



Principaux indices de l'intensité du feu dans une savane Guinéenne d'Afrique de l'Ouest

Aya Brigitte N'DRI^{1*}, Madoussou FONGBE¹, Tionhonkélé Drissa SORO¹,
Jacques GIGNOUX², Mouhamadou KONE³, Kanvaly DOSSO¹, Julien Kouadio N'DRI¹,
N'golo Abdoulaye KONE¹ et Sébastien BAROT²

¹ UFR des Sciences de la Nature, Station d'Ecologie de Lamto/CRE, Pôle de Recherche Environnement et Développement Durable, Université Nangui Abrogoua, 02 BP 801 Abidjan 02, Côte d'Ivoire.

² IEES-Paris (CNRS, IRD, UPMC, INRA, UPEC, UP7),
UPMC, 4 places Jussieu, 75252 Paris cedex 05, France.

³ Unité de Formation et de Recherches en Sciences Biologiques,
Université Peleforo Gon Coulibaly, BP 1328 Korhogo, Côte d'Ivoire.

*Auteur correspondant ; E-mail: ndri.brigitte@yahoo.fr

REMERCIEMENTS

Nous remercions l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) d'avoir financé cette étude à travers le programme JEAI (Jeune Equipe Associée).

RESUME

La mesure directe de l'intensité du feu n'étant pas toujours possible car fastidieuse et coûteuse, les indices post-feu substituent celle-ci et permettent de mieux comprendre les caractéristiques du feu et son impact sur la végétation. Cette étude a été menée dans la réserve de Lamto (Côte d'Ivoire) dans le but d'identifier les indices post-feu qui sont de bons indicateurs de l'intensité du feu. Trois régimes de feu ont été expérimentés de 2013 à 2017: le feu précoce, le feu de mi-saison, et le feu tardif. L'intensité du feu a été déterminée durant chaque feu. Ensuite, les indices post-feux que sont : la hauteur des flammes, l'efficacité de combustion, le volume d'eau évaporée, et les fractions de cendre fine et grossière ont été mesurés, et la surface couverte par le feu estimée. La hauteur des flammes est le meilleur indicateur de l'intensité du feu. Plus le feu est intense plus la zone d'action des flammes est haute, et plus il est susceptible de réduire le recrutement des jeunes ligneux. Cette étude propose en savane Guinéenne un indice facile à mesurer, qui permettrait aux gestionnaires des aires protégées en savane de mieux évaluer l'intensité du feu et son impact sur la végétation.

© 2018 International Formulae Group. All rights reserved.

Mots clés : Hauteur des flammes, indices post-feu, intensité du feu, savane de Lamto, régime de feu.

Main indices of fire intensity in a Guinean savanna of West Africa

ABSTRACT

Since direct measurements of fire intensity are not always possible, post-fire indices are often used to substitute this measure to better understand fire behaviour and its impact on vegetation. This study was carried out in the Lamto reserve (Cote d'Ivoire) and aimed at identifying the post-fire indices that best reflect the

intensity of fire. These post-fire indices were evaluated according to fire regimes: early fire, mid-season fire, and late fire, from 2013 to 2017. Fire intensity was determined during each fire. Following fire, average flames height was measured, combustion efficiency, water evaporated, and fine and coarse ash fraction were quantified, and, the area of ground stratum which is consumed by fire was estimated. Flame height generally higher during mid-season and late fires is the best predictor of fire intensity. Flame height increased with fire intensity and higher flame could potentially reduce the recruitment of relatively higher young trees. We recommend the generalisation of flame height measurements, easier to do than intensity, in order to quickly produce large datasets that could help understand and predict fire behaviour, with the ultimate goal to improve fire management in West Africa.

© 2018 International Formulae Group. All rights reserved.

Keywords: Fire intensity, fire regime, flame height, Post-fire indices, Lamto savanna.

INTRODUCTION

Les savanes sont des écosystèmes naturels où coexistent une strate herbacée continue et une strate ligneuse plus ou moins discontinue et sont régulièrement rencontrées dans les zones tropicales (Hétier et López, 2005). Le maintien de la savane est déterminé en général par trois principaux facteurs que sont : la pluviométrie, l'herbivorie et le feu (Sankaran et al., 2005). Dans les zones Guinéenne d'Afrique de l'ouest, la pluviométrie annuelle est comprise entre 1000-1600 mm.an⁻¹ (L'Hôte et Mahé, 2012), et l'herbivorie est faible du fait du nombre réduit de grands mammifères (Fritz et al., 2002). L'existence des savanes y est largement dépendante du feu (Sankaran et al., 2005) qui constitue un élément clé de la dynamique des paysages de savane de ces zones. A ce titre, ils peuvent être considérés comme un véritable outil de gestion dont l'utilisation raisonnée permet de maintenir ou d'entretenir certains types de paysages (Savadogo et al., 2003). En savane Guinéenne, la pluviométrie favorise la production d'une biomasse importante (Gignoux et al., 2006). Les feux y sont généralement annuels (Frost and Robertson, 1985), de forte intensité (N'Dri et al., 2012), et permettent le maintien de la savane dans ces zones où la pluviométrie est favorable à l'installation de la forêt. Malgré l'importance des feux dans ces zones, rares sont les études qui se sont intéressées à mesurer l'intensité du feu en savane Guinéenne d'Afrique de l'Ouest. Pour cause, cette mesure est fastidieuse et coûteuse. Ce qui rend, par

conséquent, difficile la compréhension de son impact sur la végétation.

L'intensité du feu calculée généralement par les écologistes du feu en savane est indispensable à la compréhension et à l'interprétation de ses effets écologiques, notamment son impact sur la végétation (Smit et al., 2010 ; Werner, 2012). En effet, Smit et al. (2016) ont préconisé des feux de forte intensité pour réduire la densité des ligneux dans les savanes qui se boisent. La mesure directe de l'intensité du feu n'étant pas toujours possible, les impacts immédiats après le passage du feu, appelés indices post-feu sont souvent utilisés pour substituer cette mesure (Govender et al., 2006). Ceux-ci permettent généralement d'estimer l'intensité et/ou la sévérité du feu (Keeley, 2009 ; Smit et al., 2016). Ainsi, Kolaks et al. (2007), Alexander et Cruz (2012) et Rissi et al. (2017) ont utilisé la hauteur des flammes pour estimer l'intensité et la sévérité des feux. En effet, un feu de faible intensité induit selon ces auteurs des flammes moins hautes qui causent une faible mortalité des jeunes ligneux, contrairement à un feu intense. La surface couverte par le feu (Guiguindibaye et al., 2013), ainsi que l'efficacité de combustion (Savadogo et al., 2007 ; Guiguindibaye et al., 2013 ; Andela et al., 2016) ont également été utilisées pour évaluer son intensité. Le volume d'eau évaporé est également utilisé comme indice post-feu de son intensité et sa sévérité (Comm. Pers. Bond). Nous avons également utilisé dans le cadre de cette étude les proportions de fraction de cendre (fines et grossières) obtenues suite au feu comme indice post-feu de son intensité. Les études de

Miquelajauregui et al. (2016) attestent qu'il existe des relations empiriques entre l'intensité du feu et ses indices qui permettent de simuler la sévérité du feu, et ainsi comprendre son impact sur la structure et la dynamique de la végétation post-feu. Cependant, ces indices post-feu ont généralement été analysés dans des études séparées. Cette étude visait à analyser pour la première fois, différents indices post feu afin de proposer ceux qui sont de bons indicateurs de l'intensité du feu, dans la savane humide de Lamto.

MATERIEL ET METHODES

Présentation du milieu d'étude

L'étude a été menée dans la réserve de Lamto située à l'extrême sud du V baoulé dans la zone de transition entre la forêt dense semi-décidue et la savane Guinéenne humide. Elle s'étend sur une superficie de 2500 ha entre les latitudes 6° 13' à 6° 25' Nord et les longitudes 5° 01' à 4° 97' Ouest (Abbadie et al., 2006). Le climat est de type tropical humide caractérisé par une variabilité due à sa situation transitoire entre le régime équatorial à quatre (4) saisons et un régime tropical à deux saisons (Pagney, 1988). Les précipitations moyennes annuelles oscillent autour de 1200 mm avec une température moyenne annuelle de 27,8 ° C. La végétation de la réserve est une mosaïque forêt-savane composée de forêts galeries, des lambeaux de forêts denses semi-décidues et des savanes à rôniers (Menaut et César, 1979). La partie savane occupant 80% du couvert végétal est caractérisée par une association d'Andropogoneae (divers *Andropogon spp.* et *Hyparrhenia spp.*), de *Borassus aethiopicum* Mart. et des quatre principales espèces d'arbustes: *Bridelia ferruginea* Benth. (Phyllanthaceae), *Crossopteryx febrifuga* (Afzel. ex G. Don) Benth. (Rubiaceae), *Cussonia arborea* Hochst. ex A. Rich. (Araliaceae), et *Piliostigma thonningii* (Schum.) Milne-Redhead (Caesalpinaceae) (Menaut et César, 1979).

Dispositif expérimental

Cette étude a été réalisée sur trois blocs de 230 m × 120 m chacun. Chaque bloc a été

subdivisé en trois parcelles de 100 m x 50 m chacune. Les parcelles sont séparées les unes des autres par 30 m de pare-feu et chaque bloc entouré d'un pare-feu de 10 m régulièrement nettoyé afin de les protéger des feux accidentels. Sur chacune de ces parcelles, un régime de feu spécifique a été appliqué: le feu précoce (FP) au début de la saison sèche, entre le 15 et le 18 novembre; le feu de mi-saison (FM), au milieu de la saison sèche, 15-18 janvier ; et le feu tardif (FT), en fin de saison sèche, 15-18 mars. Avant cette expérimentation, toute la réserve était soumise au feu de mi-saison sèche depuis sa création en 1962. Quatre cycles de feu ont été appliqués sur chacune des parcelles de novembre 2013 à mars 2017.

Collectes des données

Détermination de l'intensité du feu

Le feu a été allumé par les feuilles de rônier dans le sens de la largeur des parcelles, dans la direction du vent. Tous les feux ont été appliqués entre 10 et 11 h du matin, afin de réduire la variabilité due au taux d'humidité des herbes.

L'intensité de chaque régime de feu a été calculée selon la formule de Byram (1959).

$$I (\text{kW m}^{-1}) = W H R$$

Pour ce dernier, l'intensité du feu (I) est la mesure de l'énergie libérée le long du front du feu et définie comme le produit de la masse du combustible (W) qui brûle dans la zone soumise au feu, de la vitesse de propagation des flammes (R) et du rendement de la chaleur (H). La valeur recommandée de H pour les feux de biomasse est de 16 890 kJ kg⁻¹ (Trollope, 1983).

La masse du combustible W (kg m⁻²) a été calculée en utilisant les valeurs de phytomasse prélevées dans 10 quadrats de 1 m² réparties sur chacune des parcelles (Savadogo et al., 2007). Quant à la vitesse de propagation des flammes R (m s⁻¹), elle a été déterminée en relevant le temps mis par les flammes pour passer d'un piquet à l'autre, 9 piquets séparés de 10 m étant disposé de part et d'autre des parcelles dans le sens de la longueur (Savadogo et al., 2007 ; Guigindibaye et al., 2013).

Indices post-feu de l'intensité du feu

Mesure de la hauteur des flammes durant les feux : cette hauteur est généralement estimée par la hauteur des dernières feuilles brûlées sur les arbres ou de la hauteur limite d'écorçage des troncs d'arbres, et elle indique l'intensité et la sévérité du feu (Hély et al., 2003; Gould et al., 2007). Pour une meilleure estimation de la hauteur des flammes, elle a été évaluée dans le cadre de cette étude à l'aide de 20 piquets de 4 m chacun disposés de manière aléatoire sur chacune des parcelles la veille de chaque feu. Ces piquets sont préalablement marqués de scotch en papier sur toute leur longueur à intervalle de 10 cm. Juste après le passage du feu, ils sont retirés et la hauteur correspondant au dernier scotch brûlé est mesurée. Cette méthode a l'avantage d'être plus précise, et de tenir compte de la variabilité de la hauteur des flammes.

Evaluation de l'efficacité de combustion : Pour évaluer l'efficacité de combustion, vingt quadrats de 1 m x 1 m ont été disposés de manière aléatoire sur chaque parcelle, et la phytomasse est prélevée puis pesée sur dix des quadrats avant les feux et sur les dix autres quadrats juste après les feux. L'efficacité de combustion (%) est par la suite calculée à partir de la quantité de phytomasse prélevée avant et après le feu (Savadogo et al., 2007 ; Guiguindibaye et al., 2013 ; Andela et al., 2016).

Détermination des proportions de fractions de cendre : Cette mesure a pour objectif d'évaluer le degré de combustion durant les feux. La cendre a été recueillie sur dix plaques métalliques de dimension 40 cm x 30 cm chacune. Ces plaques ont été disposées de manière aléatoire sur chacune des parcelles avant la mise à feu (Hogue et Inglett, 2012). Après le passage du feu, la cendre recueillie sur les plaques est collectée et subdivisée en deux fractions à l'aide d'un tamis de maille 1 mm qui permet de recueillir une fraction fine (diamètre ≤ 1 mm) et le reste de la cendre (diamètre >1 mm). Chaque fraction de cendre est pesée à l'aide d'une balance électronique (OHAUS Scout SPU 202, précision = 0,01 g).

Estimation de la surface couverte par le feu : Sur chacune des parcelles, la surface couverte par le feu a été estimée dans dix

quadrats de 1 m² en utilisant les codifications de Dayamba (2005).

0 = le quadra n'est pas atteint par feu ;

1 = $\frac{1}{4}$ du quadra est atteint par le feu ;

2 = $\frac{1}{2}$ du quadra est atteint par le feu ;

3 = $\frac{3}{4}$ du quadra est atteint par le feu ;

4 = tout le quadra est atteint par le feu.

Estimation du volume l'eau évaporée :

Dix bocaux en aluminium, contenant chacun 20 ml d'eau ont été disposés de manière aléatoire sur chacune des parcelles quelques minutes avant le feu. Ces bocaux sont récupérés juste après le passage du feu. Le volume d'eau restant dans chaque bocal est mesuré à l'aide d'une éprouvette graduée. Le volume d'eau évaporée est ainsi déduit.

Analyses statistiques

Les tests statistiques ont été réalisés à l'aide de la version 3.1.1 du logiciel R (R Development Core Team, 2014). Des modèles à effets mixtes (la fonction lmer de R) ont été utilisés pour analyser la variation des indices post-feu en fonction des régimes de feu. Le cycle de feu et la parcelle sont les effets aléatoires, tandis que le régime de feu (saison de mise à feu) est l'effet fixe. Le test de comparaison multiple (HSD) de Tuckey a été utilisé pour comparer les différentes modalités des effets fixes significatifs. Le modèle linéaire (lmer) a permis d'analyser l'influence de l'intensité du feu sur chacun des indices post-feu.

RESULTATS

Indices post-feu en fonction des régimes de feu

Le Tableau 1 relatif à la variation des différents indices post-feu en fonction des régimes de feu montre que les valeurs de hauteur de flammes, d'efficacité de combustion et de volume d'eau évaporé sont plus élevées au feu de mi-saison (FM) et au feu tardif (FT), comparativement au feu précoce (FP). Ces valeurs ne diffèrent pas entre le FM et le FT.

Quant aux proportions de fractions de cendre, au FM, les fractions fines sont plus importantes et les fractions grossières moins importantes. La surface couverte par le feu estimée ne varie pas en fonction des régimes de feu.

Relation entre l'intensité du feu et les indices post-feu

La hauteur des flammes, l'efficacité de combustion, la surface couverte par le feu, et le volume d'eau évaporée ont été influencés significativement et positivement par l'intensité du feu (Tableau 2). En effet, plus le

feu est intense plus les flammes sont hautes, plus la combustion est efficace, et la surface couverte par le feu et le volume d'eau évaporée sont importantes. Cependant la hauteur des flammes est l'indice post-feu le plus influencé par l'intensité du feu ($R^2= 0,72$, Figure 1).

Tableau 1 : Variation des indices post-feu en fonction des régimes de feu.

Indices post-feu	FP	FM	FT
Hauteur les flammes (m)	1,67 ± 0,22 ^b	2,56 ± 0,21 ^a	2,47 ± 0,20 ^a
Efficacité de combustion (%)	90,79 ± 2,32 ^b	98,11 ± 0,67 ^a	97,55 ± 0,82 ^a
Proportion de cendre fine (%)	83,23 ± 3,51 ^{ab}	86,39 ± 3,30 ^a	78,94 ± 3,34 ^b
Proportion de cendre grossière (%)	16,79 ± 3,51 ^{ab}	13,72 ± 3,21 ^b	21,06 ± 3,34 ^a
Surface couverte par le feu	3	4	4
Volume d'eau évaporé (ml)	1,35 ± 0,56 ^b	2,66 ± 0,58 ^a	2,86 ± 0,36 ^a

FP : Feu Precoce, FM : Feu de Mi-saison, FT : Feu Tardif. Pour un indice post-feu donné, les valeurs avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes (Test post hoc de Tuckey HSD).

Tableau 2 : Synthèse des régressions linéaires entre l'intensité du feu et les indices post-feu.

	P-value	R ²	F	Coefficient de régression β
Hauteur des flammes	< 0,001	0,72	89,27	2,37
Efficacité de combustion	0,01	0,23	7,38	8,63
Proportion de cendre fine	0,69	0,01	0,16	0,83
Proportion de cendre grossière	0,65	0,01	0,21	-0,19
Surface couverte par le feu	0,02	0,27	6,06	4,93
Volume d'eau évaporé	0,04	0,24	4,93	899

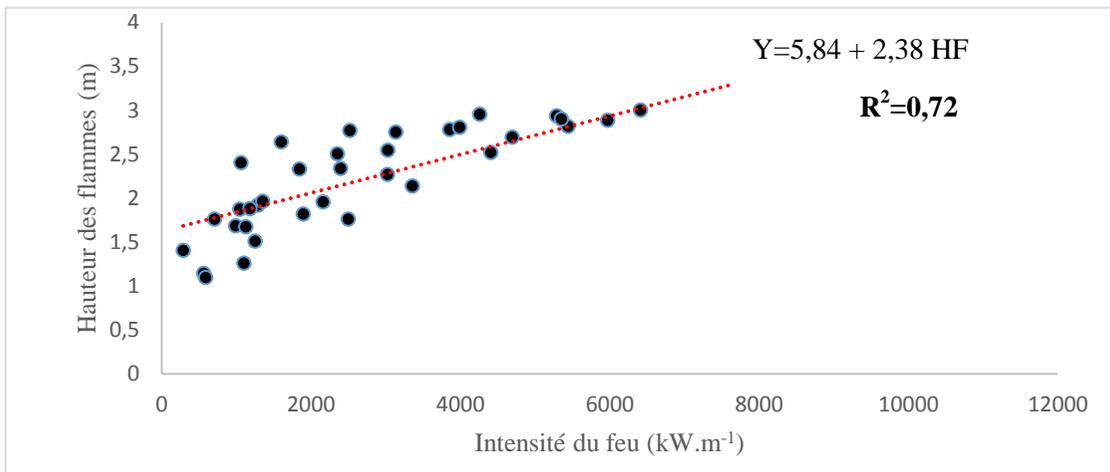


Figure 1 : Influence positive de l'intensité du feu sur la hauteur des flammes.

DISCUSSION

L'analyse des indices post-feu a révélé que la plupart d'entre eux (la hauteur des flammes, l'efficacité de combustion, la surface couverte par le feu, et le volume d'eau évaporée) présentent des valeurs plus élevées au feu de mi-saison et tardif comparativement au feu précoce. Ces valeurs plus importantes au feu de mi-saison et tardif s'expliquent par le feu plus intenses durant ces régimes de feu (N'Dri et al., 2018). En effet, ces quatre indices sont aussi ceux qui sont positivement influencés par l'intensité du feu. Ils sont donc de bons indicateurs de l'intensité du feu. Le feu précoce intervient en novembre pendant que le taux d'humidité du combustible total et l'humidité de l'air relevés sur ces parcelles sont élevés (N'Dri et al., 2018). Van Wilgen et al. (2003) et Higgins et al. (2000) qui ont travaillé en savane sud-africaine, suggèrent également une baisse du taux d'humidité des herbes au fur et à mesure qu'on avance dans la saison sèche. Cette forte humidité du combustible au feu précoce serait à la base du feu moins intense, comme le suggère Savadogo et al. (2007), Fontaine et al. (2012) et Afelu et al. (2015). Ce feu moins intense consume moins bien la phytomasse, avec des flammes moins hautes, et induit une faible évaporation d'eau, comparativement à un feu qui survient en Janvier (feu de mi-saison) ou en mars (feu tardif). En effet, après le passage des feux de mi-saison et tardifs, la combustion a été presque totale et très peu de phytomasse reste sur les parcelles après le passage de ces feux. Aussi, probablement dû au fort taux d'humidité du combustible et des paramètres climatiques non favorables à une bonne combustion (Van Wilgen et al., 2003 ; N'Dri et al., 2018), la propagation du feu précoce n'était pas homogène et des larges zones non brûlées étaient retrouvées après le passage de ce régime de feu. Ce qui explique également la surface couverte par le feu plus faible sur les parcelles soumises au feu précoce dans le cadre de cette étude. Guiguindibaye et al. (2013) ont également observé une surface couverte par le feu plus importante (90%) au milieu de la saison sèche. Au feu précoce, le volume d'eau évaporée est également plus

faible que ceux du feu tardif et de mi-saison. Cela pourrait s'expliquer par les températures plus élevées auxquelles ont été soumises les bocaux contenant de l'eau. Les températures maximales durant les feux de mi-saison et tardif étaient respectivement de 645 ± 2 et 618 ± 2 , contre 489 ± 2 pour le feu précoce (N'Dri et al., 2018).

Parmi ces indices post-feu qui sont de bons indicateurs de l'intensité du feu, la hauteur des flammes se démarque par sa meilleure capacité à prédire l'intensité du feu (coefficient de détermination $>0,70$ pour le modèle linéaire) comparativement à ceux des autres indices post-feu (l'efficacité de combustion, le volume d'eau évaporé, et la surface couverte par le feu) qui conduisent à des coefficients de détermination plus faibles ($<0,30$). La hauteur des flammes est donc le meilleur indicateur de l'intensité du feu dans la savane de Lamto. Plus les flammes sont hautes, plus le feu est intense, comme le suggèrent également Guiguindibaye et al. (2013) qui ont travaillé dans une zone soudanienne au Tchad, Morrison et al. (2002) qui ont travaillé en savane australienne. La hauteur des flammes est ainsi généralement considérée comme un bon indicateur de l'intensité et de la sévérité du feu (Morrison et al., 2002 ; Alexander et Cruz, 2012 ; Fontaine et al., 2012 ; Guiguindibaye et al., 2013).

Conclusion

L'étude portant sur les indices post-feu de l'intensité du feu dans la savane de Lamto a révélé que plusieurs indices post-feu (l'efficacité de combustion, le volume d'eau évaporé et la surface couverte par le feu) renseignent sur l'intensité du feu. Cependant, la hauteur des flammes a été le meilleur indicateur de l'intensité du feu. Elle augmente avec l'intensité du feu. La hauteur des flammes, facile à mesurer, permettra aux gestionnaires des aires protégées en savane de mieux évaluer l'intensité du feu et son impact sur la végétation. Cet indice post-feu devrait être analysé sur un plus long terme, pour ensuite paramétrer un modèle qui permettrait de proposer des valeurs d'intensité de feu sur la base de cet indice.

CONFLIT D'INTERÊTS

Les auteurs déclarent qu'il n'existe aucun conflit d'intérêt.

CONTRIBUTIONS DES AUTEURS

ABN est la responsable du projet dans lequel s'intègre cette étude et a rédigé cet article. MF a été en charge de traiter les données de cet article. TDS a été en charge de collecter les données sur le terrain, de les saisir et les traiter. JG, MK, KD, JKN², N'AK, et SB sont membres du projet dans lequel cette étude a été réalisée, ils ont contribué à la mise en place du dispositif expérimental et ont également corrigé cet article.

REMERCIEMENTS

Nous remercions également Dr. YEO Kolo, directeur de la station de Lamto pour avoir fourni le cadre pour notre étude. Nos remerciements vont également à l'endroit d'Honoré Kounan et Marcel Konan pour leur assistance sur le terrain, ainsi que tous les membres de notre équipe GIDES (Gestion Intégrée et Durable des Ecosystèmes de Savane) pour leur aide durant ce projet. Nous remercions spécialement CHARLES-DOMINIQUE Tristan, pour son aide précieuse dans la mise au point du protocole de mesure de la hauteur des flammes.

REFERENCES

Abbadie L, Gignoux J, Lepage M, Le Roux X. 2006. Environmental constraints on living organisms. In *Lamto: Structure, Functioning and Dynamics of a Savanna Ecosystem*, Abbadie L, Gignoux J, Le Roux X, Lepage M (eds). Springer Verlag: New-York; 45-61.

Afelu B, Kokou K. 2015. Paramètres physiques d'évaluation du comportement des feux de végétation au Togo. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **9**(4): 2091-2105. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v9i4.31>

Alexander ME, Cruz MG. (2012). Interdependencies between flame length and fireline intensity in predicting crown fire initiation and crown scorch height. *International Journal of Wildland Fire*,

21: 95-113. DOI:

<https://doi.org/10.1071/WF11001>.

- Andela N, Van der Werf GD, Kaiser JW, Van Leeuwen TT, Wooster MJ, Lehmann CER. 2016. Biomass burning fuel consumption dynamics in the tropics and subtropics assessed from satellite. *Biogeosciences*, **13**: 3717-3734. DOI: 10.5194/bg-13-3717-2016.
- Byram GM. 1959. Combustion of forest fuels. In *Forest Fire: Control and Use*, Davis KP (ed). Mc Graw-Hill: New York; 61-89.
- Dayamba SD. 2005. Influence des feux de brousse sur la dynamique de la végétation dans le Parc W-Burkina. Mémoire de fin d'études d'Ingénieur du Développement Rural : option élevage. *IDR/UPB-Burkina Faso*, p. 28.
- Fontaine JB, Vanessa CW, Enright NJ, Lade JC, Miller BP. 2012. Fire behaviour in south-western Australian shrublands: evaluating the influence of fuel age and fire weather. *International Journal of Wildland Fire* **21**: 385-395. DOI: <https://doi.org/10.1071/WF11065>.
- Fritz H, Duncan P, Gordon IJ, Illius AW. 2002. Megaherbivores influence trophic guilds structure in African ungulate communities. *Oecologia*, **131**: 620-625. <https://doi.org/10.1007/s00442-002-0919-3>.
- Frost PGH, Robertson F. 1985. The ecological effects of fire in savannas. In *Determinants of Tropical Savannas*, Walker BH (ed). International Council of Scientific Unions Press: Miami; 98-140.
- Gignoux J, Mordelet P, Menaut JC. 2006. Biomass cycle and primary production. In *Lamto: Structure, Functioning and Dynamics of a Savanna Ecosystem*, Abbadie L, Gignoux J, Le Roux X, Lepage M (ed). Springer-Verlag: New York; 115-137.
- Gould JS, McCaw WL, Cheney NP, Ellis PF, Knight IK, Sullivan AL. 2007. Project Vesta. Fire in Dry Eucalypt Forest: Fuel Structure, Fuel Dynamics and Fire Behaviour. (Ensis–CSIRO: Canberra,

- ACT, and Department of Environment and Conservation: Perth, WA).
- Govender N, Trollope WS, Van Wilgen B. 2006. The Effect of Fire Season, Fire Frequency, Rainfall and Management on Fire Intensity in Savanna vegetation in South Africa: Fire Intensity in Savanna. *Journal of Applied Ecology*, **43**(4): 748-758. DOI: 10.1111/j.1365-2664.2006.01184.
- Guiguindibaye M, Belem MO, Boussim JI. 2013. Caractéristiques des feux dans un incendie en savane soudanienne au Tchad. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **7**(3): 1147. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v7i3.21>.
- Hély C, Flannigan M, Bergeron Y (2003) Modeling tree mortality following wildfire in the south-eastern Canadian mixed-wood boreal forest. *Forest Science*, **49**: 566–576. <https://doi.org/10.1093/forestscience/49.4.566>.
- Hétier JM, López R. 2005. Tierras llaneras de Venezuela, Editorial Venezolana, Mérida, Venezuela.
- Higgins S, Bond W, Trollope, WSW. 2000. Fire, resprouting and variability: a recipe for grass-tree coexistence in savanna. *Journal of Ecology*, **88** : 213-229. DOI: 10.1046/j.1365-2745.2000.00435.x.
- Hogue BA, Inglett PW. 2012. Nutrient release from combustion residues of two contrasting herbaceous vegetation types. *Sci. Total Environ.*, **431** : 9-19. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.04.074>.
- Keeley JE. 2009. Fire Intensity, Fire Severity and Burn Severity: A Brief Review and Suggested Usage. *International Journal of Wildland Fire*, **18**(1): 116. doi:10.1071/WF07049.
- Kolaks J, Cutter BE, Loewenstein EF, Hartman GW, Kabrick JM. 2007. The effect of thinning and aspect on fire behavior in the Missouri Ozarks of the Central Hardwood Region. In *Proceedings of the 23 Tall Timbers Fire Ecology Conference: Fire in Grassland and Shrubland Ecosystems*, Masters RE, Galley KEM (eds). Tall Timbers Research Station: Tallahassee, Florida, USA; 193-201.
- L'Hôte Y, Mahé G. 2012. *Annual Rainfall Map of Africa*. IRD.
- Menaut, JC, César J. 1979. Structure and Primary Production of Lamto Savannas, Ivory Coast. *Ecology*, **60**(6), 1197–1210. DOI: 10.2307/1936967.
- Miquelajauregui Y, Cumming SG, Gauthier S. 2016. Modelling variable fire severity in boreal forests: effects of fire intensity and stand structure. *PLoS one* **11**(2): e0150073. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150073>.
- Morrison DA. 2002. Effects of fire intensity on plant species composition of sandstone communities in the Sydney region. *Austral Ecology* **27**: 433-441. DOI: 10.1046/j.1442-9993.2002.01197.x.
- N'Dri AB, Gignoux J, Dembélé A, Konate S. 2012. Short term effects of fire intensity and fire regime on vegetation dynamic in a tropical humid savanna (Lamto, central Côte d'Ivoire). *Natural Science*, **4**(12), 1056–1064. DOI: 10.4236/ns.2012.412134.
- N'Dri AB, Soro TD, Gignoux J, Dosso K, Koné M, Koné NA, N'Dri JK, Barot S. 2018. Season affects fire behavior in annually burned humid savanna of West Africa. *Fire Ecology*, in press.
- Pagney P. 1988. Le climat de Lamto (Côte d'Ivoire). In *Le Climat de la Savane de Lamto (Côte d'Ivoire) et sa Place dans les Climats de l'Ouest Africain*, Lamotte M, Tireford JL (ed). Travaux de Recherche des Chercheurs de Lamto, Côte d'Ivoire ; 31-79.
- R Development Core Team. 2014. *R: a Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna.
- Rissi MN, Baeza MJ, Gorgone-Barbosa E, Zupo T, Fidelis A. 2017. Does season affect fire behaviour in the Cerrado? *International Journal of Wildland Fire*

- 26:** 427-433. DOI: <https://doi.org/10.1071/WF14210>.
- Sankaran M, Niall P, Robert H, Scholes, J, Ratnam J, David AJ, Brian C, Gignoux J, et al. 2005. Determinants of woody cover in African savannas. *Nature*, **438** (7069): 846-49. DOI: 10.1038/nature04070.
- Savadogo P, Zida D, Sawadogo L, Tiveau D, Tigabu M, Odén PC. 2007. Fuel and fire characteristics in savanna-woodland of West Africa in relation to grazing and dominant grass type. *International Journal of Wildland Fire*, **16**: 531-539. DOI: <https://doi.org/10.1071/WF07011>
- Sawadogo L, Grégoire JM, Fournier A, Eva H. 2003. Caractérisation de la dynamique des feux et de l'évolution du couvert dans le Parc du W : Burkina Faso, Bénin et Niger. Mission d'expertise pour l'étude des feux de brousse et leur utilisation dans le cadre d'une gestion raisonnée des aires protégées du Complexe WAP, p. 65.
- Smit IPJ, Gregory PA, Govender N, Kennedy-Bowdoin T, Knapp DE, Jacobson J. 2010. Effects of fire on woody vegetation structure in African savanna. *Ecological Applications*, **20**(7): 1865-1875. DOI: 10.1890/09-0929.1.
- Smit IPJ, Asner GP, Govender N, Vaughn R, Van Wilgen BW. 2016. An Examination of the Potential Efficacy of High-Intensity Fires for Reversing Woody Encroachment in Savannas. *Journal of Applied Ecology*, **53**(5): 1623-1633. DOI: 10.1111/1365-2664.12738.
- Trollope WSW. 1983. Control of bush encroachment with fire in the arid savannas of south-eastern Africa. PhD Thesis, University of Natal, Pietermaritzburg.
- Van Wilgen BW, Trollope WSW, Biggs HC, Potgieter ALF, Brockett BH. 2003. Fire as a Driver of Ecosystem Variability. In *The Kruger Experience*, du Toit JT, Rogers KH, Biggs HC (eds). Island Press: London; 149-170.
- Werner PA. 2012. Growth of juvenile and sapling trees differs with both fire season and understorey types: trade-offs and transitions out of the fire trap in an Australian savanna. *Austral Ecol.*, **37**: 644-657. DOI: 10.1111/j.1442-9993.2011.02333.x.