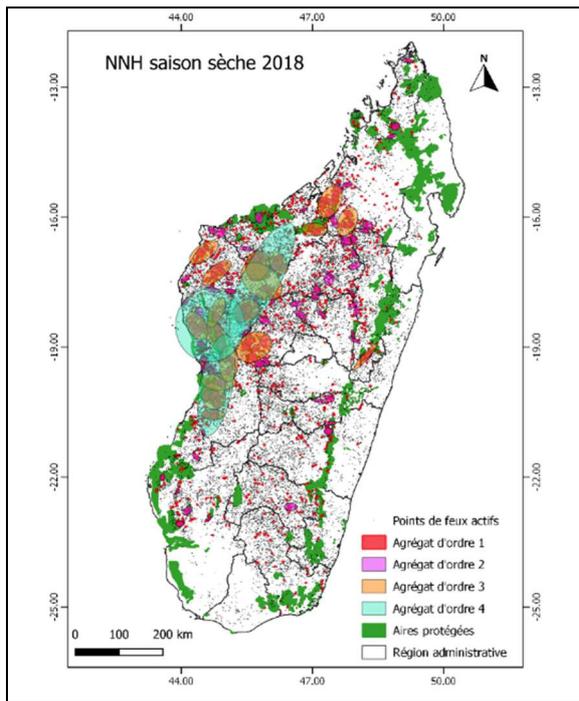


Figure 16 : Cartes des agrégats de points de feu durant la saison sèche (mai - oct. 2018)

4.2.3. Analyse par permutation spatio-temporelle (STSSP)

La détection des agrégats spatio-temporels des points de feu a été réalisée à l'aide d'une fenêtre circulaire centrée sur chaque point de feu, traitée comme un point unique devant le centre de la fenêtre circulaire. La taille maximale des agrégats a été fixée à un rayon de 10 km, ce qui correspond aux rayons des agrégats d'ordre 2 détectés aux analyses de NNH. La taille minimale des grappes temporelles a été fixée à 1 mois, la fenêtre temporelle a été fixée à une taille maximale de 2 mois et un intervalle de temps de 1 mois afin de détecter les groupes des feux avec des tendances temporelles mensuelles.

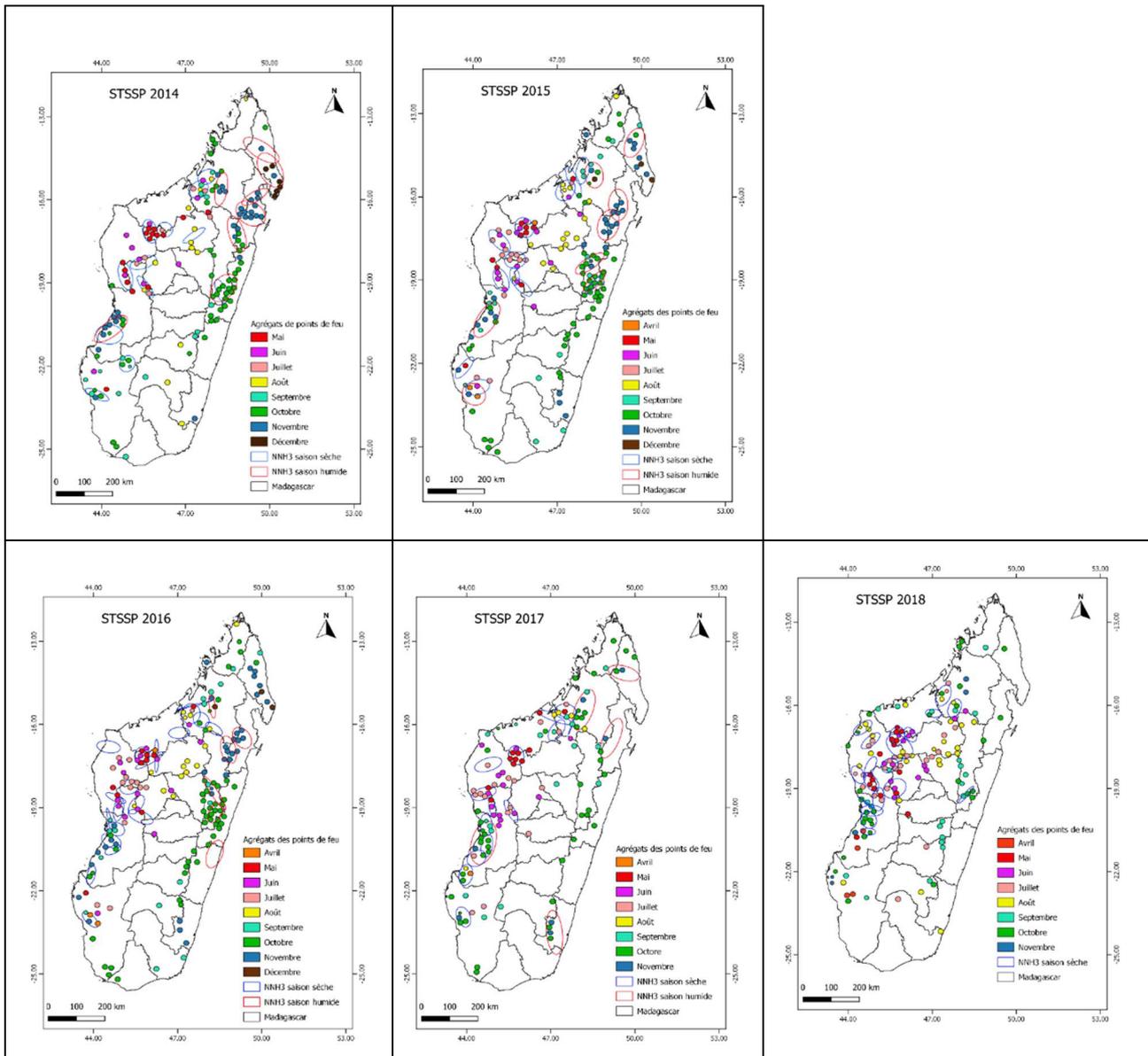


Figure 17 : Cartes des agrégats de points de feu obtenus par la méthode du scan spatio-temporel des points de feu (STSSP) de 2014-2018

4.3. Répartition des points de feu par rapport à l'occupation du sol

Les nombres d'agrégats de points de feu observés dans chaque type d'occupation du sol sont présentés dans les tableaux 3 et 4 suivants.

Tableau 3 : Nombre d'agrégats d'ordre 1 observés dans chaque type d'occupation du sol durant les saisons sèches entre 2014 et 2018

Occupation du sol	2014	2015	2016	2017	2018	Moyenne	% moy.
Prairies/ Terres cultivées	1245	1256	1427	1260	1379	1313	0,8
Forêts sèches intactes	112	63	173	241	226	163	0,1
Forêts humides intactes	49	57	59	51	82	60	0,04
Déforestation sur les forêts sèches entre 2010-2013	48	38	97	80	54	63	0,04
Déforestation sur les forêts sèches entre 2005-2010	25	29	31	31	18	27	0,02
Sols nus/ Sables/ roches	20	19	24	21	19	21	0,01
Forêts épineuses intactes	16	13	19	13	3	13	0,01
Déforestation sur les forêts humides entre 2010-2013	8	8	13	4	13	9	0,01
Déforestation sur les forêts épineuses entre 2010-2013	6	4	5	2	7	5	0
Déforestation sur les forêts humides entre 2005-2010	5	12	4	12	4	7	0
Zones humides	4	2	9	6	3	5	0
Déforestation sur les forêts épineuses entre 2005-2010	4	2	0	2	0	2	0
Mangroves	0	0	1	0	0	0	0

Tableau 4 : Nombre d'agrégats d'ordre 1 observés dans chaque type d'occupation du sol durant les saisons humides entre 2014 et 2018

Occupation du sol	2014	2015	2016	2017	Moyenne	%
Prairies/ Terres cultivées	388	453	403	238	371	0,63
Forêts humides intactes	109	112	112	62	99	0,17
Forêts sèches intactes	58	56	41	73	57	0,1
Déforestation sur les forêts sèches entre 2010-2013	19	24	12	20	19	0,03
Déforestation sur les forêts humides entre 2005-2010	8	12	11	2	8	0,01
Zones humides	2	4	6	0	3	0,01
Forêts épineuses intactes	5	16	6	18	11	0,02
Déforestation sur les forêts humides entre 2010-2013	11	9	4	4	7	0,01
Déforestation sur les forêts sèches entre 2005-2010	8	11	3	5	7	0,01
Déforestation sur les forêts épineuses entre 2010-2013	4	4	2	4	4	0,01
Déforestation sur les forêts épineuses entre 2005-2010	0	4	1	0	1	0
Sols nus/ Sables/ roches	1	2	1	0	1	0
Mangroves	1	0	0	0	0	0

4.4. Répartition des agrégats de points de feu par rapport aux voies de communication et aux zones d'habitation

Les distances des agrégats des points de feu par rapport aux pistes et aux zones d'habitation (villages) sont illustrées sous forme de courbes dans les figures 18 à 21.

4.5. Répartition des points de feu par rapport aux Aires protégées (AP)

Le nombre de points de feu observés à l'intérieur de chaque aire protégée durant la période 2014 à 2018 a été calculé et est fourni figure 22.

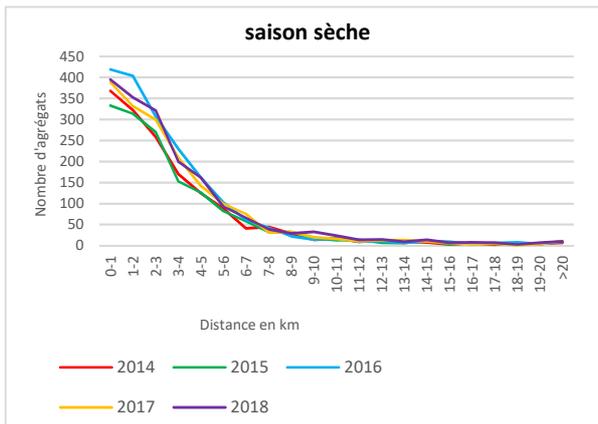


Figure 18 : Répartition des agrégats de points de feu d'ordre 1 selon leurs distances aux pistes durant les saisons sèches

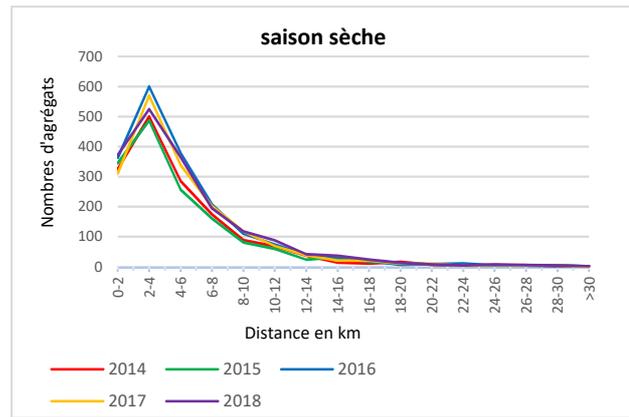


Figure 19 : Répartition des agrégats de points de feu d'ordre 1 selon leurs distances aux pistes durant les saisons humides

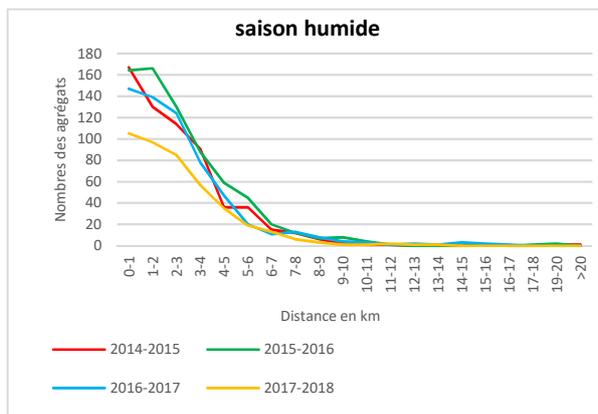


Figure 20 : Répartition des agrégats de points de feu d'ordre 1 selon leurs distances aux villages durant les saisons sèches

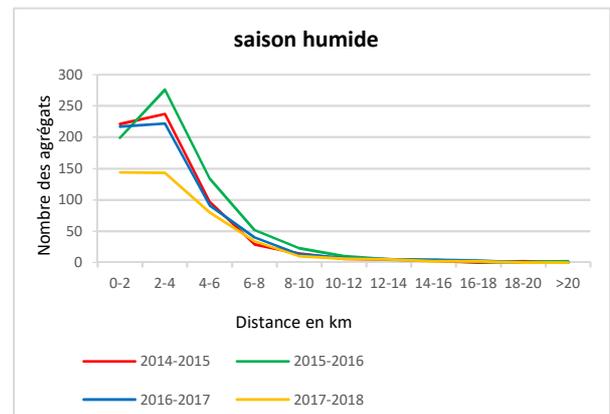


Figure 21 : Répartition des agrégats de points de feu d'ordre 1 selon leurs distances aux villages durant les saisons humides

5. Interprétations et discussions

5.1. Distribution temporelle des feux

5.1.1. Variation annuelle

La répartition annuelle des points de feu et des superficies brûlées (figure 4) montre que chaque année l'ensemble de l'île est concerné.

Pendant la période 2014 à 2018, 306 585 points de feu sont détectés, avec une moyenne de plus de 60 000 feux par an. Ces cinq dernières années, le nombre annuel de points de feu semble avoir été stable, même si 2016 montre une plus forte activité avec 72 873 points. Le minimum a été observé sur l'année 2017 avec 56 398 points de feu.

En moyenne, 3 757 792 ha., soit 6% de la superficie totale du pays, sont brûlés chaque année. Le maximum de superficie brûlée (4 995 842 ha) a été enregistré

durant l'année 2016. Le minimum l'a été en 2017 avec 3 330 636 ha.

5.1.2. Variation mensuelle

Les variations mensuelles du nombre de points de feu (figure 5) montrent une forte dépendance saisonnière. Les feux sont logiquement plus fréquents pendant la saison sèche et moins nombreux en saison pluvieuse (novembre, avril). La saison des feux s'étale du mois d'avril au mois de décembre sur l'ensemble du territoire. Les feux sont quasiment inexistantes durant les trois premiers mois de l'année, période humide et cyclonique durant laquelle la pluviométrie est la plus élevée (Rabefitia *et al.*, 2008). Les points de feu et les superficies brûlées augmentent rapidement en août et atteignent leur maximum en octobre. Dès novembre, on observe une décroissance régulière jusqu'en janvier.

La figure 6 représente les variations mensuelles des superficies brûlées. Durant les années 2014-2018, les mois de septembre et octobre ont enregistré les plus

grandes étendues de superficies brûlées, avec respectivement 802 404 ha et 678 743 ha en moyenne, soit 21.4% et 18.1% des superficies brûlées totales. Par contre, les plus faibles étendues brûlées s'observent durant les mois de décembre à mars avec des superficies brûlées respectivement de 38 432 ha, 12 818 ha et 6 510 ha par an, soit 1%, 0.3% et 0.2% des superficies totales brûlées annuellement. L'année 2016 est différente des autres années. Cette année a été, en effet, l'une des plus chaudes pour la planète (Dunn *et al.*, 2017). Cette chaleur globale était associée à une sécheresse importante. L'étendue mondiale de cette sécheresse a été fortement influencée par le phénomène El Niño (Dunn *et al.*, 2017).

5.2. Analyse spatiale des points de feu

En général, les feux sont observés sur la quasi-totalité du territoire national (figure 3). La majorité de ces points sont situés dans la partie occidentale de l'île. C'est une région sèche et la végétation y est beaucoup plus apte à

brûler. Par contre, en début de saison de pluie, les points de feu sont plutôt localisés dans la partie Est de l'île, zone plutôt humide (cf. figure 8 à 12). Ce sont des feux de préparation à la culture ou des feux pour la culture par abattis-brûlis (BNC REDD+, 2017). Cette répartition spatio-temporelle et particulièrement cette saisonnalité des feux s'expliquent par le fait que la mise à feu par les populations est liée à deux facteurs majeurs, la disponibilité d'une importante biomasse végétale d'une part, et le niveau de sécheresse de cette biomasse d'autre part. Ces deux facteurs dépendent à leur tour du climat et de la nature du substrat, donc de la qualité du sol. Globalement, il existe deux gradients de la répartition des précipitations à Madagascar, l'un nord-sud et un autre est-ouest. On constate que la répartition spatiale des feux suit bien ces deux gradients.

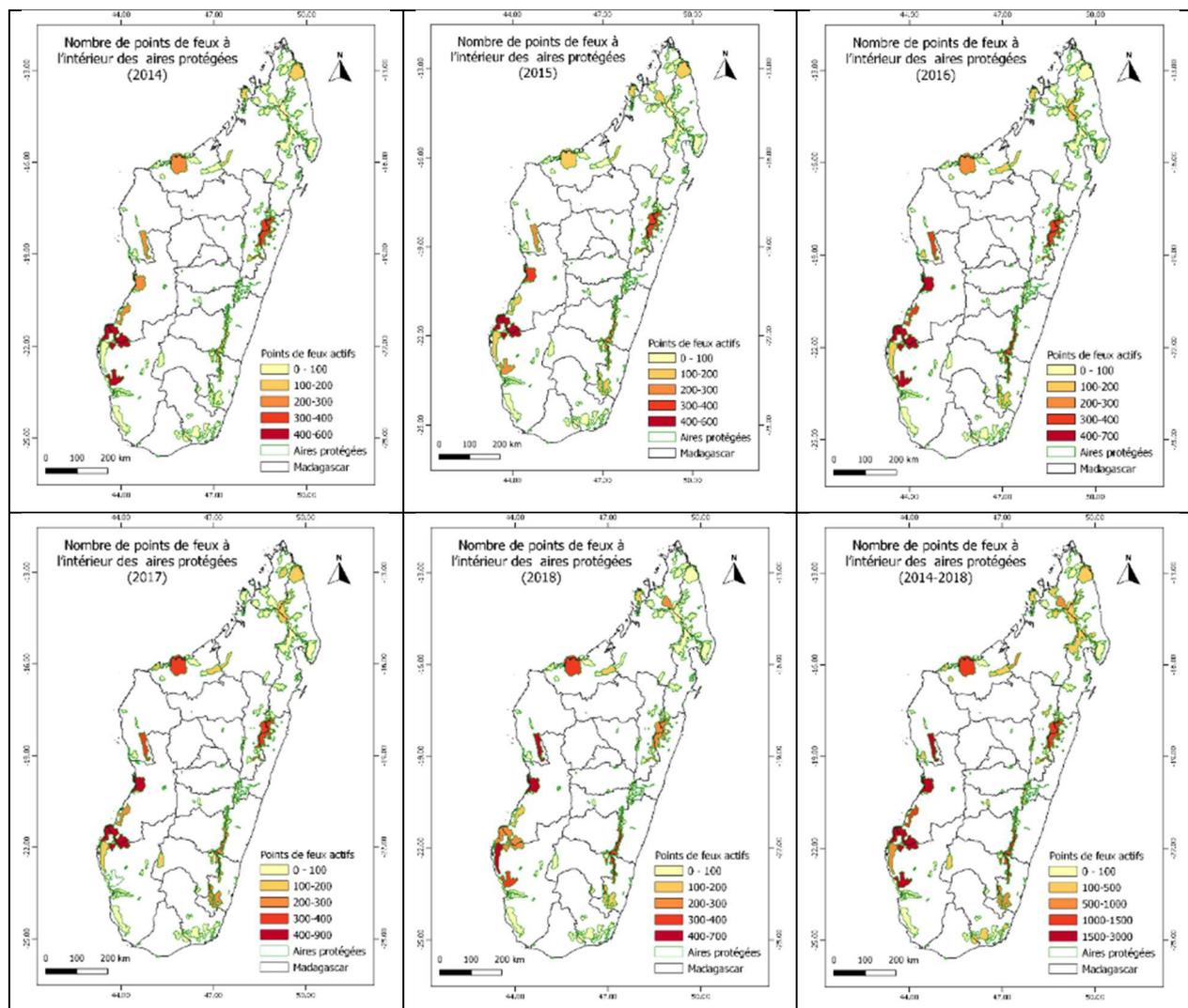


Figure 22 : Nombre de points de feu par an à l'intérieur des aires protégées durant la période 2014-2018

5.2.1. Analyse des distances au plus proche voisin

Pour toutes les périodes étudiées, la statistique R (tableaux 1 et 2) a une valeur inférieure à 1 (0.69 en saison sèche et 0.56 en saison humide). Ce qui signifie que les points de feu se répartissent de manière concentrée (Clark et Evans, 1954). Ces feux ne sont donc pas accidentels. Et les auteurs sont probablement les habitants des localités voisines.

5.2.2. Analyse NNH

Un agrégat représente un groupement de points de feu qui sont espacés d'une distance inférieure ou égale à la valeur-seuil et contenant au moins 5 points de feu. Quand plusieurs agrégats de rang 1 peuvent être regroupés à leur tour, c'est qu'il y a une forte concentration de points de feu dans la zone considérée. Les zones où l'on a des agrégats de rang supérieur à 1 sont celles qui sont les plus exposées au feu (Cf. figure 12 à 16).

L'existence de ces zones de concentration de feux peut être due également à des causes particulières comme la migration. En effet, du fait de la richesse en biomasse et de la disponibilité de terrains propices à l'agriculture, certaines zones attirent fortement des migrants qui s'y installent pour pratiquer les cultures sur défriche-brûlis, c'est-à-dire la coupe à blanc de la forêt sur de grandes surfaces, suivie d'une mise à feu avant la mise en terre des cultures. Dans la majorité des cas les feux sur de grandes étendues ont pour origine les feux de renouvellement de pâturage. Parfois, il peut s'agir également de voleurs de bétails qui mettent le feu sur des grandes surfaces de savane afin d'effacer leurs traces.

Les cartes des figures 12 à 16 indiquent que, pendant la saison sèche, les agrégats d'ordre 1 sont plus nombreux et les points de feu peuvent se regrouper jusqu'à l'ordre 4. Ces agrégats d'ordre supérieur se concentrent dans les parties Ouest et Sud-Ouest de l'île. Durant les saisons humides, les agrégats observés peuvent se regrouper jusqu'à l'ordre 3. Ils se trouvent alors principalement dans la partie est et nord-est de l'île. Ce qui confirme que les feux observés sont liés à des activités anthropiques différentes selon les saisons. Les caractéristiques des agrégats pendant les années 2014 à 2018 sont présentées dans le tableau 5.

Les parties où les agrégats sont les plus intenses sont l'ouest et le sud-ouest de Madagascar (saison sèche), ainsi que l'est et le nord-est (saison humide)

Zaninetti (2005) a montré que la dimension des ellipses d'ordre 1 est du même ordre de grandeur que la distance moyenne aléatoire. Les distances moyennes aléatoires du plus proche voisin sont de 1727 m pendant la saison sèche et de 3451 m pendant la saison humide. Cela indique que les agrégats sont plus denses et nettement plus localisés durant les saisons sèches. Pendant les saisons humides, la densité des agrégats est moindre et les agrégats sont plus étendus.

La fréquence temporelle des feux est ensuite évaluée en calculant la répétitivité annuelle des agrégats. Les cartes de la figure 23 montrent la répétitivité des feux. Les zones les plus affectées au cours des années se trouvent essentiellement dans la partie ouest de Madagascar durant les saisons sèches. Durant la saison humide, les points de feu sont plus fréquents dans la partie est et nord-est de Madagascar.

5.2.3. Analyse spatio-temporelle

La figure 17 illustre la variation spatio-temporelle annuelle des agrégats des points de feu à Madagascar pendant la période 2014-2018.

Les résultats indiquent une certaine répétition à la fois spatiale et temporelle de même configuration d'agrégat de points de feu. Il existe une dynamique annuelle des feux fortement structurée dans l'espace et dans le temps.

Chaque année, les agrégats de points de feu commencent le mois d'avril et se terminent le mois de décembre. Un groupe dominant d'agrégats est observé régulièrement dans la partie nord-est de l'île durant les mois d'octobre, novembre et décembre. D'autres groupes de points de feu sont également et régulièrement détectés dans les parties Ouest du pays durant les mois de mai à juillet. Selon Kull et Laris, (2009), il y a un déplacement des feux qui correspond à un niveau de précipitation. Cette succession dans le temps et dans l'espace des feux sur l'ensemble du territoire dépend largement du niveau de sécheresse de la biomasse végétale, particulièrement des espèces herbacées. Le niveau de précipitation et la durée de la période de pluie déterminent directement ce gradient de sécheresse de la végétation. Cette répartition spatio-temporelle des précipitations commence dans la partie nord-ouest du pays, puis se prolonge vers l'ouest et le centre, se termine enfin dans la partie orientale de Madagascar.

Plusieurs types de feux se distinguent selon leur période d'occurrence en raison de leurs effets sur la végétation. Les feux précoces, les feux intermédiaires et les feux tardifs, correspondent aux feux survenant respectivement entre les mois d'avril et juin, entre les mois de juillet et août et entre les mois de septembre et novembre (Jacquin *et al.*, 2011).

Les feux précoces durant la saison sèche favorisent le développement des espèces ligneuses au détriment des herbacées. Ils promeuvent également la repousse de feuilles à forte valeur de biomasse. Les feux tardifs favorisent le développement des espèces herbacées. Ceux-ci sont plus difficilement contrôlables et contribuent à augmenter le risque d'érosion des sols (Jacquin *et al.*, 2011).

Sur la figure 17, on observe que les feux se déclarent de manière plus précoce (en début de saison sèche, soit de mai à juillet) dans la partie occidentale de l'île. Il s'agit de feux de culture sur '*baiboho*' (terres fertiles de décrue) pratiqués dès que la saison des pluies se termine mais aussi, de feux de pâturage, utilisés pour favoriser la repousse d'herbe pour les bétails, ou encore, de feux allumés par les '*dahalo*' (brigands, voleurs de bétails) (Jacquin *et al.*, 2011). Par contre, l'est de Madagascar est soumis annuellement à un feu tardif. Il est dû aux cultures sur brûlis ou '*tavy*' (BNC REDD+, 2017).

5.3. Analyse de la répartition spatiale des agrégats et des facteurs des feux

5.3.1. Répartition des agrégats en fonction de l'occupation du sol

La répartition des agrégats des points de feu par type d'occupation du sol montre que les zones agricoles et les prairies (80%), suivies par les forêts sèches (10%) sont les plus touchées par les feux pendant la saison sèche. Il en est de même pour la saison humide où les zones de prairies et les terres cultivées (63%), suivies par les

forêts humides (17%) et les forêts sèches (10%) enregistrent les plus grands nombres de points de feu.

Tableau 5 : Caractéristiques des agrégats de points de feu pour les saisons sèches et les saisons humides

	Saisons sèches		Saisons humides	
Nombres moyenne de points des feux	47365		12611	
Distance-seuil moyenne (m)	1727		3451	
Caractéristiques des agrégats	Nombre	Superficie (km ²)	Nombre	Superficie (km ²)
Agrégat d'ordre 1	1642	1-21	587	1-62
Agrégat d'ordre 2	146	22-600	60	103-1410
Agrégat d'ordre 3	15	1204-5323	7	3500-9010
Agrégat d'ordre 4	2	17782-38020	0	-
Total des agrégats	1805	-	654	-

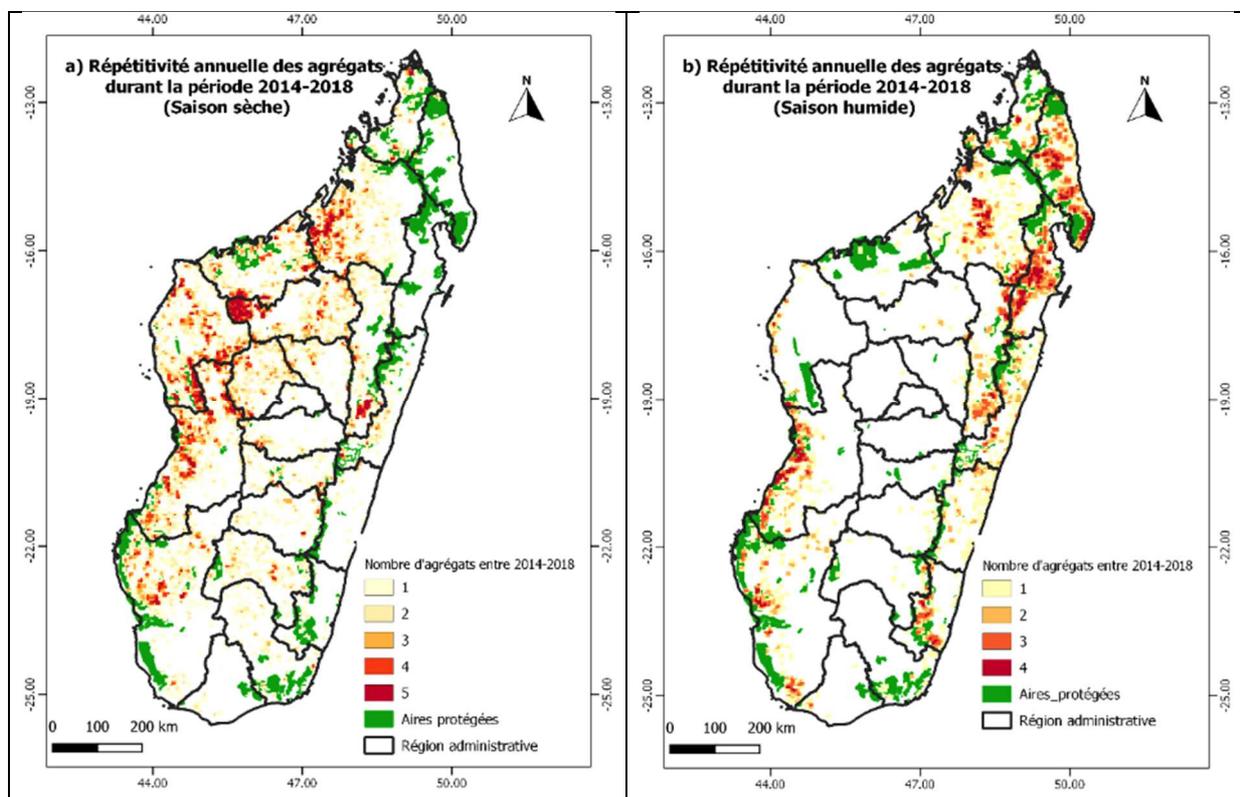


Figure 23 : Carte de la répétitivité annuelle des agrégats de points de feu pendant la saison sèche (a) et la saison humide (b)

Rarivomanana (2017) observe également que les feux sont plus fréquents dans les formations savaniques. Ce résultat peut s'expliquer par la régénération des pâturages et la mise à feu des parcelles à cultiver (culture sur brûlis) sur les zones de culture. Alvarado (2013) confirme que ces feux correspondent aux feux de préparation des cultures où les feux ne sont pas toujours contrôlés. Selon Jacquin (2010), le feu est une pratique associée à une utilisation des terres à vocation agricole ou pastorale.

5.3.2. Répartition des agrégats par rapport aux voies de communication et aux zones d'habitation

Les emplacements des villages et des pistes sont des facteurs importants dans l'avènement des feux. Les figures 18 et 29 montrent que les feux se déclarent dans des zones très proches des pistes. En effet, ces courbes présentent un maximum pour un éloignement des pistes compris entre 1 et 2 km. Ensuite, le nombre d'agrégats tend à diminuer à mesure que l'on s'éloigne des voies de communication.

La distance aux villages joue également un rôle important, quelle que soit la saison (figures 20 et 21). Dans les zones les plus proches (entre 0 à 2 km), le nombre de points de feu reste relativement faible. Ce nombre augmente rapidement et atteint son maximum pour une distance comprise entre 2 et 4 km. Le nombre d'agrégats diminue ensuite progressivement jusqu'à être négligeable à partir d'une distance de 14 km des zones d'habitation pendant la saison sèche et à partir de 12 km des zones d'habitation en saison humide. On n'observe plus d'agrégat de points de feu à partir d'une distance de 15 km. Ce qui confirme la conclusion de l'analyse des plus proches voisins.

5.3.3. Répartition des feux par rapport aux Aires Protégées (AP)

Les aires protégées ne sont pas exemptes de feu. Des points de feu sont bien observés à l'intérieur des aires protégées (figure 22). Les aires protégées de Ranobe-PK 32, de Menabe Antanimena, du Complexe de Zones humides Mangoky Ihotry, de Bemaraha, du Corridor Ankeniheny-Zahamena, du Complexe de Zones humides Mahavavy Kinkony, du Corridor Forestier Ambositra Vondrozo et de Kirindy Mitea sont les plus touchées par les feux.

5.4. Discussions

5.4.1. Discussion sur les données.

Les images spatiales présentent l'avantage de couvrir une grande superficie. Cependant, le suivi satellitaire des feux présente quelques limites car les satellites ne détectent que les feux qui sont actifs au moment de leurs passages. Les feux qui brûlent en dehors des heures de passage du satellite ou qui se trouvent masqués par les nuages ne seront pas détectés (MESA, 2015). Les nombreux passages de satellites peuvent également provoquer un double comptage des feux actifs. (Oliveras *et al.*, 2014). Malgré ces remarques, les tendances observées nous semblent robustes. Concernant les superficies brûlées, la résolution spatiale des produits MODIS Burned Areas de 500 m peut surestimer ou sous-estimer l'étendue des superficies brûlées (Barry *et*

al., 2015). Deux problèmes sont identifiés selon le type de zones brûlées : d'une part l'omission des petites taches entraîne une sous-estimation des superficies brûlées ; d'autre part un pixel est considéré comme entièrement brûlé alors que la surface réellement brûlée peut être inférieure à la taille du pixel (ici 25 ha), ce qui entraîne une surestimation des superficies brûlées (Alvarado, 2013). Une validation du produit MCD64A1 par l'image Landsat à l'échelle globale a permis de définir une erreur de commission estimée à 40,2 % et une erreur d'omission estimée à 72,6 % (Boschetti *et al.*, 2019). La prévalence des erreurs d'omission est reflétée par un biais estimé négatif de la superficie brûlée cartographiée par rapport aux données de référence indépendantes de Landsat (Boschetti *et al.*, 2019). Pour le produit MCD64A1, les superficies brûlées sont globalement sous-estimées. L'erreur d'omission due aux feux de végétation survient lorsque l'extension spatiale est insuffisante ou très fragmentée pour faire l'objet d'une discrimination en tant que feux de végétation (Roy et Landmann, 2005) ou ceux cachés par la couverture nuageuse (Giglio *et al.*, 2009).

5.4.2. Discussion sur les résultats

Les données satellitaires sur les superficies brûlées chaque année (6 %) est proche de la valeur obtenue par Matzke (2003) qui l'estime entre 6% et 7% par an. Tahintsoa (2018), quant à lui, affirme que 8.35% de la superficie totale de Madagascar ont été brûlés en 2016.

Les résultats confirment le caractère saisonnier et anthropique des feux à Madagascar. Les feux sont très liés aux modes de culture et aux modes d'élevage traditionnels. Nos résultats sur la répartition des feux par rapport aux pistes et villages confortent ceux de Dumas *et al.* (2013) qui affirment que la proximité aux lieux de vie et la proximité aux voies d'accès sont fortement corrélées au risque d'occurrence des feux.

L'année 2016, particulièrement chaude, correspond à un nombre plus élevé de points de feu et une augmentation des superficies brûlées. Cette année est une année de forte sécheresse. En période de sécheresse extrême, en particulier durant celles associées au phénomène d'oscillation australe El Niño, les feux deviennent incontrôlables (Liew, 2001). D'autre part, Kull (2002) affirme que la crise politique est l'un des facteurs expliquant les feux à Madagascar. Cependant, nous ne pouvons pas confirmer ce point, car il n'y a pas eu de crise politique majeure durant notre période d'étude (2014 à 2018).

L'application de la méthode NNH permet d'identifier des milieux géographiques où l'on a une concentration de points de feu (Schettini, 2019). Toutefois, le regroupement hiérarchique du plus proche voisin ne peut pas représenter efficacement les changements continus de la distribution des feux (Sun et Zhang, 2018). Par conséquent, une approche spatio-temporelle est utilisée afin d'affiner l'analyse (Kulldorf *et al.*, 2005).

Les résultats de la permutation spatio-temporelle se superposent bien aux agrégats de niveau 2 et de niveau 3 de la méthode NNH.

Les résultats de l'analyse spatiale indiquent qu'il existe une forte dépendance saisonnière des feux à Madagascar ; l'occurrence des feux se faisant à un rythme régulier et cyclique et la propagation des feux étant fortement influencée par les facteurs anthropiques (Gueguim *et al.*, 2018).

La persistance des feux dans les aires protégées montre bien que, malgré leur statut, ces dernières demeurent sous pression.

6. CONCLUSION

Cette étude consacrée aux feux à Madagascar a permis de mieux comprendre le phénomène, d'en donner les caractéristiques spatio-temporelles et d'identifier les zones sensibles. Ce travail devrait permettre de mieux orienter les actions de prévention. Cependant, des enquêtes à mener auprès des différentes couches de population et dans les différentes régions amélioreraient encore plus la compréhension de ce phénomène dont les origines sont également sociale et économique.

Remerciements : Nous tenons à remercier grandement les évaluateurs qui, par leurs remarques et commentaires, ont permis d'améliorer de manière notable la qualité de cet article.

Références bibliographiques

- AGRHYMET (2014). Suivi des feux actifs en Afrique de l'Ouest. Bulletin de veille environnementale - Suivi des feux actifs. Niamey, Niger. 6 p.
- Alvarado, S.T. (2013). 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. Thèse Université d'Avignon. 223 p.
- Barry, M.B., Badiane, D., Sall, S.M., Balde, D.M.L., et Millimono, T.N. (2015). Apport d'une méthode de détection et d'estimation des surfaces brûlées par imagerie MODIS : application aux savanes guinéennes. *Revue scientifique de l'Université Julius N'Yerere de Kankan*. 9 p.
- BNC REDD+ (2017). Analyse des moteurs de déforestation et de dégradation dans les écorégions des forêts humides de l'Est et des forêts sèches de l'Ouest de Madagascar – Livrable 4 : Rapport de synthèse. 43 p.
- Boschetti, L., Roy, D.P., Giglio, L., Huang, H., Zubkova, M., et Humber, M.L. (2019). Global validation of the collection 6 MODIS burned area product. *Remote Sens. Environ.* 235, 111490.
- Clark, P.J., et Evans, F.C. (1954). Distance to Nearest Neighbor as a Measure of Spatial Relationships in Populations. *Ecology* 35, 445–453.
- Colin, P.-Y., Jappiot, M., et Mariel, A. (2002). Causes des incendies. In *Protection des forêts contre l'incendie - fiches techniques pour les pays du bassin méditerranéen*. Cahier FAO Conservation n° 36. 2002. Rome, FAO. ISBN 92-5-204678-X. 31–41.
- Direction Générale de la Météorologie (DGM) (2020). Climatologie de Madagascar. <http://www.meteomadagascar.mg/services/applications/climatologie>. Consulté le 2020-01-20.
- Dumas, P., Toussaint, M., Herrenschildt, J.-B., Conte, A., et Mangeas, M. (2013). Le risque de feux de brousse sur la Grande Terre de Nouvelle-Calédonie : l'Homme responsable, mais pas coupable. *Revue Géographique de l'Est*, vol. 53.25 p.
- Dunn, R J.H, Hurst, D.F., Gobron, N. et Willett, K.M. (2017), *Global Climate in State of the Climate in 2016*, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 98(8) : S5–S62
- Food and Agricultural Organization of United Nations (FAO) (2007). *Fire management global assessment 2006: a Thematic Study Prepared in the Framework of the Global Forest Resources Assessment 2005 (Food & Agriculture Org.)*. FAO Forestry Paper 151 ; Rome. 136 p.
- Food and Agricultural Organization of United Nations (FAO) (2011). *Prévention des feux de forêt dans la région Méditerranéenne. Un enjeu majeur pour réduire les risques croissant d'incendies de forêt Méditerranéenne dans le contexte du Changement Climatique. Rapport de situation. 5-ème Conférence internationale sur les incendies de forêts en Afrique du Sud (Sun City)*. 20 p.
- Giglio, L., Loboda, T., Roy, D.P., Quayle, B., et Justice, C.O. (2009). An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor. *Remote Sens. Environ.* 113, 408–420.
- Giglio, L., Schroeder, W., et Justice, C.O. (2016a). The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products. *Remote Sens. Environ.* 178, 31–41.
- Giglio, L., Boschetti, L., Roy, D., Hoffmann, A.A., et Humber, M. (2016b). *Collection 6 MODIS Burned Area Product User's Guide Version 1.0*. 26.
- Giglio, L., Boschetti, L., Roy, D.P., Humber, M.L., et Justice, C.O. (2018). The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product. *Remote Sens. Environ.* 217, 72–85.
- Gueguim, C.D., Tchamba, N.M., and Fotso, C.R. (2018). Dynamique spatio-temporelle des feux de brousse dans le Parc National du Mbam et Djerem (Cameroun). *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 12, 728.
- Institut National des Statistiques (INSTAT) (2019). *Troisième recensement général de la population et de l'habitation (rgph-3). Résultats provisoires du rgph-3 de Madagascar*, INSTAT-CCER. 98 p.
- 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 Université de Toulouse. 146 p.
- Jacquin, A., Cheret, V., Sheeren, D., et Balent, G. (2011). Détermination du régime des feux en milieu de savane à Madagascar à partir de séries temporelles d'images MODIS. *Int. J. Remote Sens.* 32, 9219–9242.
- Koechlin, J., Guillaumet, J.-L., et Morat, P. (1974). *Flore et Végétation de Madagascar*. 687 p.
- Kull, C.A. (2000). *Deforestation, Erosion, and Fire: Degradation Myths in the Environmental History of Madagascar*. *Environ. Hist.* 6, 423–450.

- Kull, C.A. (2002). Madagascar aflame: landscape burning as peasant protest, resistance, or a resource management tool? *Polit. Geogr.* 21, 927–953.
- Kull, C. A., & Laris, P. (2009). Fire ecology and fire politics in Mali and Madagascar *in* M. A. Cochrane (Ed.), *Tropical Fire Ecology: Climate Change, Land Use, and Ecosystem Dynamics*. Springer-Praxis, 171 - 226.
- Kulldorff, M., Heffernan, R., et Hartman, J. (2005). A space–time permutation scan statistic for disease outbreak detection. *Plos med*, vol. 2, no 3, p. e59.
- Levine, N. (2015a). Distance Analysis I and II. CrimeStat: A Spatial Statistics Program for the Analysis of Crime Incident Locations (v 4.02). Ned Levine & Associates, Houston, Texas, and the National Institute of Justice, Washington, D.C. August. 51p.
- Levine, N. (2015b). Hot Spot Analysis of Points: I. CrimeStat: A Spatial Statistics Program for the Analysis of Crime Incident Locations (v 4.02). Ned Levine & Associates, Houston, Texas, and the National Institute of Justice, Washington, D.C. August. 74 p.
- Liew, S.C. (2001). Satellite detection of forest fires and burn scars. *Proceedings on the Workshop on Minimizing the Impact of Forest Fire on Biodiversity in ASEAN*: 34-46.
- Loehman, R.A., Reinhardt, E., et Riley, K.L. (2014). Wildland fire emissions, carbon, and climate: Seeing the forest and the trees – A cross-scale assessment of wildfire and carbon dynamics in fire-prone, forested ecosystems. *For. Ecol. Manag.* 317, 9–19.
- Matzke, N.J. (2003). Remote Sensing and Geostatistical Analysis of Anthropogenic Biomass Burning and Forest Degradation in Madagascar. PhD Thesis, University of California, Santa Barbara. 177 p.
- Monitoring for Environment and Security in Africa (MESA) (2015). Wildfire Service Reference Material MESA Thematic Team. Thematic Action: Agricultural and Environmental Resource Management MESA. 56 p.
- Moat, J., and Smith, P.P. (2007). Atlas of the vegetation of Madagascar (Royal Botanic Gardens, Kew). 126 p.
- Nematchoua, M.K. (2017). A study on outdoor environment and climate change effects in Madagascar. *Journal of Buildings and Sustainability* - Volume 1, Issue 1, 1-12.
- Oliveras, I., Anderson, L.O., et Malhi, Y. (2014). Application of remote sensing to understanding fire regimes and biomass burning emissions of the tropical Andes: Fire regimes of the tropical Andes. *Glob. Biogeochem. Cycles* 28, 480–496.
- Office National pour l'Environnement, Direction Générale des Forêts, Madagascar National Parks, World Conservation Society, et Environnement-Territoires-Citoyenneté (ONE, DGF, MNP, WCS, et Etc Terra) (2015). Changement de la couverture de forêts naturelles à Madagascar, 2005-2010-2013. Antananarivo. ONE, 21p.
- Rabefitia, Z., Randriamarolaza, L.Y.A., Rakotondrifara, M.L., Tadross, M., et Yip, Z.K. (2008). Le changement climatique à Madagascar. Direction Générale de la Météorologie, Antananarivo. 32 p.
- Rakotoarijaona, P. J. R. (2004). Système d'informations, aide à la décision et lutte contre les feux de brousse. Office National pour l'Environnement (ONE). 8 p.
- Rarivomanana, H. T. (2017). Analyse de la mise en œuvre des stratégies de lutte contre les feux à Madagascar: cas de la région Sofia. Mémoire, Université de Liège et Université Catholique de Louvain. 88 p.
- Roy, D.P., et Landmann, T. (2005). Characterizing the surface heterogeneity of fire effects using multi-temporal reflective wavelength data. *Int. J. Remote Sens.* 26, 4197–4218.
- Schettini, D.L. (2019). A Spatial Analysis of Homicide Crime's Distribution and Association with Deprivation in Stockholm Between 2010-2017. Master thesis, Lund University (Sweden). 76 p.
- Sun, F., et Zhang, J. (2018). Scale Features of Spatial Aggregation and Cluster Analysis of Coal Mines *in* 2018, 26th International Conference on Geoinformatics, (Ed. Kunming),. 1–5.
- Tahintsoa, G. H. (2018). Analyse spatiale et intra-annuelle des surfaces brûlées à partir des images MODIS en vue d'améliorer la gestion des ressources naturelles à Madagascar. Mémoire, Université d'Antananarivo. 108 p.
- Zaninetti, J-M. (2005). Statistique spatiale: Méthodes et applications géomatiques. Hermes Science Publications. Paris. 320 p.

LEGENDES EN ANGLAIS

List of figures

Figure 1 : anthropogenic bush fire observed in the north-western of Madagascar (on the outskirts of the Antrema protected area).

Figure 2 : Climatic map of Madagascar (after Nematchoua, 2017)

Figure 3a : Spatial distribution of fires (a) and burnt areas (b) during the period 2014-2018

Figure 3b : An example of burnt area observed by the MODIS sensor and also seen on a very high resolution Google Earth image in the N-W of Madagascar. The Google Earth image is dated July 24, 2016, while the burnt area is first identified by the MODIS sensor on July 05, 2016.

Figure 4 : Annual change of number of fires and burnt areas detected by MODIS sensors in Madagascar for the period 2014-2018

Figure 5 : Monthly variation of the number of fires detected in Madagascar between 2014 and 2018

Figure 6 : Monthly variation of burnt areas detected in Madagascar between 2014 and 2018.

Figure 7 : Maps of seasonal and spatial distribution of fires. Left: dry season (May to Oct. 2014); Right : wet season (Nov. 2014-Apr. 2015)

Figure 8 : Maps of seasonal and spatial distribution of fires. Left: dry season (May to Oct. 2014); Right : wet season (Nov. 2015-Apr. 2016)

Figure 9 : Maps of seasonal and spatial distribution of fires. Left: dry season (May to Oct. 2016); Right : wet season (Nov. 2016-Apr. 2017)

Figure 10 : Maps of seasonal and spatial distribution of fires. Left: dry season (May to Oct. 2017); Right : wet season (Nov. 2017-Apr. 2018)

Figure 11 : Maps of seasonal and spatial distribution of fires. Dry season (May to Oct. 2018)

Figure 12 : Maps of fires aggregates. Left : dry season (May-Oct. 2014); Right : wet season (Nov. 2014-Apr. 2015)

Figure 13 : Maps of fires aggregates. Left : dry season (May-Oct. 2015); Right : wet season (Nov. 2015-Apr. 2016)

Figure 14 : Maps of fires aggregates. Left : dry season (May-Oct. 2016); Right : wet season (Nov. 2016-Apr. 2017)

Figure 15 : Maps of fires aggregates. Left : dry season (May-Oct. 2017); Right : wet season (Nov. 2017-Apr. 2018)

Figure 16 : Maps of fires aggregates during dry season (May-Oct. 2018)

Figure 17 : Maps of fires aggregates obtained by the space-time scan method (STSSP) from 2014-2018

Figure 18 : Distribution of fires aggregates of order 1 according to the distance to tracks during dry seasons

Figure 19 : Distribution of fires aggregates of order 1 according to the distance to tracks during wet seasons

Figure 20 : Distribution of fires aggregates of order 1 according to the distance to villages during dry seasons

Figure 21 : Distribution of fires aggregates of order 1 according to the distance to villages during wet seasons

Figure 22 : Annual number of fires inside Protected Areas during 2014-2018

Figure 23 : Map of the annual repeatability of fires aggregates during the dry season (a) and the wet season

List of tables

Table 1 : Distance to nearest neighbors during dry seasons.

Table 2 : Distance to nearest neighbors during wet seasons.

Table 3 : Number of aggregates of order 1 observed in each landcover type during dry seasons between 2014 and 2018

Table 4 : Number of aggregates of order 1 observed in each landcover type during wet seasons between 2014 and 2018

Table 5 : Characteristics of fires aggregates for dry and wet seasons