



Available online at <http://www.ifg-dg.org>

Int. J. Biol. Chem. Sci. 9(4): 2091-2105, August 2015

ISSN 1997-342X (Online), ISSN 1991-8631 (Print)

International Journal
of Biological and
Chemical Sciences

Original Paper

<http://ajol.info/index.php/ijbcs>

<http://indexmedicus.afro.who.int>

Paramètres physiques d'évaluation du comportement des feux de végétation au Togo

Bareremna AFELU ^{1,2*} et Kouami KOKOU ^{1,3}

¹Laboratoire de Botanique et d'Écologie Végétale (LBEV), Faculté des Sciences, Université de Lomé

²Ministère de l'Environnement et des Ressources Forestières (MERF), Togo.

³Directeur de la Recherche Scientifique et Technique, Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, Lomé, Togo.

* Auteur correspondant, E-mail : domi2nic@gmail.com ; BP 4825, Tél (00228)90066796,

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'Organisation Internationale des Bois Tropicaux (OIBT) qui a apporté son appui financier à la réalisation des activités de cette étude.

RESUME

Au Togo, le brûlage de la végétation est une pratique agricole et culturelle très courante. Mais, au-delà de certaines normes, le feu échappe au contrôle et devient néfaste aux écosystèmes et au cadre de vie. Cette étude se propose de comprendre le comportement des feux pour une meilleure maîtrise des brûlages. Spécifiquement, les paramètres de biomasse combustible, vitesse de propagation et intensité ont été analysés pour chaque régime de feu. Le dispositif expérimental est constitué de 81 parcelles (30x80 m²) installées dans les savanes d'aires protégées. La vitesse de propagation est plus élevée en savane soudanienne (11±1 cm/s) qu'en zone guinéenne (9±1 cm/s). L'intensité va de 1972±192 à 2218±357 kW/m. La vitesse et l'intensité des feux précoces sont faibles et à portée de contrôle comparativement aux feux tardifs et de mi-saison. La connaissance des paramètres d'occurrence devient une étape incontournable dans la gestion des feux. Dans un contexte tropical et face aux défis de gestion durable des écosystèmes forestiers et d'amélioration du cadre de vie, la prévention des feux incontrôlés et la maîtrise des feux utilitaires exigent une bonne compréhension du comportement des feux.

© 2015 International Formulae Group. All rights reserved.

Mots clés : Intensité des feux, régimes de feu, vitesse de propagation, biomasse combustible.

Physical parameters of forest fires behaviour evaluation in Togo

ABSTRACT

In Togo, burning vegetation is very common as farming and cultural practice. But, beyond some standards, fires escape from human control and become harmful to forest ecosystems and the whole environment. This study aims at a better understanding of the fires behaviours. Specifically, parameters such as combustible biomass, propagation speed and intensity have been analyzed for each fire regime. The experimental device includes 81 land plots (30x80 m²) located in the savannas of protected areas. It is pointed out that the propagation speed is higher in sudanian savannah (11±1 cm/s) than guinean's (9±1 cm/s). The

© 2015 International Formulae Group. All rights reserved.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v9i4.31>

intensity varies between 1972±192 to 2218±357 kW/m. Both speed and intensity are lower and easier to be under control in the case of early fire compared to middle-season and late fires. Knowing better fire parameters becomes an important goal to be reached in order to well address fire issues in the country. In tropical context, the prevention of wildfires and the control of utilitarian fires depend on a better comprehension of fire movement. Fire control remains important in targeting a sustainable management of forests ecosystems and for the sake of populations' well-being.

© 2015 International Formulae Group. All rights reserved.

Keywords: Intensity of fires, fire regimes, speed of propagation, combustible biomass.

INTRODUCTION

Au Togo, comme dans d'autres pays tropicaux, la mise à feu de la végétation est une pratique ancestrale (Leys, 2012) très courante en agriculture et en aménagement du territoire (Mutch et al., 2000). Le feu facilite le défrichage et l'emblavement des terres, stimule la repousse du fourrage pour le bétail et favorise le maintien des biotopes de plusieurs espèces floristiques et cynégétiques de grande importance alimentaire et culturelle. Il est ainsi établi que les feux de végétation itératifs modèlent la structure, le fonctionnement et la dynamique des écosystèmes forestiers (Diop, 2007 ; FAO, 2010 ; Sow et al., 2013) et ont longtemps été une pratique à vocation d'aménagement des terroirs et de rituel des sociétés traditionnelles (Kpeli, 2006 ; Bane-Ena, 2007).

Toutefois, le caractère utilitaire des feux n'occulte pas le fait qu'au-delà d'une certaine fréquence et intensité données, le feu échappe au contrôle humain et devient néfaste aux écosystèmes forestiers et au cadre de vie des populations. En effet, l'incendie de la biomasse végétale expose le sol à l'érosion (Vieira et al., 2015 ; Stoof et al., 2015) et augmente la charge atmosphérique en aérosols et en polluants et menace le cadre de vie, la santé et les infrastructures des populations humaines (Ndedy et al., 2011 ; Bowman et al., 2014). Les feux répétés empêchent la reconstitution du couvert végétal, rompent l'équilibre des écosystèmes en agissant négativement sur la disponibilité des ressources et services des savanes tropicales (Savado et al., 2008 ; Driscoll et al., 2010 ; Mbatha et Ward, 2010 ; Sawadogo, 2011). La situation est plus préoccupante au niveau des

aires protégées (AP) à vocation de conservation durable de la biodiversité (Dudley, 2008). En effet, la forte vulnérabilité au feu des AP est mise en exergue dans de nombreuses études et la problématique des impacts des feux sur la biodiversité des AP est une préoccupation à l'échelle des AP terrestres (Van Wilgen, 2008 ; Ruwanza et al., 2013 ; Aretano et al., 2015).

La prévention et la gestion des feux deviennent ainsi un défi à relever dans la lutte contre les changements climatiques, l'amélioration du cadre de vie, la réduction de la pauvreté et la recherche de la garantie de la sécurité civile. En effet, les feux essentiellement d'origine humaine peuvent contribuer à atteindre un objectif utilitaire (Sow et al., 2013). Mais le respect d'une période, d'une fréquence et d'une intensité données sont des préalables à assurer dans la pratique des feux utilitaires (Archibald, 2008). La prévention et la lutte contre les feux incontrôlés et la gestion des feux utilitaires sont tributaires de la bonne connaissance des paramètres d'éclosion et de propagation des feux. La prévision et le suivi de ces paramètres qui régulent le comportement et l'intensité des feux (Grishin et Filkov, 2011 ; Kane et al., 2015 ; Bianchini et al., 2015 ; Buscarino et al., 2015) sont des préalables à une meilleure prévention, planification et gestion des feux de végétation. A partir des données issues d'un suivi et d'une collecte exhaustive des données sur le feu, la modélisation et donc la prévision du comportement des feux facilitera la mise en place d'un système efficace de prévention et d'alerte précoce (PNUD-Togo, 2009 ; Brun et al., 2013).

C'est dans cet ordre d'idées que cette étude se propose de contribuer à la collecte des données qui faciliteront au niveau local, régional et national une meilleure compréhension du contexte d'éclosion et de propagation des feux de végétation. Spécifiquement, les paramètres de biomasse combustible, de vitesse de propagation et d'intensité de chaque régime du feu ont été analysés au niveau des savanes relativement mieux conservées dans leur état naturel dans trois aires protégées.

MATERIEL ET METHODES

Zone d'étude

La vulnérabilité spécifique des savanes des AP a conduit cette étude à se focaliser sur trois aires protégées jugées prioritaires au niveau national. Le choix de ces sites est en référence aux objectifs du programme de rationalisation du système d'AP du Togo (MERF, 2012) qui vise à améliorer la connaissance du fonctionnement des écosystèmes et à réduire les menaces pesant sur leur gestion durable. De surcroît, les trois AP couvrent les régions administratives vulnérables aux feux de végétation (MERF, 2010). La caractérisation des formations végétales au niveau de ces AP cibles du Togo (Adjonou, 2011) a permis de retenir les AP de Togodo (TGD), Abdoulaye (ABD) et Oti-Kéran-Mandouri (OKM) pour l'étude. Au niveau de l'AP Oti-Kéran-Mandouri, la partie Oti-Mandouri étant fortement anthropisée, l'étude s'est limitée à la partie Oti-Kéran.

OKM est un parc national, au Nord du Togo, entre 9°55' et 10°20' de latitude Nord et 0°25' et 1°00' de longitude Est (Figure 1). Il est créé en septembre 1950 puis érigé en parc national et réserve de chasse en 1971 par le décret n° 77-117 du 25 avril 1971. D'une superficie de 180.000 ha, il est situé dans la zone écologique 1. OKM est inscrit dans la zone soudanienne et jouit d'un climat tropical à saison sèche marquée (Arbonier, 2008). Ce climat est caractérisé par deux saisons, une saison pluvieuse de mai à septembre et une saison sèche de novembre à avril marquée par le harmattan, vent sec propice aux éclosions et propagations des feux. La température est

dans l'ensemble élevée et oscille entre 25 °C et 32 °C avec une pluviométrie annuelle entre 800 et 1000 mm. OKM abrite un projet de réhabilitation depuis 2011.

ABD est une réserve de faune, classée par le décret n° 391-51/EF du 7 juin 1951. Elle couvre une superficie de 30.000 ha et est localisée entre les latitudes 8°33' et 8°47' Nord et les longitudes 1°15' et 1°27' Est (Figure 1). ABD est située en zone écologique 3 et est contiguë à la forêt communautaire d'Alibi gérée par les organisations locales depuis 2009. Le climat est de type tropical semi-humide et monomodal à deux saisons contrastées avec une saison sèche de novembre à mars et une saison pluvieuse d'avril à octobre (Djiwa, 2008). La température moyenne mensuelle est de 26 °C avec une moyenne pluviométrique annuelle entre 1200 et 1300 mm avec un maximum de pluies en août. A ce jour, ABD n'abrite aucun projet de réhabilitation ou d'aménagement.

TGD est une AP située au Sud-Est du pays entre 1°20' et 1°40' de longitude Est et entre 6°40' et 6°50' de latitude Nord avec sa limite Est longeant la frontière béninoise (Figure 1). Elle est située en zone écologique 5 et jouit d'un climat de type équatorial de transition et inscrite dans la zone de transition guinéo-congolaise/soudanienne (Arbonier, 2008). La pluviométrie est de 1000 à 1300 mm en moyenne par an avec des températures mensuelles oscillant entre 25 °C et 29 °C (Atutonu, 2005). TGD couvre une superficie totale de 25.500 ha et est, en 2005, érigé en parc national et Togodo-Nord en zone de gestion des ressources naturelles. Un projet d'aménagement de la réserve de biosphère transfrontière du Delta du Mono y est en cours depuis 2014.

Les formations végétales étudiées sont celles potentiellement les plus exposées aux feux à savoir des formations à tapis graminéen et herbacé continu, critère qui exclut les formations forestières fermées au profit des savanes. Les savanes sont un faciès écosystémique commun aux trois AP et plus représenté en taux d'occupation de sol au niveau des trois AP (60%) et au niveau

national (> 57%) (Dudley, 2008 ; Adjonou, 2011).

Mise en place des parcelles expérimentales

Partant du fait que les feux brûlent différemment suivant les paramètres biotiques et abiotiques du milieu (aridité et niveau de dessèchement de la phytomasse et de l'air, la topographie, le vent, etc.), trois types de régimes de feux ont été expérimentalement définis. Les feux précoces (FP) en début de saison sèche entre le 1^{er} et le 20 décembre, les feux de mi-saison (FMS) du 21 décembre au 15 janvier et les feux tardifs (FT) du 16 janvier jusqu'à la fin de la saison sèche.

Le dispositif expérimental mis en place est constitué des parcelles de 30x80 m² par AP. Trois parcelles sont installées par régime de feu, soit 9 parcelles par AP. Les sites expérimentaux sont choisis dans une logique de distribution représentative de toutes les catégories de savanes identifiées dans les AP (boisées/arborées et arbustives). Ce dispositif d'enregistrement des paramètres du feu est répété sur trois saisons de feux (2011-2012 ; 2012-2013 et 2013-2014) sur les mêmes sites. L'ensemble du dispositif compte ainsi 27 parcelles par AP pour les trois saisons, soit l'équivalent de 81 parcelles pour l'ensemble des trois AP étudiées. Chaque parcelle est délimitée à l'aide d'un topofil. L'aménagement des parcelles a consisté en l'ouverture des layons pare-feu de 10 m de largeur sur tout le périmètre des quatre côtés pour circonscrire la propagation du feu strictement à la parcelle expérimentale. Pour minimiser les biais inductibles par les facteurs topographiques, les escarpements et les galeries forestières sont exclus des sites à retenir pour l'expérimentation.

Evaluation de la biomasse combustible ponctuelle

Les placettes de 1x1 m² ont été mises en place au niveau des parcelles de 30x80 m². Ces placettes sont destinées au prélèvement et à l'évaluation de la biomasse herbacée. La biomasse est prélevée en méthode radiale et au centre de la parcelle, soit 5 placettes (a, b, c, d, e) par parcelle (Figure 2A). La biomasse

est pesée à l'aide d'une balance sensible (Figure 2B) et exprimée en masse par unité de surface (g/m²).

Mise à feu et enregistrement de la vitesse de propagation

Le feu expérimental est allumé en période de vent calme pour éviter l'influence de la vitesse du vent. Les parcelles d'une aire protégée traitées au même régime de feu sont brûlées simultanément. Pour éviter l'influence de la rosée sur la combustion des herbacées, le feu expérimental est allumé entre 14 et 17 heures. En absence de thermocouple automatique (Quintano et al., 2015), un dispositif de 8 piquets séparés de 10 m sur les lesquels sont suspendues des feuilles de papiers blancs est installé—sur la longueur médiane de la parcelle (Figure 3) selon la méthode proposée par N'dri et al. (2011).

Le chronomètre est déclenché à la mise à feu et enregistre le temps mis par le feu pour parcourir toute la longueur de la parcelle. Après synchronisation des chronomètres et l'installation des observateurs, chaque témoin surveille un piquet et arrête son chronomètre dès que le papier suspendu à son piquet brûle.

Traitement des données

L'intensité (I) est déterminée par calcul selon la formule de Byram (1959) : $I = H \cdot w \cdot R$. I est exprimée en kilowatt par mètre (kW/m), H est une constante en KJ/Kg, w en Kg/m² et R en m/s.

- H représente la chaleur de combustion de l'herbe estimée à 18700 KJ/Kg (Alexander, 1982) ;
- w la quantité de combustible, elle représente la biomasse combustible prélevée sur les placettes de 1x1 m² ;
- R la vitesse de propagation du feu expérimental enregistrée.

L'analyse des données a été effectuée avec le logiciel Xlstat version 2008 pour les calculs et la confection des graphes et le logiciel R pour les tests de Student et d'ANOVA simple ou multiple. (Seuil de significativité < 0.05 ; Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1).

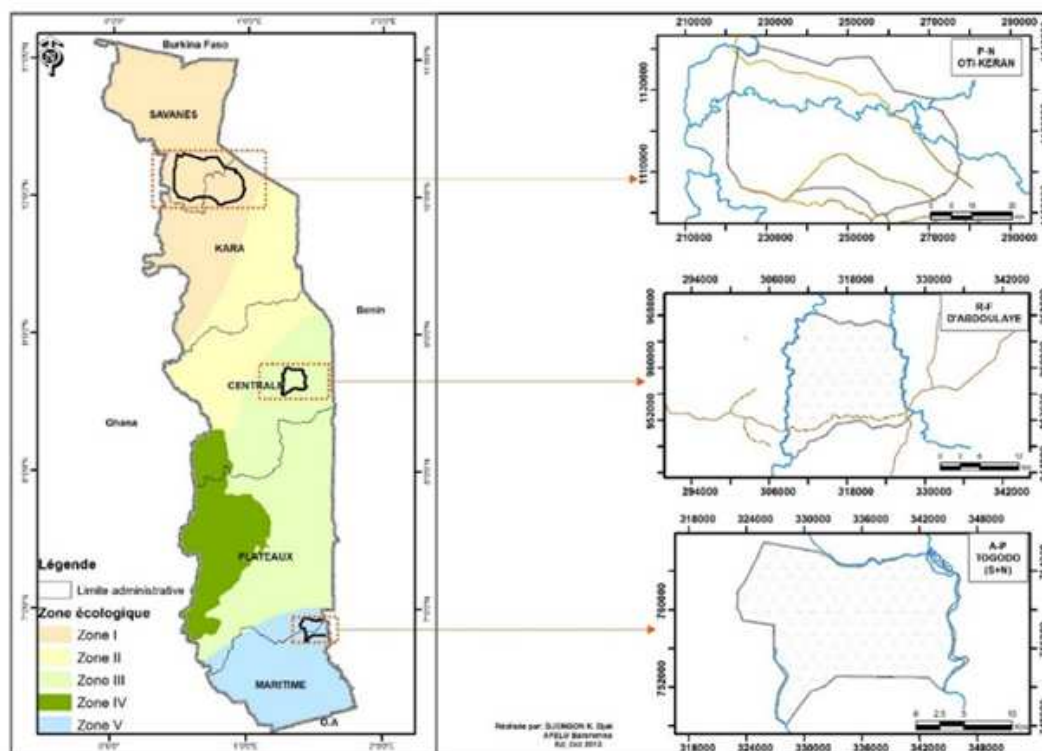


Figure 1: Localisation des trois AP étudiées.

RESULTATS

Biomasse herbacée combustible

La biomasse combustible est de l'ordre de $0,802 \pm 0,021$ kg/m² au niveau d'OKM en début de saison sèche et tourne autour de $0,789 \pm 0,019$ kg/m² en fin de sécheresse. Par contre, au niveau d'ABD, la biomasse par unité de surface varie peu au cours des différentes phases de la saison sèche et oscille entre $1,127 \pm 0,127$ et $1,209 \pm 0,027$ kg/m². Dans TGD la biomasse herbacée est relativement plus importante que dans les deux premières AP et tourne durant toute la saison sèche autour de $1,447 \pm 0,060$ kg/m² (Tableau 1).

Ainsi, la différence de biomasse combustible est significative d'une AP à une autre ($p < 2.2e-16$) mettant en exergue un effet de site. Cette différence n'est pas significative ($p = 0.9729$) au cours des différentes phases de la saison sèche ; le régime des feux a une

influence négligeable sur la biomasse herbacée combustible.

Vitesse de propagation des feux par AP et par régime de feu

Outre la biomasse qui est un paramètre biotique influençant le comportement du feu, la vitesse de propagation n'est pas significativement différente d'un site à un autre ($p = 0.4025$) mais significativement différente d'un régime de feu à un autre ($p < 3.519e-09$). Toutefois, en analysant la vitesse par spécificité tropicale, il est relevé qu'elle varie significativement du contexte guinéen au contexte soudanien ($p < 2.2e-16$). Globalement, la vitesse de propagation des feux au niveau des savanes des trois AP oscille entre 7,9 et 12,1 cm/s et augmente avec la durée de la saison sèche donc avec le régime de feu au niveau des trois AP. Plus le feu est tardif, plus sa vitesse de propagation

augmente. La vitesse augmente aussi en allant du Nord (OKM) au Sud du pays (TGD) donc de la zone soudanienne vers la zone guinéenne (Tableau 2).

Dans un contexte expérimental de vent à une vitesse moyenne de 15 à 20 km/h au niveau des zones d'étude (DGMN, 2012), la vitesse de propagation des feux de mi-saison est plus élevée au niveau d'ABD et faible dans OKM et TGD. Les vitesses de propagation des feux tardifs présentent des allures relativement élevées au niveau des trois AP que l'allure présentée pendant les feux précoces et de mi-saison.

Evolution de l'intensité du feu

L'intensité du feu diffère d'un régime de feu à un autre et d'une AP à une autre. L'intensité de tous les types de feu est comprise entre 1184 et 3207 kW/m. Durant toute la saison sèche, l'intensité des feux demeure relativement faible au niveau d'OKM et plus élevée au niveau de TGD. L'intensité est significativement différente d'un régime de feu à un autre ($p = 0.0153$)

mais la différence est négligeable entre les feux tardifs et précoces. Seuls les feux précoces se distinguent des deux derniers en présentant l'intensité la plus faible au niveau de chaque AP (Figure 4). L'analyse par l'ANOVA multiple pour les deux facteurs (AP et régime de feu) montre que les facteurs AP, régime et leur combinaison ont un effet significatif sur les variables étudiées. Le site (AP) influence ainsi la vitesse de propagation du feu et par déduction sur l'intensité du feu. Par contre, l'effet de site influe peu sur la biomasse combustible.

Cette situation peut s'expliquer par la différence potentielle de la teneur en eau de la biomasse pendant l'avancée de la saison sèche qui est, en début d'éclosion du feu et de combustion de la biomasse, supprimée par la pyrolyse. Ainsi, la biomasse exposée au feu se comporterait de la même manière d'un régime de feu à un autre. Par contre, l'avancée de la saison sèche, marquée par les alizées du Nord-Est (vents de Harmattan chauds et sec) accentue la vitesse de propagation des feux et par ricochet l'intensité des feux.

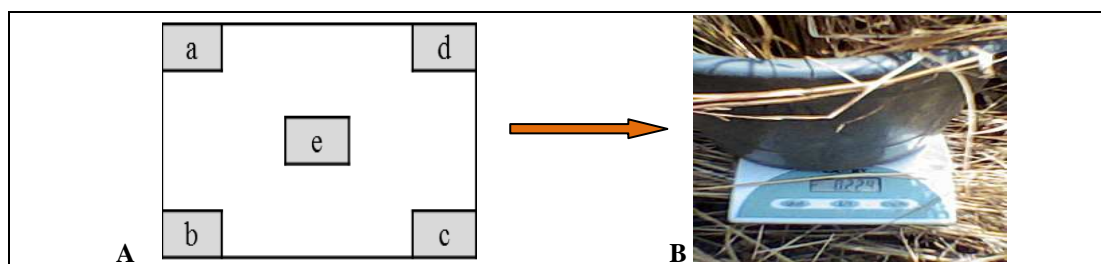


Figure 2: Protocole de prélèvement et de pesée de la biomasse.

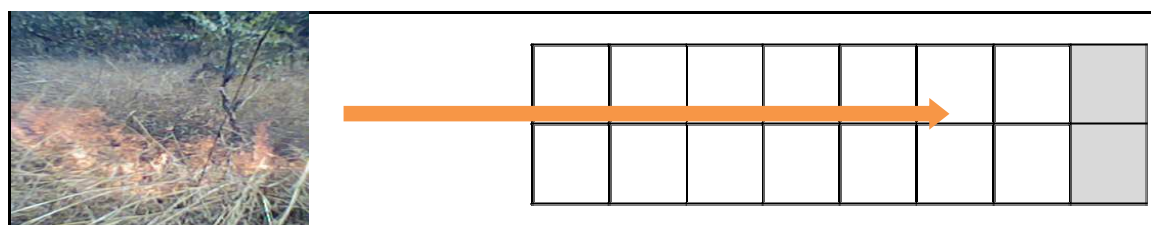


Figure 3: Mise à feu expérimental et enregistrement des paramètres.

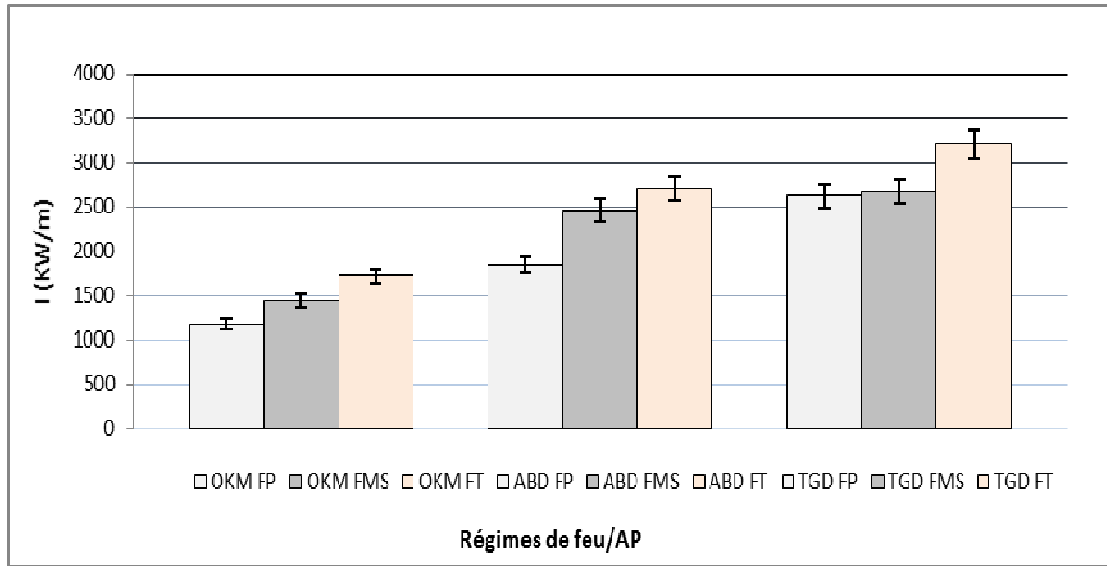


Figure 4: Evolution de l'intensité du feu par type de feu et par AP. OKM: Parc Oti-Kéran-Mandouri, ABD: réserve de faune d'Abdoulaye, TGD: réserve naturelle de Togodo, FP: feu précoce, FMS: feu de mi-saison, FT: feu tardif. Response Intensity: feu_TGD\$Type 2 0.00184676 0.00092338 6.6116 0.03041 * feu_OKM\$Type 2 0.00128121 0.00064061 90.356 3.318e-05 *** feu_ABD\$Type 2 0.00086956 0.00043478 34.938 0.0004945 ***

Tableau 1: Biomasse combustible par AP et par type de feu.

AP	Saisons de feu			Moyenne	Régimes de feu
	S 1	S 2	S 3		
OKM	0,782	0,824	0,799	0,802±0,021	Feux précoces
ABD	1,132	1,251	0,998	1,127±0,127	
TGD	1,345	1,407	1,549	1,434±0,105	
OKM	0,803	0,785	0,809	0,799±0,012	Feux de mi- saison
ABD	1,179	1,231	1,217	1,209±0,027	
TGD	1,501	1,383	1,457	1,447±0,060	
OKM	0,807	0,791	0,769	0,789±0,019	Feux tardifs
ABD	1,215	1,177	1,199	1,197±0,019	
TGD	1,394	1,389	1,541	1,441±0,086	

OKM: Parc Oti-Kéran-Mandouri, ABD: réserve de faune d'Abdoulaye, TGD: réserve naturelle de Togodo, AP: aire protégée, S1: saison 1, S2: saison 2, S3: saison 3. Response Biomasse : Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F) : feu_OKM\$Type 2 0.00026756 0.00013378 0.4153 0.6778 feu_ABD\$Type 2 0.0033593 0.00167965 21.829 0.001764 ** feu_TGD\$Type 2 0.000269 0.0001343 0.0184 0.9819

Tableau 2: Vitesse de propagation des feux par AP et par type de feu.

AP	Saisons de feux			Moyenne	Régimes de feu
	S 1	S 2	S 3		
OKM	0,082	0,077	0,077	0,079±0,003	Feux précoces
ABD	0,092	0,087	0,084	0,088±0,004	
TGD	0,095	0,101	0,098	0,098±0,003	
OKM	0,102	0,094	0,095	0,097±0,004	Feux de mi- saison
ABD	0,107	0,108	0,112	0,109±0,003	
TGD	0,095	0,099	0,103	0,099±0,004	
OKM	0,112	0,118	0,121	0,117±0,005	Feux tardifs
ABD	0,121	0,118	0,124	0,121±0,003	
TGD	0,116	0,119	0,123	0,119±0,004	

OKM: Parc Oti-Kéran-Mandouri, ABD: réserve de faune d'Abdoulaye, TGD: réserve naturelle de Togodo, AP: aire protégée, S1: saison 1, S2: saison 2, S3: saison 3. Response Vitesse : Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F) : feu_OKM\$Type 2 0.00220556 0.00110278 68.448 7.403e-05 *** feu_ABD\$Type 2 0.00171022 0.00085511 79.34 4.836e-05 *** feu_TGD\$Type 2 0.00086956 0.00043478 34.938 0.0004945 ***

DISCUSSION

La vitesse de propagation du feu est significativement influencée par le régime de feu mais la quantité de biomasse herbacée n'est significativement influencée que par l'effet de site (l'AP ou la zone écologique). Ces résultats peuvent être expliqués dans une certaine mesure par la variation des conditions écologiques d'un régime de feu à un autre qui influence la vitesse de propagation des feux et des paramètres édapho-climatiques variables d'une AP à une autre (effet de site). L'intensité du feu étant facteur de la vitesse de propagation du feu et de la biomasse résiduelle, elle subit faiblement l'influence induite par le régime de feu sur la vitesse croisée avec la biomasse qui ne varie pas significativement avec le régime de feu.

Il s'en dégage que si le régime de feu a un effet sur l'intensité (effet différent d'une AP à l'autre) et non sur la biomasse, il est de toute évidence que cette intensité soit plus dépendante de la vitesse si l'on considère les trois AP suivant le régime de feu. Ainsi, l'intensité du feu peut être tributaire de sa vitesse de propagation comme de la biomasse

combustible ou des deux paramètres combinés.

Quant à l'influence du régime de feu sur l'intensité du feu, elle est nettement notée au niveau des trois AP étudiées, plus le feu est tardif, plus son intensité augmente. Les trois régimes de feu se distinguent dans l'analyse de leur intensité, les feux de mi-saison se comportant comme les feux tardifs et ces deux derniers totalement différents des feux précoces.

Des constats similaires avaient été établis par N'dri et al. (2011) dans les savanes pré forestières de Lamto en RCI, à savoir que l'intensité du feu (1673 à 2966 KW/m) varie effectivement avec la quantité de combustible végétal et le régime de feu mais que l'intensité moyenne du feu de mi- saison n'était pas significativement différente de celle du feu tardif et que la vitesse de propagation oscille autour de 9 cm/s. Dans ce même cas, les feux de mi- saison se comportent presque comme les feux tardifs, les feux précoces s'en distinguant nettement par la faiblesse de leur intensité. Les niveaux d'intensité obtenus classent les trois AP étudiées dans les catégories supérieures 4 et 5 des feux en

référence à l'échelle d'Ichoku et al. (2008) qui ont étudié la puissance radiative des feux (FRP) à partir des données MODIS de faible résolution. Ces niveaux supérieurs des feux dans les AP du Togo confirment le classement des feux de la zone Afrique tropicale subsaharienne dans les 1% des feux mondiaux de catégorie 3 à 5.

Les feux de mi-saison présenteraient presque les mêmes impacts que les feux tardifs sur l'écosystème, d'où la distinction simplifiée de deux régimes de feu (FP et FT). Les paramètres écologiques qui avaient jadis conduit à distinguer clairement les FMS des FT et des FP seraient bouleversés par le renforcement des paramètres d'éclosion et de propagation des feux dû à la période sèche de plus en plus longue et intense, à l'augmentation de la température globale et aux dérèglements pluviométriques (Shimelmitz et al., 2014 ; Kane et al., 2015). Cette situation explique le fait que de plus en plus les feux de mi-saison se confondent aux feux tardifs. L'intensité demeure un paramètre valable d'étude et de caractérisation du comportement du feu qui fournit une base quantitative pour la description du feu et qui sert de critère d'évaluation de l'impact du feu sur les écosystèmes forestiers (Dosso et al., 2011 ; N'dri et al., 2011).

L'analyse de Daisuke et al. (2014) relève que pour les feux au niveau subcanopée des écosystèmes forestiers, la vitesse de propagation du feu se situe entre 2 et 4 m/s avec des pointes atteignant 5,8 m/s pour des intensités de feu comprises entre 1200 et 2500 kW/m. Dans ce contexte, les températures avoisinent 100 °C au niveau de la canopée. Les travaux de Griffiths et al. (2015) ont montré que la fréquence des feux a plus d'impacts sur la biodiversité que l'intensité du feu et l'étendue de la superficie brûlée. Ainsi, les feux itératifs qui pratiquement surviennent chaque année sur les mêmes parcelles (parcours de feu) sont plus

dommageables aux ressources et à la diversité biologique et à la qualité des sols. Ces travaux permettent de faire des analyses complémentaires à la présente étude, à savoir la forte vitesse de propagation verticale des feux par rapport à la propagation horizontale et l'incidence couplée de la fréquence des feux par rapport à leur intensité et propagation.

Pour Schwartz et al. (2015), le degré de sécheresse est le paramètre clé de la prévision de l'occurrence de l'intensité des feux, toutefois, la nature de l'occupation de sol ainsi que la gestion impactent aussi le comportement du feu dans son éclosion et sa propagation. Le comportement du feu est de surcroît un paramètre important dans la conception et la réalisation des pare-feu et coupe-feu en aménagement et protection des enjeux vulnérables aux feux de végétation. En effet, Kaiss et al. (2007) ont montré qu'un pare-feu n'est efficace que si sa largeur est grande devant la longueur caractéristique d'impact du feu et la hauteur des flammes et que, si le feu engendre des brandons, l'effet d'une coupure sur le ralentissement du front de flamme est à calibrer pour les différentes caractéristiques des sautes de feu. Pour Porterie et al. (2005) sur l'action des brandons sur la propagation d'un feu de végétation en milieux homogènes ou hétérogènes, ont démontré que la distance d'émission des brandons obéit à une loi de distribution exponentielle et décroissante. En milieu homogène, l'influence des brandons est d'autant plus grande que la longueur d'impact du feu est faible et que la distance caractéristique d'émission est grande. Des variations brutales de la vitesse de propagation apparaissent et des oscillations temporelles de la surface en feu peuvent se manifester. En milieu hétérogène, l'action des brandons s'atténue lorsque le degré d'hétérogénéité et la distance d'émission augmentent. En somme, l'émission des

brandons et les autres caractéristiques du feu ainsi que la nature et la structure de la couverture végétale du sol impactent sur la propagation du feu.

En conséquence, la propagation de l'incendie décape la couverture végétale et expose de ce fait le sol à l'érosion. A travers les travaux de Vieira et al. (2015), il est noté un impact significatif des feux sur le taux de ruissellement des eaux au niveau des superficies incendiées et que les différentes intensités du feu ne présentent une différence significative sur la texture du sol et sur le taux d'érosion. Les résultats obtenus par Stoof et al. (2015) ont montré que malgré la haute intensité de feu, les propriétés physiques du sol sont restées inchangées. Pourtant, le coefficient de ruissellement a augmenté ainsi que le risque d'érosion. Ainsi, la modification de la couverture du sol pendant et après le feu a eu plus d'effets sur la capacité de rétention d'eau du sol (texture et qualité) plutôt que sur la structure du sol. La différence de texture et de couverture du sol, couplée au contexte topographique expliquent alors l'augmentation de l'érosion des sols après les feux. Ces données relèvent la nécessité d'intégrer plusieurs aspects du comportement du feu dans la conception et la mise en œuvre des techniques de prévention et de lutte contre les feux.

En somme, il est noté à l'échelle locale une influence majeure de la topographie sur le régime du feu confirmée par les travaux de Bassett et al. (2015). A une même période et dans un même type d'écosystème, les caractéristiques des feux ne sont pas les mêmes en allant d'une plaine aux escarpements à affleurements rocheux. La biomasse se dessèche précocement sur les hauteurs et le feu y est plus intense alors qu'à la même période, le feu est encore léger au niveau des bas-fonds. En plus, l'exposition, la pente et le vent se complexifient avec la topographie pour imprimer une caractéristique

spécifique au feu. L'influence des paramètres locaux sur le comportement du feu et sur la dynamique des interfaces savane/forêt a été relevée par Kathryn et al. (2014). Ces derniers ont noté que pour la réduction des biais induits par les spécificités locales dans l'enregistrement des données, la mise à feu dans les différents types de savanes d'une AP doit se réaliser entre 15 h et 18 h, quand le taux d'humidité relative oscille entre 63 et 83%. Mais, durant la présente étude, au niveau des trois AP au Togo, l'humidité relative était autour de 40 à 50% (DGMM, 2012) et le vent était assez calme à partir de 14 h et la luminosité était suffisante jusqu'à 17 h.

Il est toutefois noté le besoin de mieux caractériser les paramètres écologiques des sites d'étude au niveau du sol, de la toposéquence, de l'atmosphère (Kane et al., 2015) en complément de la caractérisation de la biomasse combustible et du type d'écosystème, le taux de couverture ligneuse, la pente et surtout l'exposition au vent (Kodandapani et al., 2008 ; Sanjuan, 2014) pour mieux appréhender le comportement contextuel des feux de végétation. Même si le comportement du feu est intrinsèquement lié au contexte écologique, la gestion préventive par la pratique des feux précoces de faible intensité est globalement la technique majeure de prévention et de réduction des feux tardifs difficilement contrôlables et aux conséquences imprévisibles (Archibald, 2008; Collins et al., 2013 ; Sow et al., 2013). Dans une approche plus exhaustive, Riggs et al. (2015) ont abordé plusieurs autres caractéristiques des feux de surface dont la hauteur des flammes, la réparation de la chaleur dans le sol ainsi que le temps de retour de feu. Ainsi, ils ont relevé qu'à long terme, les paramètres abiotiques (climat, feu) agissent significativement sur le dynamisme des écosystèmes que les paramètres biotiques. Par contre, les paramètres biotiques

influencent la fréquence des feux en agissant sur la durée du temps de retour des feux.

Toutefois, une meilleure caractérisation croisée des écosystèmes de savane et de forêts à partir des ligneux, des herbacées, de la topographie et du type de sol pour toutes AP du Togo permettra de mieux comprendre le comportement du feu dans les spécificités locales et de mieux planifier l'aménagement et la gestion durable et participative de ces AP.

Conclusion

Les caractéristiques physiques du feu étudiées varient selon le régime du feu. L'intensité des feux augmente avec la vitesse de propagation et/ou avec la quantité de biomasse combustible. Plus le feu est tardif, plus son intensité est élevée. Dans les savanes où la vitesse de propagation est élevée, la prévention et la lutte précoce contre les feux naissants sont préconisées. Pour les écosystèmes où la biomasse combustible est abondante la prévention et la valorisation du combustible sont les plus indiquées. En somme, la prévention, l'alerte et la lutte précoce ainsi que la valorisation du combustible sont les grandes pistes de réduction de l'occurrence des feux incontrôlés. La prévention se base sur le suivi des paramètres d'éclosion et de propagation des feux. A partir des données issues d'un suivi et d'une collecte exhaustive des données sur le feu, la modélisation et donc la prévision du comportement des feux permettra de mettre en place un système efficace de prévention et d'alerte précoce qui découle d'une remontée rapide de l'information et d'une organisation coordonnée des acteurs de la base communautaire jusqu'aux pôles opérationnels et décisionnels. Cette étude met en exergue la nécessité de mener une étude globale de caractérisation des écosystèmes de savane et de forêts à partir des ligneux, des herbacées, de la topographie et du type de sol

pour chaque aire protégée pour une meilleure planification, prévention et gestion des feux. Cette approche permettra de mieux étudier le comportement du feu dans les spécificités des écosystèmes.

CONFLITS D'INTERETS

Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêt lié à cet article.

CONTRIBUTIONS DES AUTEURS

L'auteur principal BA a conduit l'étude, collecté, traité les données et a rédigé. Le co-auteur KK a orienté et supervisé les travaux. Il a également corrigé et finalisé le manuscrit.

REMERCIEMENTS

Nos sincères remerciements aux collègues du Groupe de Réflexion sur le Développement Durable (GR2D) du Laboratoire de Botanique et d'Ecologie Végétale de l'Université de Lomé au Togo, pour leur critique constructive et apports multidisciplinaires et interinstitutionnelles.

REFERENCES

- Adjonou K. 2011. Structure et indicateurs biologiques de gestion durable des reliques de forêts sèches du Togo. Thèse de doctorat, Laboratoire de Botanique et Ecologie végétale, Université de Lomé, p. 185.
- Arbonnier M. 2008. *Arbres, Arbustes et Lianes des Zones Sèches d'Afrique de l'Ouest* (3^e edn). MNHN: Paris; CIRAD : Montpellier; 574.
- Archibald S. 2008. Where there is a spark is there fire? The importance of ignitions in determining fire regimes in southern Africa. *South African Journal of Botany*, **74**(2): 360-379. DOI: 10.1016/j.sajb.2008.01.028
- Aretano R, Teodoro S, Petrosillo I, De Marco A, Pasimeni MR, Zurlini G. 2015.

- Mapping ecological vulnerability to fire for effective conservation management of natural protected areas. *Ecological Modelling*, **295**: 163-175. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2014.09.017
- Atutonu A. 2005. Contribution à la gestion durable du Parc national de Togodo-Sud (Togo). Mémoire de DESS, Université de Kinshasa, p. 73.
- Bane-Ena W. 2007. Pratiques culturelles exogènes et menace de la biodiversité en Afrique subsaharienne : cas du Togo. Mémoire de DEA de Sociologie, Université de Lomé, Togo, p. 67.
- Bassett M, Chia EK, Leonard SWJ, Nimmo DG, Holland GJ, Ritchie EG, Clarke MF, Bennett AF. 2015. The effects of topographic variation and the fire regime on coarse woody debris: insights from a large wildfire. *Forest Ecology and Management*, **340**(15): 126–134. DOI: 10.1016/j.foreco.2014.12.028
- Bianchini G, Caymes-Scutari P, Méndez-Garabetti M. 2015. Evolutionary-Statistical System: A parallel method for improving forest fire spread prediction. *Journal of Computational Science*, **6**(15): 58-66. DOI: 10.1016/j.jocs.2014.12.001
- Bowman MJS, Brett PM, Grant JW, Cochrane MA. 2014. Pyrogeographic models, feedbacks and the future of global fire regimes. *Global Ecology and Biogeography*, **23**(7): 102-114. DOI: 10.1111/geb.12180
- Brun C, Margalef T, Cortes A. 2013. Coupling Diagnostic and Prognostic Models to a Dynamic Data Driven Forest Fire Spread Prediction System. *Procedia Computer Science*, **18**: 1851-1860. DOI: 10.1016/j.procs.2013.05.354
- Buscarino A, Famoso C, Luigi F, Mattia F, Xibilia MG. 2015. Complexity in forest fires: from simple experiments to nonlinear networked models. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, **22**(1–3): 660-675. DOI:10.1016/j.cnsns.2014.10.007
- Stoof CR, Ferreira AJD, Mol W, Van den Berg J, De Kort A, Drooger S, Slingerland EC, Erik C, Mansholt A, Ayolt U, Ferreira CSS, Carla SS, Ritsema CJ. 2015. Soil surface changes increase runoff and erosion risk after a low-moderate severity fire. *Geoderma*, **239**(240): 58–67 DOI: 10.1016/j.geoderma.2014.09.020
- Collins Ross D, de Neufville R, Joao C, Tiago O, Abílio PP. 2013. Forest fire management to avoid unintended consequences: a case study of Portugal using system dynamics. *Journal of Environmental Management*, **130**(30): 1-9. DOI: 10.1016/j.jenvman.2013.08.033
- Daisuke S, Tara M, Craig B, Harold T, Mickler R. 2014. Wind and plume thermodynamic structures during low-intensity subcanopy fires. *Agricultural and Forest Meteorology*, **198**(199): 53-61. DOI: 10.1016/j.agrformet.2014.07.006
- DGMN (Direction générale de la météorologie nationale). 2014. Extrait des données ombrothermiques des stations de Mango, Tablibo et Tchamba de 2000 à 2014. Archives DGDM, Lomé, Togo.
- Diop AT. 2007. Dynamique écologique et évolution des pratiques dans la zone sylvopastorale du Sénégal : perspectives pour un développement durable. Archives de l'UCAD, Sénégal ; 190.
- Djiwa O. 2008. Dynamique forestière et diagnostic de la Forêt Classée d'Abdoulaye au Togo. Mémoire de

- Master, Agro ParisTech, ENGREF Montpellier, p. 55.
- Dosso K, Yéo K, Konaté S, Linsenmair KE (2012) Importance of protected areas for biodiversity conservation in central Côte d'Ivoire: Comparison of termite assemblages between two neighboring areas under differing levels of disturbance. *Journal of Insect Science* **12**(131): 67-79. Available online: www.insectscience.org/12.131
- Driscoll DA, David B, Lindenmayer A, Bennett F, Bode M, Ross A, Bradstock GJ, Cary M, Clarke F, Dexter N, Rod F, Gordon F, Malcolm G, Stewart J, Geoff K, Keith DA, MacGregor C, Russell-Smith J, Salt D, James EM, Watson, Richard J, Alan YW. 2010. Fire management for biodiversity conservation: Key research questions and our capacity to answer them. *Biological Conservation*, **143**(9): 1928-1939. DOI: 10.1016/j.biocon.2010.05.026
- Dudley N. 2008. *Lignes Directrices pour l'Application des Catégories de Gestion aux Aires Protégées*. UICN (Union internationale pour la conservation de la nature): Gland, Suisse ; 96.
- FAO (Food and agriculture organization, Forestry department. 2010. *Global Forest Fire Assessment 2000-2010*. Working Paper 55, Rome, p. 495.
- Griffiths AD, Garnett ST, Brook BW. 2015. Fire frequency matters more than fire size: testing the pyrodiversity–biodiversity paradigm for at-risk small mammals in an Australian tropical savanna. *Biological Conservation*, **186**: 337–346. DOI: 10.1016/j.biocon.2015.03.021
- Grishin AM, Filkov AI. 2011. A deterministic-probabilistic system for predicting forest fire hazard. *Fire Safety Journal*, **46**(1–2): 56–62 DOI: 10.1016/j.firesaf.2010.09.002
- Ichoku C, Giglio L, Wooster MJ, Remer Lorraine A. 2008. Global characterization of biomass-burning patterns using satellite measurements of fire radiative energy. *Remote Sensing of Environment*, **112**(6): 2950–2962 DOI: 10.1016/j.rse.2008.02.009
- Kaiss A, Zekri L, Zekri N, Porterie B, Clerc LP, Picard C. 2007. Efficacité des coupures de combustible dans la prévention des feux de forêts. *Comptes Rendus Physique*, **8**(4) : 462-468. DOI:10.1016/j.crhy.2007.02.002
- Kane Van R, James A, Lutz C, Cansler A, Povak NA, Derek JC, Douglas FS, Kane JT, Malcolm P. 2015. Water balance and topography predict fire and forest structure patterns. *Forest Ecology and Management*, **338**(15): 1–13. DOI: 10.1016/j.foreco.2014.10.038
- Kathryn J, Korte L, Palla F, Gretchen W, Lee JT, White K, Abernethy A. 2014. Fire management in a changing landscape: A case study from Lopé National Park, Gabon. *PARKS*, **20**: 1-14. On line http://cmsdata.iucn.org/downloads/parks_20_1.pdf
- Kodandapani N, Cochrane MA, Sukumar R. 2008. A comparative analysis of spatial, temporal, and ecological characteristics of forest fires in seasonally dry tropical ecosystems in the Western Ghats, India. *Forest Ecology and Management*, **256**(4): 607-617. DOI: 10.1016/j.foreco.2008.05.006
- Kpeli PM. 2006. Impact des feux de brousse sur la biodiversité des bois sacrés en pays Kabiye (Nord-Togo). Mémoire de fin d'études, INFA de Tové, p. 40.
- Leys B. 2012. Structure des communautés et biodiversité post incendie en forêts méditerranéennes : une approche paléo

- écologique. Thèse de doctorat, EPHE, p. 169.
- Mbatha KR, Ward D. 2010. The effects of grazing, fire, nitrogen and water availability on nutritional quality of grass in semi-arid savanna, South Africa. *Journal of Arid Environments*, **74**(10): 1294–1301. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2010.06.004
- MERF (Ministère de l'environnement et des ressources forestières). 2010. Stratégie nationale de gestion des feux de végétation du Togo. Programme de Renforcement de Capacité pour la Gestion de l'Environnement (PRCGE), p. 133.
- MERF (Ministère de l'environnement et des ressources forestières). 2012. Programme de réhabilitation des aires protégées du Togo. MERF, DFC, p. 127.
- Mutch RW, Lee B, Perkins JH. 2000. *Politiques Nationales Ayant une Incidence sur les Incendies de Forêt dans la Région Amériques et Caraïbes*. Fire Management Applications, Montana, USA, Service canadien des forêts et Service des forêts du Département de l'agriculture des Etats-Unis (USDA) : Yreka, Californie ; 57.
- Ndedy DH, Saintobert H, Triquet J. 2011. Projet d'évaluation du risque sanitaire des feux de biomasse. Ecole des hautes Etudes en Santé Publique (EHESP), Génie sanitaire, Toulon, France, p. 70.
- N'dri AB. 2011. Interaction termite-feu et dynamique de la végétation en savane (LAMTO, Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat, Université Paris 6, cotutelle avec l'Université d'Abobo-Adjamé, p. 175.
- N'dri AB, Gignoux J, Dembele D, Konate S. 2011. Impact du régime du feu sur la dynamique de la végétation en savane humide d'Afrique de l'Ouest (Lamto, Côte d'Ivoire). Atelier RIPIECISA Cotonou, Bénin.
- PNUD (Programme des nations unies pour le développement, Togo). 2009. Environnement et changement climatique - Gestion des catastrophes - Bulletin d'information N°005, Extrait du rapport annuel PNUD, 11 pages.
- Porterie B, Zekri N, Clerc JP, Loraud JC. 2005. Influence des brandons sur la propagation d'un feu de forêt. *Comptes Rendus Physique*, **6**(10) : 1153-1160. DOI: 10.1016/j.crhy.2005.11.013
- Quintano CA, Fernandez M, Calvo L, Marcos E, Valbuena L. 2015. Land surface temperature as potential indicator of burn severity in forest Mediterranean ecosystems. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **36**(15): 1–12. DOI: 10.1016/j.jag.2014.10.015
- Riggs RA, Keane RE, Cimon N, Cook R, Holsinger L, Cook J, DelCurto T, Baggett L, Justice D, Powell D, Vavra M, Naylor B. 2015. Biomass and fire dynamics in a temperate forest-grassland mosaic: integrating multi-species herbivory, climate, and fire with the FireBGCv2/GrazeBGC system. *Ecological Modelling*, **296**(24): 57-78. Doi: 10.1016/J.Ecolmodel.2014.10.013
- Ruwanza S, Gaertner M, Esler KJ, Richardson DM. 2013. The effectiveness of active and passive restoration on recovery of indigenous vegetation in riparian zones in the Western Cape, South Africa: a preliminary assessment. *South African Journal of Botany*, **88**: 132-141. DOI: 10.1016/j.sajb.2013.06.022
- Sanjuan G, Brun C, Margalef T, Cortés A. 2014. Wind Field Uncertainty in Forest Fire Propagation Prediction. *Procedia Computer Science*, **29**: 1535-1545. DOI: 10.1016/j.procs.2014.05.139

- Savadogo P, Tiveau D, Sawadogo L, Tigabu M. 2008. Herbaceous species responses to long-term effects of prescribed fire, grazing and selective tree cutting in the savanna-woodlands of West Africa, *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, **10**(3): 179–195. DOI:10.1016/j.ppees.2008.03.002
- Sawadogo L. 2011. L'influence des feux sur la biodiversité des savanes ouest africaines. In *Atlas de la Biodiversité de l'Afrique de l'Ouest* tome III, BIOTA : Côte d'Ivoire; 72-73.
- Schwartz NB, Uriarte M, Gutiérrez-Vélez VH, Baethgen W, DeFries R, Fernandes K, Pinedo-Vasquez MA. 2015. Climate, landowner residency, and land cover predict local scale fire activity in the Western Amazon. *Global Environmental Change*, **31**(15): 144–153. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2015.01.009
- Shimelmütz R, Steven LK, Jelinek AJ, Avraham R, Amy EC, Weinstein-Evron M. 2014. "Fire at will": the emergence of habitual fire use 350,000 years ago. *Journal of Human Evolution*, **77**(14): 196–203. DOI: 10.1016/j.jhevol.2014.07.005
- Sow M, Hély C, Mbow C, Sambou B. 2013. Fuel and fire behaviour analysis for early-season prescribed fire planning in Sudanian and Sahelian savannas. *Journal of Arid Environments*, **89**: 84–93. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2012.09.007
- Van Wilgen BW. 2008. Fire management in South Africa's conservation areas: why bother? *South African Journal of Botany*, **74**(2): 359. DOI: 10.1016/j.sajb.2008.01.022
- Vieira DCS, Fernández C, Vega JA, Keizer JJ. 2015. Does soil burn severity affect the post-fire runoff and interrill erosion response? A review based on meta-analysis of field rainfall simulation data. *Journal of Hydrology*, **523**(15): 452–464. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.01.071