

Influence des Facteurs Climatiques et Topographiques Sur Les Risques de Feux de Végétation au Centre du Bénin

J. Oloukoi^{1*}, I. Yabi², & D. Johnson¹

¹*Regional Centre for Training in Aerospace Surveys (RECTAS), Obafemi Awolowo University Campus, P.M.B. 5545, Ile-Ife, Nigeria*

²*Laboratoire de Climatologie, Département de Géographie, Université d'Abomey-Calavi, BP 922 Abomey-Calavi, République du Bénin*

Résumé

Cet article analyse la relation entre les paramètres climatiques et topographiques et les risques de feu au centre du Bénin utilisant les données climatiques et topographiques et le pouvoir radiatif des points de feux acquis par le capteur de MODIS. L'interpolation spatiale de ces données par l'algorithme du Voisin Naturel et la corrélation de Pearson ont permis de mesurer la contribution de chaque paramètre dans l'éclosion et la propagation du feu. L'indice de sécheresse de la végétation qui lie la température de surface et le NDVI à travers une régression linéaire, a permis d'apprécier les risques de feu. Au total, la température, l'humidité relative, l'insolation et la vitesse du vent influencent le pouvoir radiatif des feux. La pente et l'altitude influencent aussi positivement la propagation des feux. Mais de tous ces paramètres, seules la température, l'insolation et la pente sont significatives au seuil de 0,05 de niveau alpha. L'indice de sécheresse de la végétation indique que selon le niveau de la température de surface, tout point où existe de la végétation sèche peut être affecté par le feu.

Mots clés : *Facteurs climatiques, facteurs topographiques, risque de feu, MODIS, pouvoir radiatif des feux*

*E-mail: oloukoi@rectas.org

Journal of Geospatial Science and Technology

Website: www.rectas.org

Abstract

This paper analyzes the relationship between climatic and topographic parameters and fire risks in the centre of Benin, using climatic and topographic data and the fire radiative power of fires hotspots acquired by MODIS sensor. Spatial interpolation with Natural Neighbor algorithm and the Pearson correlation has helped analyze the contribution of each parameter in the ignition and propagation of fire. Vegetation drought Index which links the surface temperature and the NDVI through a linear regression has helped assess the fire risk.

Increase in temperature, sunshine period and wind speed augment the fire radiative power while the correlation is rather negative with the relative humidity. Altitude and slope influence also positively the fire radiative power. Out of these parameters, only temperature, sunshine period and slope are significant at 0.05. The drought index indicates that considering the magnitude of the surface temperature, any point of the area where exists dry vegetation could be affected by fire.

Keywords: *Climatic factors, topographic factors, fire risk, MODIS, fires radiative power*

Introduction

L'occurrence grandissante des feux de végétation (Bowman *et al.*, 2011) a contribué à la dévastation et à la réduction des zones forestières, la disparition de certaines espèces sensibles, l'exposition des sols aux vents et à l'érosion hydrique et la destruction des habitats fauniques (Laris *et al.*, 2008; Cisneros *et al.*, 2012; Tandjiékpon, 2001) sans oublier les vastes étendues d'exploitations agricoles qui sont consumées (FAO, 1996). Afouda (1990) a estimé que les feux sont les plus grands destructeurs de la biomasse végétale et de la faune et malgré cette observation, leurs effets sont encore mal connus ou mal appréciés.

Le risque des feux de végétation peut être décomposé en trois étapes. Il s'agit de l'éclosion qui constitue l'aléa et pouvant être provoqué par l'homme ou la foudre, de la susceptibilité du milieu notamment la pente et le combustible fourni par la biomasse, et du vent qui commande la propagation des flammes (Carrega *et al.*, 2007). L'éclosion pourra embraser la végétation si les conditions météorologiques l'autorisent (Carrega, 2008).

Bien que le feu de végétation soit considéré en Afrique au sud du Sahara comme un phénomène socio-économique et culturel (Valea &

Ballouche, 2012; Bigot *et al.*, 2005 ; Adouabou *et al.*, 2004 ; Yameogo, 1999), il importe de relever qu'il est avant tout lié aux caractéristiques du climat et aux autres conditions écologiques du milieu. En effet, l'activité des feux se développe pendant la saison sèche où les facteurs climatiques favorisent l'inflammabilité de la végétation (Sharples *et al.*, 2009, Bond *et al.*, 2003 ; Bigot *et al.*, 1999 ; Afouda, 1990).

Le Bénin abrite une proportion très élevée des forêts sèches et surtout des savanes riches en espèces herbacées. Environ 75000 Km² de superficie de ces forêts sont exposés aux phénomènes de feux chaque année (Tandjiékpon, 2001 ; Bossou, 1999). Entre 1991 et 1998, il a été constaté une augmentation des terres agricoles et une réduction des forêts et des savanes boisées. Ces tendances sont surtout favorisées par les feux de végétation utilisés comme un moyen de défrichage et d'agriculture itinérante (Oloukoï, 2012). Les feux se concentrent dans les Départements du Borgou et de l'Alibori, de l'Atacora et de la Donga, du Zou et des Collines, et sont généralement suivis des dégâts d'ordre socio-économique (Linsoussi, 2011; Thamm, 2008). Utilisés pour la préparation des champs, la chasse et lors de la transhumance bovine, ces feux sont considérés comme l'un des facteurs qui exposent directement le sol à la dégradation (Capo-Chichi *et al.*, 1998).

Le présent article vise à analyser la relation entre les paramètres climatiques et topographiques sur le pouvoir radiatif des feux de végétation au Centre du Bénin (figure 1). Il se fonde essentiellement sur l'évaluation de la corrélation entre les paramètres climatiques et topographiques avec l'occurrence des feux de végétation.

Milieu d'Etude

Le cadre géographique de cette étude se retrouve dans la zone de transition entre le climat subéquatorial du Sud et le climat soudanien du Nord (Boko, 1988; Afouda, 1990). Le secteur d'étude est situé entre 7° 30' et 9° de latitude nord et entre 1°38' et 2°46' de longitude Est. Le régime pluviométrique intermédiaire entre la distribution bimodale du Sud et la distribution unimodale du Nord. Ces dernières années, la tendance pluviométrique est unimodale à base large et les hauteurs pluviométriques annuelles oscillent généralement entre 900 et 1200 mm. Les pluies commencent généralement en mars pour finir en octobre (figure 2). Le paysage végétal est le reflet du climat de transition soudano-guinéenne expliquant la présence des savanes arborées et arbustives, des forêts claires et savanes boisées et de quelques îlots de forêts denses. A ces dernières s'ajoutent les formations anthropiques telles que les champs et jachères et les plantations (Oloukoï, 2012).

D'après une projection faite sur 2010 sur la base des données de l'Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique (INSAE, 2003), il ressort que la population agricole représente 72% de la population totale. La prépondérance des activités agricoles influence l'occupation et l'utilisation des terres par l'extension des champs au détriment des formations végétales. La pression sur les formations forestières est accentuée par les pratiques telles que l'écobuage, les feux de végétation et des coupes ou déracinements directs de grands arbres pour la conquête de nouveaux espaces de cultures. Le Centre du Bénin est le théâtre de plusieurs types de feux notamment les feux agricoles, les feux de chasse, les feux de renouvellement du pâturage, les feux criminels, les feux de protection des biens et personnes et des feux d'aménagement et de gestion des aires protégées (Alimi, 2010).

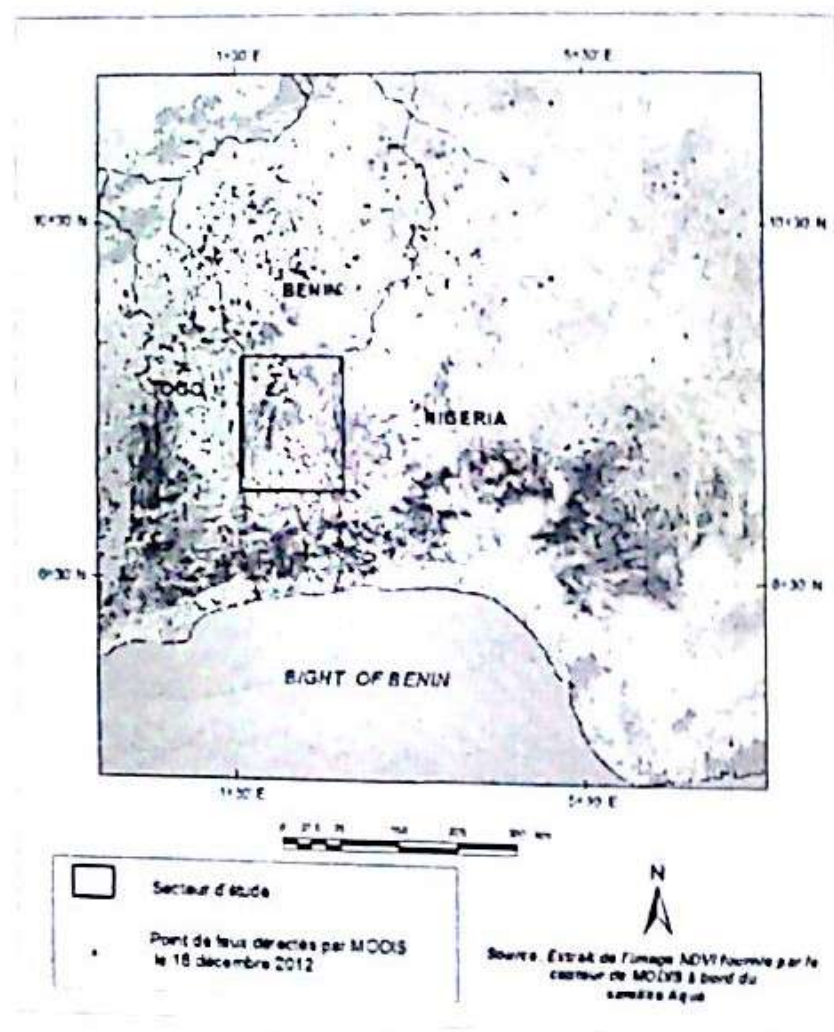


Figure 1 : Secteur d'étude

Tchaourou

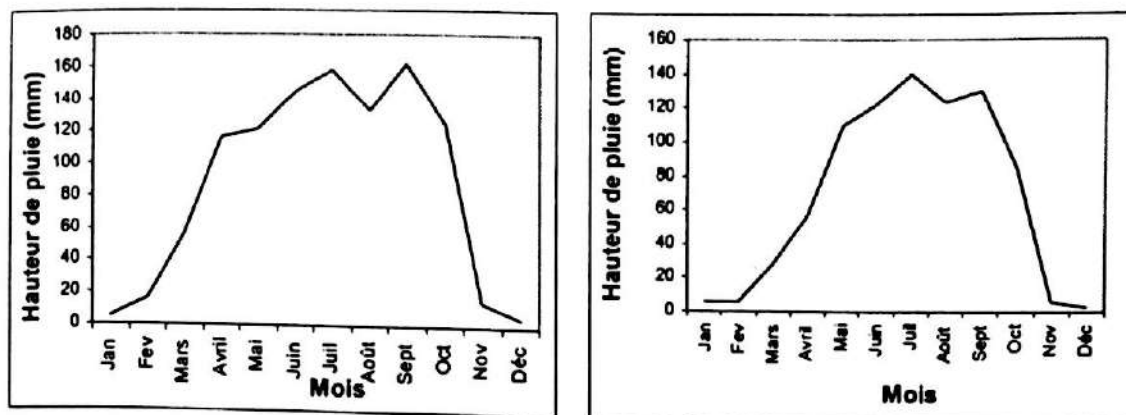


Figure 2: Régime pluviométrique moyen dans le Centre du Bénin de 1976 à 2005

Source : *Historical Weather Records-Africa*,

<http://www.tutiempo.net/en/Climate/africa.htm>, consulté le 14 décembre 2010.

Données et Méthodes

Données MODIS

Pour cette étude, des données de points de feu (hotspots) acquises de novembre 2000 à décembre 2010, ont été utilisées (Giglio, 2010 ; Csiszar *et al.*, 2006). Elles proviennent du capteur MODIS monté à bord des satellites Terra et Aqua. Ce capteur est équipé d'un système de détection thermique qui permet de mesurer les températures sur la surface terrestre. Si la température ambiante d'un lieu dépasse un certain seuil, ce lieu précis est considéré par MODIS comme un point actif de feu qui constitue un "événement feu" (Langner et Siegert, 2008; Csiszar *et al.*, 2006). La figure 3 montre la probabilité pour des feux d'être détectés par le capteur MODIS en tenant compte de la relation entre la température pendant le jour et la nuit et la taille des feux dans chaque biome (figure 3).

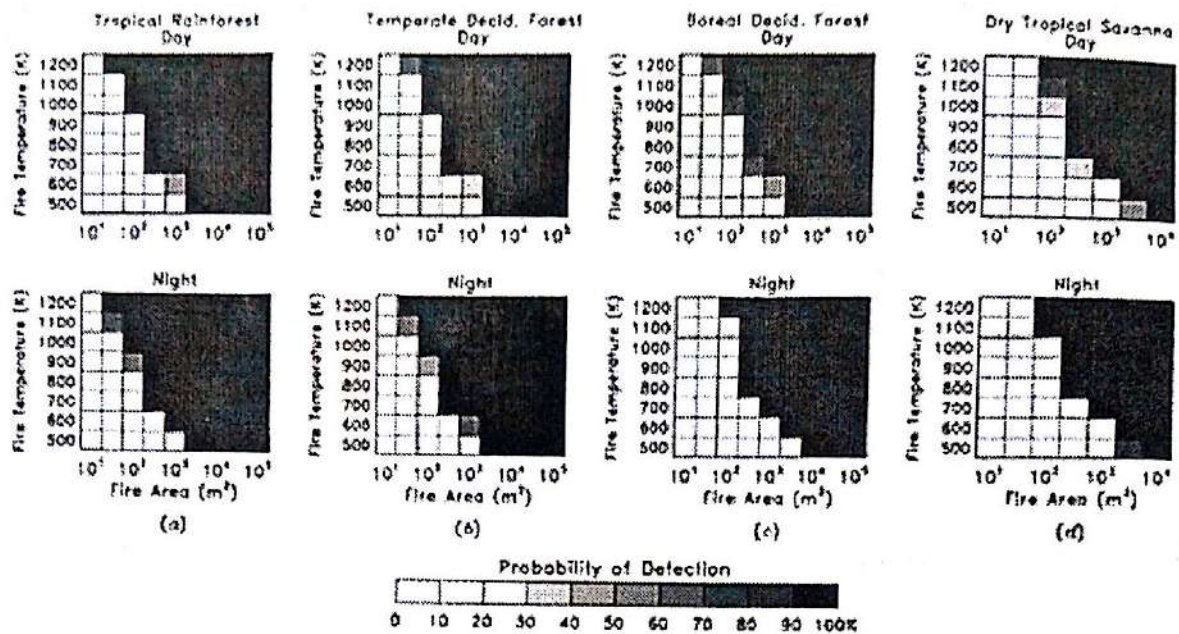


Figure 3: Seuil des températures en Kelvin, des feux détectables par MODIS en fonction de leur taille et du type de formation végétale. *Source : Giglio et al. (2003)*

Il ressort de l'analyse de la figure 3 que le type de biome, la période (jour ou nuit), la température variant généralement entre 500 et 1200 kelvin et la superficie embrasée, constituent des paramètres de détection des feux actifs sur la surface terrestre par le capteur de MODIS. Par exemple dans la zone d'étude dominée par la savane tropicale, un feu est détectable par le capteur de MODIS lorsqu'il embrase une superficie minimum de 100 m² avec une température minimum de 1100 kelvin, de jour comme de nuit. Lorsque la superficie embrasée est comprise entre 1000 et 10000 m² et que la température est de 500 kelvin soit environ 226,86 degrés Celsius, le feu peut être détecté aussi (Giglio *et al.* 2003).

Un feu réel sur la surface terrestre peut être un ensemble de points de feux contenus dans un pixel de 1 km x 1 km (figure 4). Selon Giglio (2010), Davies *et al.* (2009), les attributs de ces points sont les suivants :

- la latitude et la longitude correspondant à la localisation géographique du point central d'un pixel de 1 km x 1 km. Le point peut être concerné par un ou plusieurs feux (la taille du feu peut ne pas être 1km² ; elle est variable) ;
- la brillance indiquant la température de brillance mesurée en Kelvin, en utilisant les canaux 21/22 et 31 de MODIS.
- le *scan* et le *track* indiquant la résolution spatiale du pixel scanné. Il importe de noter que la taille du pixel n'est pas toujours de 1 km².
- la confiance de la détection montrant le degré de précision ou de qualité de chaque pixel de feu actif détecté ;

- le pouvoir radiatif du feu exprimé en Mégawatts (MW) correspondant à l'intensité du feu. Il fournit également des informations sur la quantité de chaleur radiante mesurée sur des feux détectés. La quantité de l'énergie calorifique radiante libérée par unité de temps est supposée être en relation avec le taux de consommation du combustible (Wooster *et al.*, 2005).

En dehors de ces attributs, le fichier de forme (shapefile) des points de feux contient des informations sur la date et le temps d'acquisition des points de feu.

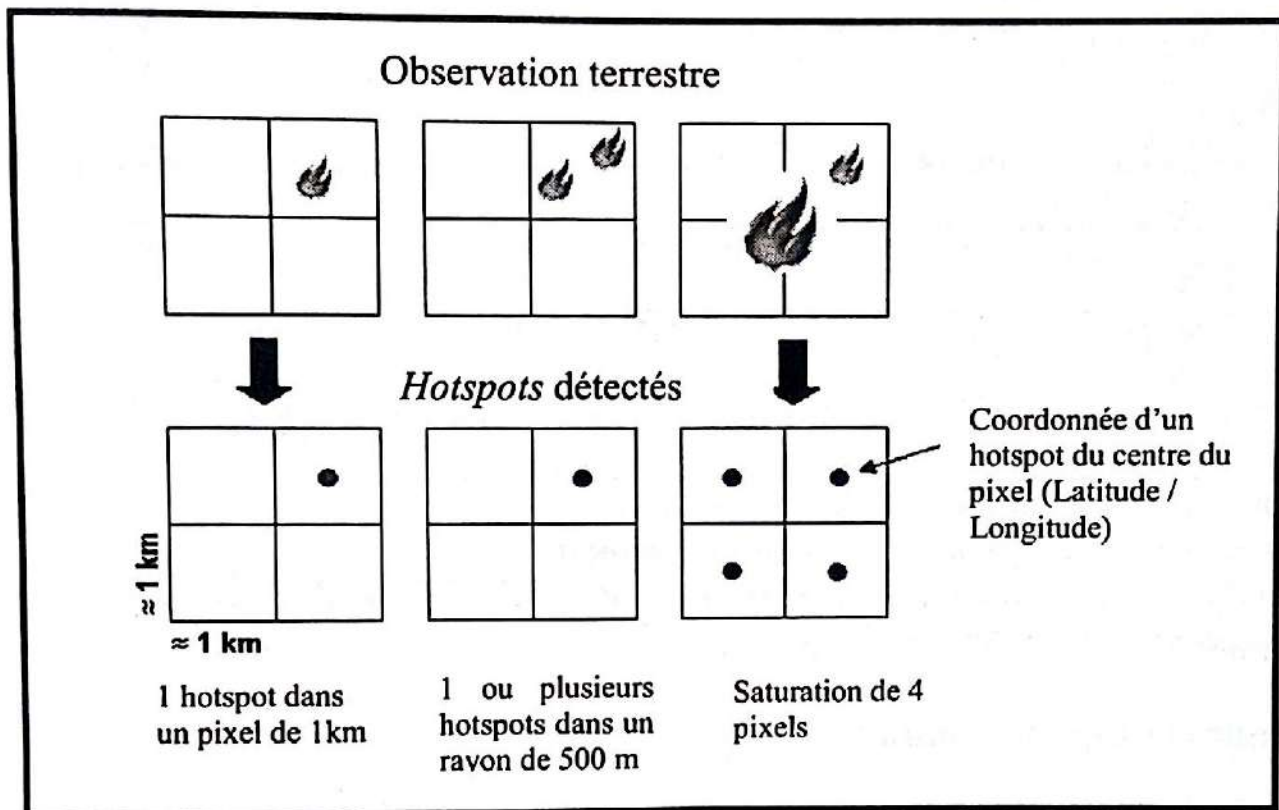


Figure 4: Pixels chauds et leurs correspondants sur le terrain

Source: University of Maryland, FIRMS

(<http://maps.geog.umd.edu/firms/faq.htm>, consulté le 25/07/2009)

Données climatiques

L'analyse de l'évolution des variables climatiques a été faite sur la série trentenaire allant de 1976 à 2005 à partir des données de la station synoptique de Savè. En dehors de cette station, les données des stations proches du milieu d'étude, comme Parakou et Bohicon au Bénin, Atakpamé, Sokodé et Kara au Togo, Ilorin et Ibadan au Nigéria, ont été utilisées (tableau 1). Les données de ces stations ont servi à l'interpolation spatiale des données de la zone d'étude allant de novembre à février, période au cours de laquelle les activités de feux de végétation sont intenses. Les données de ces stations ont été téléchargées

de la base de données de *Historical Weather Records Africa* (<http://www.tutiempo.net/en/Climate/africa.htm>). Les données climatiques collectées sont : les lames pluviométriques, la température, l'humidité relative, l'insolation et la vitesse du vent.

Tableau 1: Caractéristiques des stations synoptiques retenues

Stations	Latitude	Longitude	Altitude	Mesures
Savè	08°01'48''N	02°27'36''E	199 m	Précip, temp, HR, Ins, ETP, Vv
Parakou	09°21'N	02°36'36''E	392 m	temp, HR, Ins, Vv
Bohicon	07°09'36''N	02°03'36''E	166 m	temp, HR, Ins, Vv
Kara (Togo)	09°33'N	01°09'36''E	341 m	temp, HR, Ins, Vv
Sokodé (Togo)	08°58'48''N	01°09'00''E	386 m	temp, HR, Ins, Vv
Atakpamé (Togo)	07°34'48''N	01°06'36''E	400 m	temp, HR, Ins, Vv
Ibadan (Nigeria)	07°21'36''N	03°58'48''E	234 m	temp, HR, Ins, Vv
Ilorin (Nigeria)	08°28'48''N	04°34'48''E	308 m	temp, HR, Ins, Vv

Source: *Historical Weather Records- Africa*,

<http://www.tutiempo.net/en/Climate/africa.htm>

Précip = précipitation ; temp = température ; HR = Humidité relative ; Ins = Insolation, Vv= Vitesse du vent

Données topographiques

L'altitude a été extraite à partir du Modèle Numérique d'Altitude (MNA) fourni par ASTER GDEM (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Digital Elevation Model (GDEM)*). D'une résolution de 30 m, ce modèle numérique affiche les valeurs continues de l'altitude par rapport au niveau de la mer et couvre la surface terrestre de la latitude 83°S à 83°N. Il s'agit d'un ensemble de grille de 1° x 1° chacun. Pour pouvoir couvrir le milieu d'étude, les grilles N07E001, N08E001, N09E001, N07E002, N08E002, N09E002, N07E003, N08E003, N09E003 ont été utilisées. Une mosaïque a été faite à partir de ces grilles. La zone d'étude a été superposée sur la mosaïque puis la partie couverte exclusivement par la zone d'étude extraite. Les valeurs de la pente ont été générées à partir du même Modèle Numérique d'Altitude de ASTER GDEM (figure 5). Les variables Altitude et Pente sont des variables continues.

Méthodes

Analyse de la relation des feux de végétation avec les paramètres climatiques

L'analyse spatiale de ces points de feu a porté sur leur relation avec les paramètres climatiques. L'évolution des paramètres climatiques a été présentée suivant leur moyenne mensuelle. Ces paramètres dont la pluviométrie, la température, l'humidité relative, l'insolation, la vitesse du vent, ont été spatialisés. La spatialisation est faite à l'aide d'une technique d'interpolation utilisant l'algorithme *Natural Neighbors* (Voisin Naturel) et tenant compte aussi des données des stations de Savè, Parakou, de Bohicon (Bénin), de Kara, Sokodé, Atakpamé (Togo) et des stations de Ibadan et Ilorin (Nigeria). L'algorithme *Voisin naturel* recherche le sous-ensemble d'échantillons en entrée le plus proche d'un point désigné comme les points représentant les stations climatologiques retenues. Il applique à ce point désigné une pondération sur la base de surfaces proportionnelles afin d'interpoler la valeur de chaque paramètre climatique. Connue sous le nom d'interpolation de Sibson, ses propriétés de base sont son caractère local (utilisation d'un seul sous-ensemble d'échantillons entourant un point désigné) et la garantie que les valeurs interpolées se situent dans la plage des échantillons utilisés (Boissoinnat *et al.*, 2000 ; Sibson, 1981).

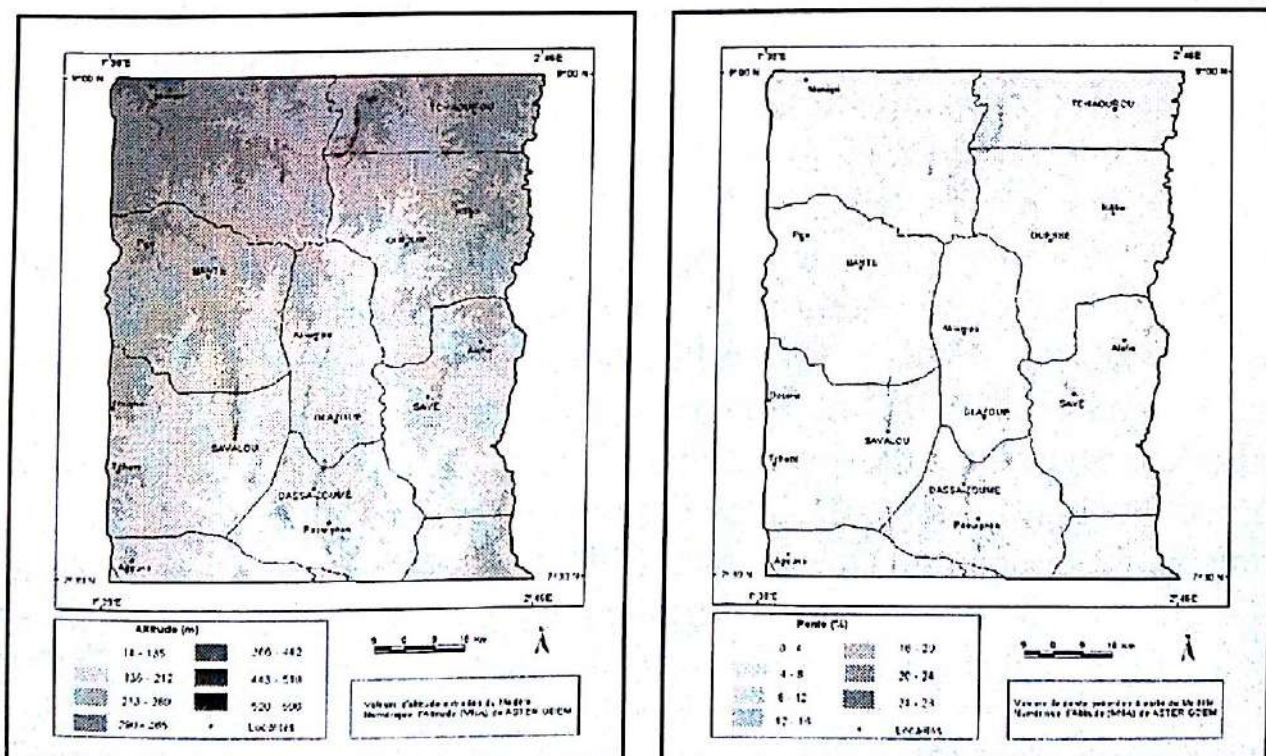


Figure 5: Altitude (m) et Pente (%) au Centre du Bénin

Les points de feux ont été superposés avec chaque paramètre climatique spatialisé. Ainsi à chaque point de feu de localisation X (latitude) et Y (longitude), correspond une valeur de hauteur pluviométrique, de température, d'humidité relative, de la vitesse du vent et de l'insolation, valeurs extraites grâce à l'algorithme '*Extract values to point*' dans ArcGIS. Cet algorithme génère les valeurs des cellules d'un raster en se basant sur un ensemble de points (points de feux). La même opération a été appliquée à la carte de la pente et d'altitude.

Par ailleurs, la corrélation de Pearson a été utilisée pour montrer le niveau de relation entre ces paramètres climatiques et le pouvoir radiatif des feux exprimant l'intensité du feu. Cette corrélation intègre également la topographie du milieu notamment l'altitude et la pente de terrain.

Risque de feu selon l'indice de sécheresse de la végétation

L'indice de sécheresse de la végétation est issu de l'ajustement du coefficient directeur de l'équation de la régression linéaire entre la température maximale et l'indice de Végétation Normalisée ou Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (Ezzine *et al.*, 2005). Le NDVI est déterminé par le rapport normalisé de la différence entre la réflectance proche-infrarouge et la réflectance acquise dans la bande spectrale rouge du capteur. Cet indice de végétation est le plus communément utilisé pour estimer l'activité photosynthétique de la végétation, donc indirectement sa productivité. Il est basé sur une combinaison des réflectances mesurées dans le rouge (R) et le proche infra-rouge (PIR). De plus, le NDVI présente l'avantage d'être relativement robuste aux variations d'angles d'observation et aux effets atmosphériques et varie entre -1 et +1 (Santin- Janin, 2009 ; Yacouba *et al.*, 2009). Sur la terre, le NDVI est généralement compris entre 0,15 (sol nu) et 0,9 (maïs en plein développement) ; sur l'eau, il est en général négatif (Tucker, 1979). Sa formule de calcul se présente comme suit :

$$NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R}$$

avec PIR la bande correspondant au Proche Infra Rouge et R celle du Rouge. Une carte de risque de feu selon l'indice de sécheresse de végétation a été réalisée et a permis de montrer les zones de risque élevé, très élevé et faible. En effet, le nuage de points défini par la température de surface (TS) et le NDVI est ajusté grâce à une régression linéaire dont le coefficient directeur est négatif. Quand la végétation est dans des conditions d'humidité favorable, le NDVI augmente et la TS diminue. Inversement, quand la végétation est sèche, les valeurs du NDVI diminuent et celles de TS augmentent. Par conséquent, plus la pente est forte, plus le risque augmente et *vice-versa*.

Résultats

Pouvoir Radiatif des Feux (PRF) et paramètres climatiques

L'analyse de la régression linéaire entre le pouvoir radiatif des feux (PRF) et les différents paramètres climatiques évoqués plus haut, montrent que ceux-ci contribuent à des niveaux différents à la propagation des feux au Centre du Bénin (tableau 2).

Le coefficient de corrélation entre le pouvoir radiatif des feux et l'humidité relative révèle une corrélation négative (-0,032) indiquant que le pouvoir radiatif des feux diminue avec l'augmentation de l'humidité relative. Par contre, la corrélation entre le pouvoir radiatif des feux et l'insolation est positive. En effet le coefficient de corrélation de 0,054 indique que plus la durée de l'ensoleillement est longue, plus le feu de végétation devient violent.

De même, la vitesse du vent et le pouvoir radiatif des feux sont positivement corrélés, même si la valeur du coefficient de corrélation est faible et presque nul (0,003). La valeur positive du coefficient indique que le pouvoir radiatif des feux s'intensifie avec l'augmentation de la vitesse du vent.

Tableau 2: Corrélation entre le Pouvoir Radiatif des Feux (PRF) et des facteurs climatiques

Variables	B	Coefficient de corrélation (Pearson)	R ²	Test de Student	Sig.	F values
PRF et Humidité relative	33,580	-0,032	0,001	-1,483	0,138	2,199
PRF et Insolation	-35,043	0,054	0,003	2,529	0,012	6,396
PRF et Vitesse du vent	27,918	0,003	0,000	0,159	0,874	0,025
PRF et Température maximale	303,815	0,059	0,003	2,761	0,006	7,623

Sig. : Seuil de significativité, F values : Valeurs statistiques de Fisher

Quant à la corrélation entre la température maximale et le pouvoir radiatif des feux, elle est aussi positive (0,059). Cette observation, montre qu'une augmentation de la température renforce le pouvoir radiatif des feux.

De tous ces paramètres climatiques corrélés avec le pouvoir radiatif des feux, seules l'insolation et la température maximale sont significatives au seuil de 0,05. La température moyenne mensuelle est estimée à 27,1°C entre 1976 et 2005 à la station de Savè (seule station synoptique du milieu d'étude). Les températures varient entre 22,5°C et 33°C avec une amplitude thermique moyenne de plus de 10°C. Ces températures sont plus élevées entre novembre et mars, le pic (36,9°C) étant enregistré en février alors que la plus faible valeur (23,5°C) est enregistrée en août (figure 4).

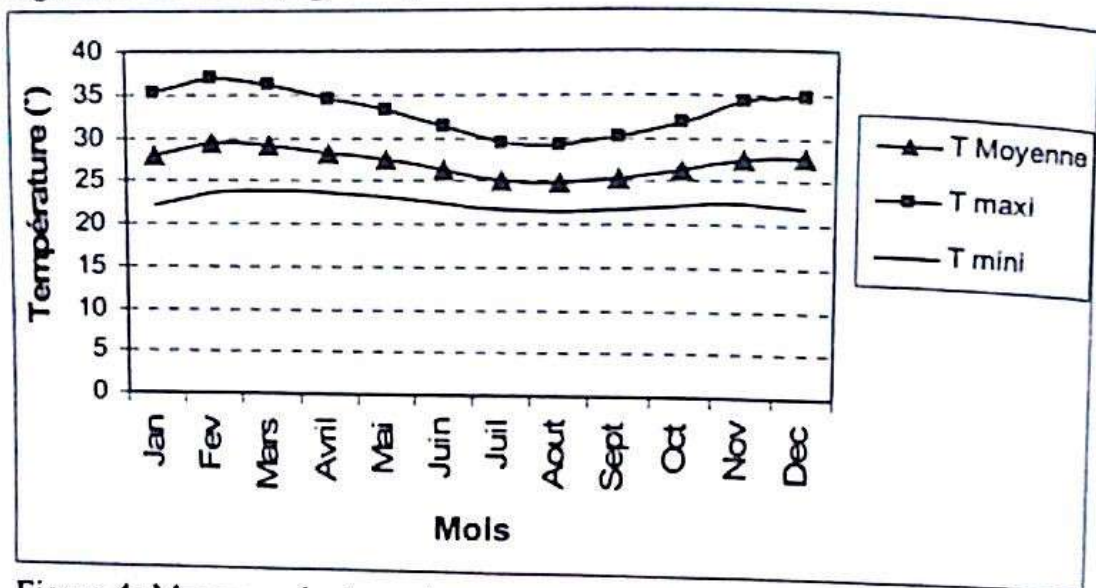


Figure 4: Moyenne des températures mensuelles entre 1976 et 2005 à Savè

Source : *Historical Weather Records- Africa*,

<http://www.tutiempo.net/en/Climate/africa.htm>, consulté le 14 décembre 2010.

Les mois de février et de mars sont généralement les plus chauds tandis que les mois de juillet et d'août enregistrent les plus faibles températures. De l'analyse de la figure 4, il ressort que les valeurs fortes des températures correspondent aux mois de saison sèche tandis que les faibles valeurs sont enregistrées pendant la saison pluvieuse. On en déduit que pendant la période sèche, période des activités intenses de feux de végétation, l'augmentation de la température assèche la végétation dont la réserve hydrique est déjà faible. Elle devient ainsi un combustible caractérisé par une forte inflammabilité. Ainsi la température maximale contribue à l'assèchement de la végétation qui est désormais exposée au feu. La moyenne de cette température maximale atteint près de 35°C dans le centre du Bénin (figure 5).

La figure 5 montre que pendant la saison sèche, le gradient des températures maximales est globalement nord-sud. L'augmentation des températures de saison sèche est aussi liée à l'insolation qui lorsqu'elle est forte, constitue un catalyseur de la sécheresse de la végétation qui brûle rapidement.

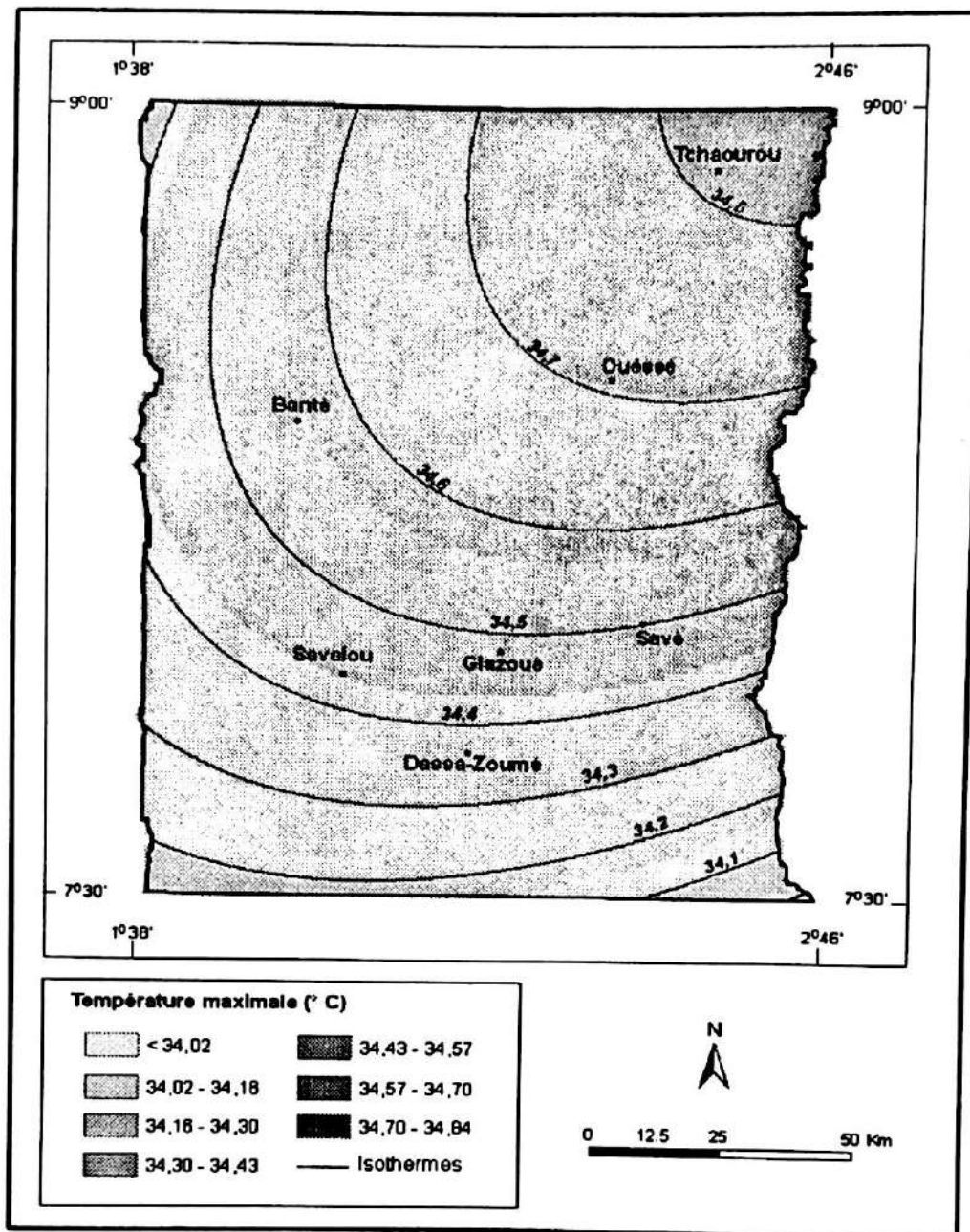


Figure 5: Evolution spatiale de la température maximale dans la zone d'étude entre novembre et février (1976 – 2005)

Source: *Historical Weather Records – Africa*. Données interpolées à partir de celles des stations de Parakou, Bohicon, Savè, des données des stations de Atakpamé, Sokodé et Kara au Togo, et des données des stations de Ibadan et de Ilorin au Nigéria

L'insolation est le temps pendant lequel un lieu est exposé au soleil. Plus spécifiquement, en météorologie, elle correspond à la durée (en heures) pendant laquelle le soleil a brillé au cours d'une journée. Au Centre du Bénin, elle varie entre 0 et 8 h et augmente au fur et à mesure que l'on évolue vers le nord (figure 6).

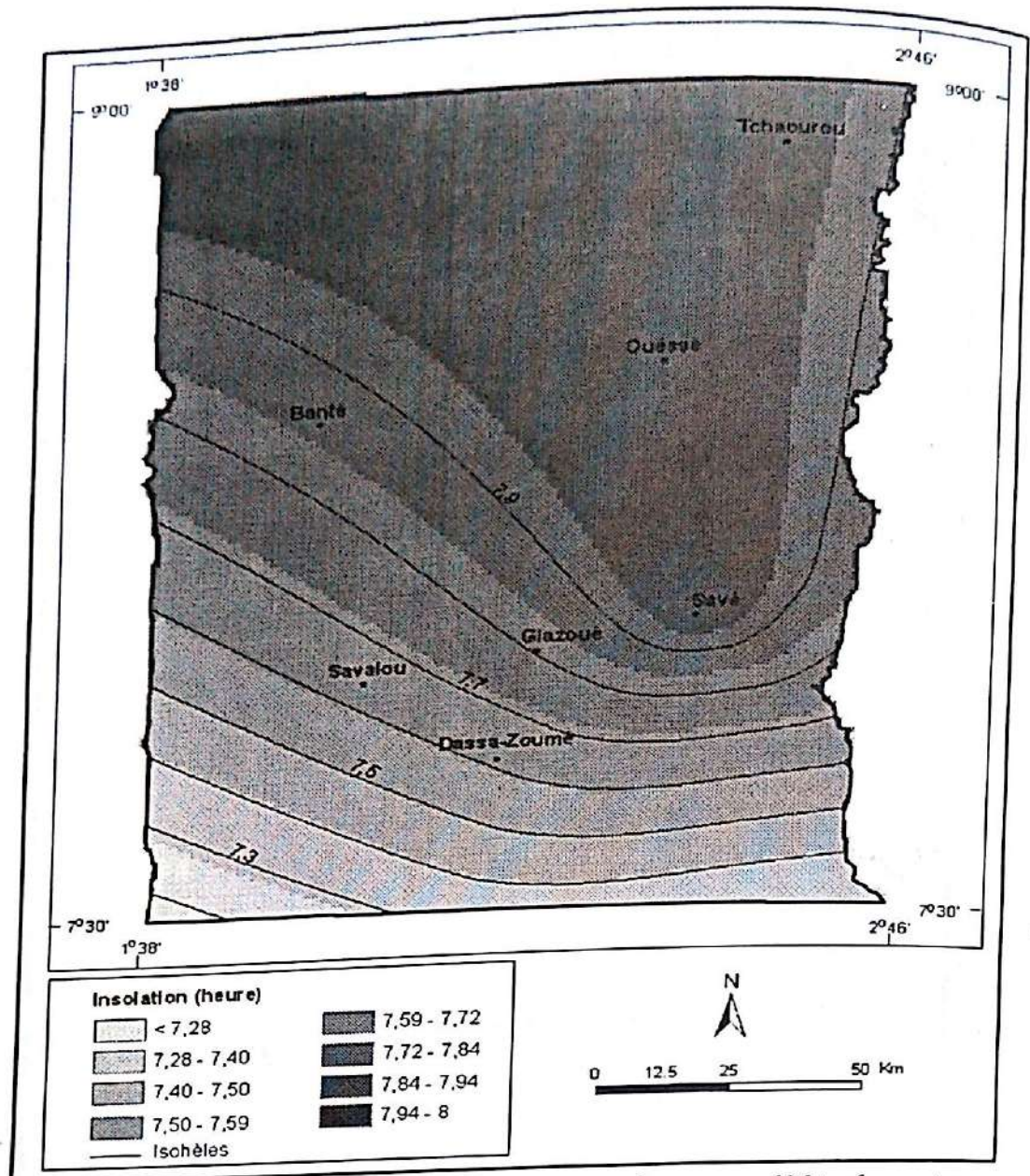


Figure 6: Évolution spatiale de l'insolation dans la zone d'étude entre novembre et février (1976 – 2005)

Source: *Historical Weather Records – Africa*. Données interpolées à partir de celles des stations de Parakou, Bohicon, Savè, des données des stations de Atakpamé, Sokodé et Kara au Togo, et des données des stations de Ibadan et de Ilorin au Nigéria

Le gradient nord-sud de l'insolation indique que le pouvoir radiatif des feux est plus élevé au nord. La végétation de cette partie est donc plus vulnérable aux feux de végétation.

Pouvoir radiatif des feux et topographie du milieu

L'influence de la pente et de l'altitude a été analysée aussi par une régression linéaire avec la corrélation de Pearson (tableau 3).

Tableau 3: Corrélation entre le Pouvoir Radiatif des Feux (PRF) et la topographie

Variables	B	Coefficient de corrélation (Pearson)	R ²	Test de Student	Sig.	F values
PRF et Pente	28,84	0,005	0,000	0,224	0,823	0,050
PRF et Altitude	24,723	0,047	0,002	2,208	0,027	4,877

Sig. : Seuil de significativité, F values : Valeurs statistiques de Fisher

La corrélation entre le pouvoir radiatif des feux et la pente est positive avec un coefficient de Pearson de 0,005. Plus la pente est élevée, plus le feu s'accélère et devient violent. En effet, l'angle entre le feu et son combustible se trouve réduit en montée et la vitesse de propagation de feu augmente. La pente modifie l'inclinaison des flammes par rapport au sol, et accélère les transferts thermiques vers la végétation située en amont. Par ailleurs, suivant le même principe, l'altitude influence aussi positivement le feu. La corrélation avec l'altitude est aussi positive et significative avec un coefficient de corrélation de 0,047. Au fur et à mesure que l'on évolue vers les zones d'altitudes plus élevées, les feux deviennent intenses. Cela confirme aussi en partie le déséquilibre qu'il y a entre les activités de feu au Sud et au Nord. Généralement les activités de feux de végétation sont plus intenses vers le Nord.

Température de surface et Indice de Végétation Normalisée (NDVI): Analyse de l'indice de sécheresse de la végétation

Le niveau de risque de feu selon l'indice de sécheresse est établi en fonction des intervalles des valeurs ajustées de la pente m , coefficient directeur entre la température et le NDVI.

La pente entre la température de surface et le NDVI est de -0,024 montrant une corrélation négative entre ces deux paramètres (tableau 4).

Tableau 4: Corrélation entre la température de surface Ts et le NDVI

Variables	B	Coefficient de corrélation (Pearson)	R ²	Test de Student	Sig.	F values
Température maximale et NDVI	50,525	-0,024	0,001	1,355	0,176	1,826

Sig. : Seuil de significativité, F values : Valeurs statistiques de Fisher

L'équation de la régression linéaire est de la forme $T_s = m \cdot NDVI + n$, avec T_s la température de surface, m le coefficient directeur, NDVI l'indice de la végétation normalisée et n l'interception.

Connaissant la valeur de la température et celle du NDVI à chaque point de feu détecté par MODIS, la valeur ajustée de m a été déterminée. L'interpolation de ces points en utilisant les nouvelles valeurs de m a permis de réaliser la carte de risque de feu suivant l'indice de sécheresse de la végétation (figure 7). Ainsi des zones à risque faible, à risque élevé et à risque très élevé de feux ont été identifiées entre novembre et février. Il ressort que tout point du milieu d'étude où existe du combustible dont la végétation sèche, en cette période précise de l'année peut être affectée par le feu, mais à des niveaux différents selon l'envergure de la température de surface qui assèche la réserve en eau de la végétation et par conséquent réduit la valeur de l'indice de la végétation normalisée (NDVI).

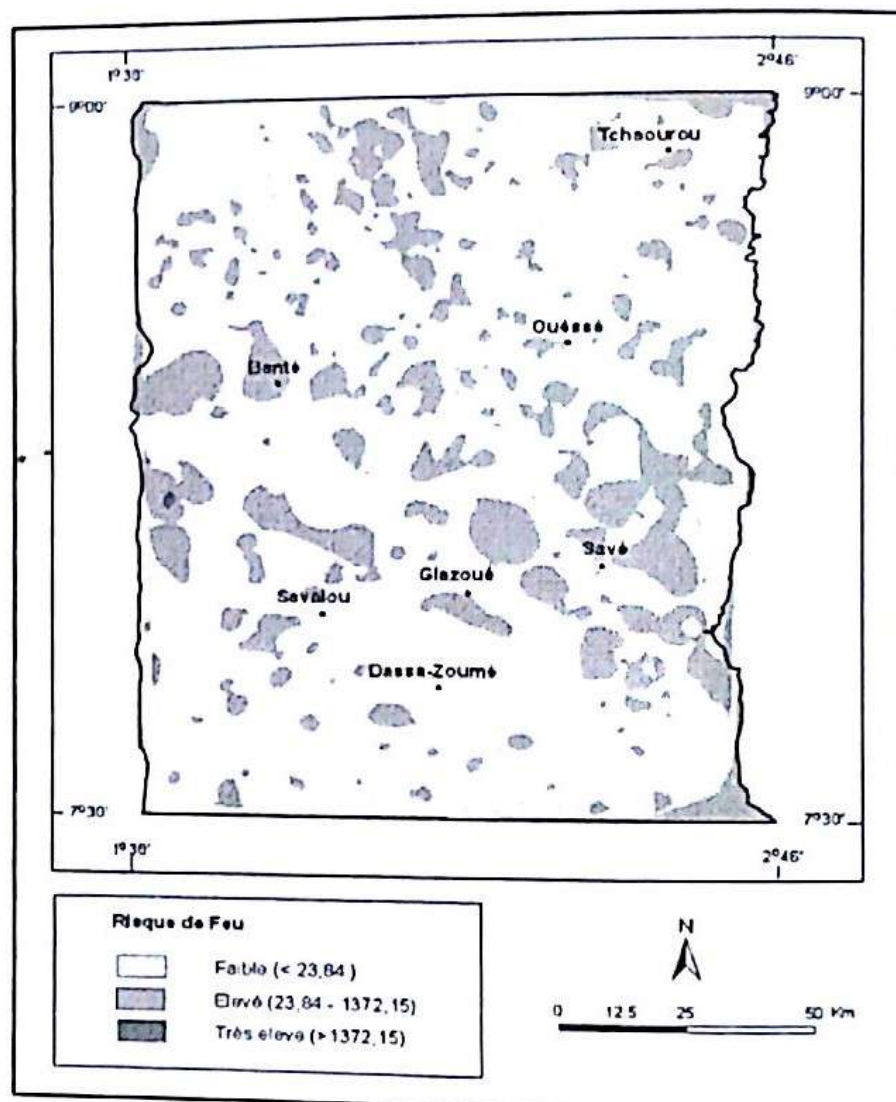


Figure 7: Niveau de risque de feu de végétation selon l'indice de sécheresse de la végétation

Discussion

Les facteurs climatiques comme la température, l'humidité de l'air, l'insolation, la précipitation, la vitesse du vent influencent fortement la capacité d'inflammation de la végétation et la propagation des feux. Mais il faudrait noter que ces conditions sont appuyées par la teneur en eau des sols et l'état de la végétation. Ainsi, une forte température, un vent violent, un déficit hydrique de la végétation sont très favorables à l'éclosion et à la propagation de l'incendie. De même, la topographie avec la pente et le niveau d'altitude sont capables d'amplifier l'ampleur des incendies. Ces résultats sont identiques à ceux obtenus par plusieurs auteurs qui ont intégré les paramètres étudiés dans les modèles de détermination des risques de feux de végétation (Carrega, 2008; Carrega *et al.*, 2007; Guettouche *et al.*, 2011; Valea, 2005; Sharples *et al.*, 2009). Il importe toutefois de signaler qu'un seul de ces paramètres n'influence pas suffisamment la propagation d'un incendie. Il faut une conjugaison et une complémentarité des effets mais aussi et surtout un déclenchement généralement d'origine humaine, pour que le feu soit allumé. C'est pourquoi en dehors des indices climatiques et topographiques (Carrega, 1991), il faudrait considérer aussi le facteur humain dans l'évaluation du risque d'incendie (Carrega, 2008 ; Hardy *et al.*, 2001 ; Hann *et Bunnell.*, 2001).

Par ailleurs, la présente recherche n'a considéré que l'indice de sécheresse de la végétation, ce qui n'est pas suffisant pour apprécier de façon globale le risque d'incendie. Il aurait fallu faire un bilan de l'eau des sols pour apprécier la teneur en eau des espèces végétales (Afouda, 1990 ; 2006). Toutefois, l'état de la végétation est un facteur important car il détermine à la fois son inflammabilité et sa combustibilité. Selon Colin *et al.* (2001), l'inflammabilité des végétaux joue un rôle indirect sur la mise à feu et elle est déterminée par la teneur ou la réserve en eau, en relation avec les paramètres climatiques.

Conclusion

Le présent article a montré l'influence des paramètres climatiques et des facteurs topographiques dans l'éclosion et la propagation des feux de végétation au centre du Bénin. Ainsi plus le temps est chaud, sec et venteux, plus la végétation est sèche et plus le risque de feu est aussi élevé. La topographie à travers la pente et l'altitude influence indirectement la propagation des feux. Dans les études de modélisation des risques de feu, ces facteurs doivent être pris en considération.

Les résultats confirment le rôle des facteurs climatiques et topographiques dans les risques de feux de végétation au Centre du Bénin. Cependant, il importe de faire une étude sur les risques de feu qui inclurait les paramètres des espèces végétales, et les paramètres météorologiques, le tout intégré dans un système d'information géographique. De même, les futures investigations devront considérer aussi l'indice de présence humaine car au total, les facteurs climatiques et topographiques du milieu préparent l'environnement au feu qui est déclenché intentionnellement ou non par l'homme.

Références

- Adouabou, A. B., Gallardo J., Gutierrez, A.R., Sanou, L, (2004). Propositions d'aménagement intégré de l'espace rural à partir des multiples usages écologiques, sociaux et économiques des feux de brousse : Cas du ranch de gibier de Nazinga et du Sud du Burkina Faso. Mémoire de DESS Aménagement Intégré des Territoires, Commission française pour l'UNESCO, Université Paul Sabatier de Toulouse, 37
- Afouda, F. (2006). Bilans de l'eau et applications agro-climatologiques dans le Nord Bénin. *Annales de la Faculté des Lettres, Arts et Sciences Humaines*, Université d'Abomey-Calavi (Bénin), 12 :85-101.
- Afouda, F. (1990). L'eau et les cultures dans le Bénin central et septentrional : étude de la variabilité des bilans de l'eau dans leurs relations avec le milieu rural de la savane africaine. Thèse de doctorat nouveau régime. Paris IV Sorbonne, 428.
- Alimi R. M. (2010) : Diagnostic participatif des feux de forêts au Bénin et recommandations pour une stratégie nationale de gestion des feux de forêts, Document de travail sur la gestion des feux, MEPN - FAO, Cotonou, Bénin, 108 p.
- Bigot S., Brou T. Y., Oszwald J. et Diedhiou A. (2005). Facteurs de la variabilité pluviométrique en Côte d'Ivoire et relations avec certaines modifications environnementales. *Sécheresse*, 16 (1) : 5-13.
- Bigot S., Brou T Y., Diedhiou A. et Laganier R. (1999). Détection des feux de végétation en Côte d'Ivoire à partir des données AVHRR et ATSR : relations avec le NDVI et les précipitations. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 12 : 209-218.
- Boko, M., (1988). Climat et communautés rurales au Bénin, rythmes climatiques et rythmes de développement. Thèse de doctorat d'Etat. Dijon, Université de Bourgogne. 605.

- Boissonnat J.D., Cazals, F. (2000). Natural Neighbour Coordinates of Points on a Surface, INRIA, Rapport de recherche No 4015, 29
- Bond, W.J., Midgley, G.F. , Woodward, F. I. (2003). What controls South African vegetation - climate or fire?, *South African Journal of Botany*, 69(1): 79-91
- Bossou, E. (1999). Rapport d'étude sur la problématique des feux de brousse au Bénin - MEHU-DAT, Cotonou, Bénin.
- Bowman, D. M. J. S., J. Balch, P. Artaxo, W. J. Bond, M. A. Cochrane, C. M. D'Antonio, R. DeFries, F. H. Johnston, J. E. Keeley, M. A. Krawchuk, C. A. Kull, M. Mack, M. A. Moritz, S. Pyne, C. I. Roos, C. Scott, N. S. Sodhi, T. W. Swetnam, and R. Whittaker. (2011): The human dimension of fire regimes on Earth. *Journal of Biogeography* 38 (12):2223-2236.
- Capo-Chichi, J.G., Djohossou, P. et Zanou, J. (1998). Rapport d'étude sur l'aménagement des terroirs MEHU-DAT, Cotonou, Bénin.
- Carrega, P. (2008). Le risque d'incendie de forêt en région méditerranéenne : compréhension et évolution. Actes du XX^{ie} colloque de l'Association Internationale de Climatologie. Montpellier, sept. 2008, pp. 11-23.
- Carrega, P., Jeronimo, N. (2007). Risque météorologique d'incendie de forêt et méthodes de spatialisation pour une cartographie à fine échelle. Actes du XX^{eme} colloque international de l'AIC. Tunis, sept. 2007, 7.
- Carrega, P. (199). A Meteorological Index of Forest Fire Hazard in Mediterranean
- Cisneros R., Schweizer D., Zhong S., Hammond K., Perez M.A., Guo Q., Traina S., Bytnerowicz A., Bennett D. H. (2012). Analysing the effects of the 2002 McNally fire on air quality in the San Joaquin Valley and southern Sierra Nevada, California. *International Journal of Wildland Fire* 21, 1065-1075.
- Colins, P., Japiot, M., Mariel A. (2001). Protection des forêts contre l'incendie. Fiche technique pour les pays du bassin méditerranéen. Cahier FAO conservation, Cemagref, 149
- Csiszar, I., Morisette J., et Giglio, L. (2006). Validation of active fire detection from moderate resolution satellite sensors: the MODIS example in Northern Eurasia. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(7): 1757-1764.
- Davies, D.K., Ilavajhala, S., Wong, M.M., and Justice, C.O., (2009). Fire Information for Resource Management System: Archiving and Distributing MODIS Active Fire Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47 (1): 72-79.

- Ezzine H., Saidi M., Casanova J. L., Montes A., Ghribe A. (2005). Conception et mise en place d'un système à base de données NOAA-AVHRR, pour la prévention et le suivi des incendies de forêts au Maroc. *Geo-Observateur*, 14 : 35 – 48.
- FAO, (1996). Contrôle et utilisation du feu en zones arides et subhumides africaines. Rome, Italie, 211.
- Giglio, L. (2010). MODIS Collection 5 Active Fire Product User's Guide Version 2.4. *Science Systems and Applications, Inc.*, University of Maryland, Department of Geography, 61.
- Giglio, L., Descloitres, J., Justice, C. O., and Kaufman, Y. J. (2003). An Enhanced Contextual Fire Detection Algorithm for MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 87(2-3): 273-282.
- Guettouche, M.S., Derias A., Boutiba, M., Bounif, M.A., Guendouz, M., Boudella, M. (2011). A Fire Risk Modelling and Spatialization by GIS. Application on the Forest of Bouzareah Clump, Algiers (Algeria), *Journal of Geographic Information System* 3: 255-266
- Hann, W. J., Bunnell, D. L. (2001) Fire and land management planning and implementation across multiple scales. *International Journal of Wildland Fire* 10: 389–403.
- Hardy, C. C. Schmidt , K. M., Menakis J. P., Sampson R. N. (2001). Spatial data for national fire planning and fuel management. *International Journal of Wildland Fire* 10: 353–372.
- INSAE, (2003). Troisième Recensement Général de la Population et de l'Habitation. Février 2002. Quelques résultats, Cotonou, Bénin, 9 p.
- Langner, A. Siegert, F. (2008). Spatiotemporal fire occurrence in Borneo over a period of 10 years, *Global Change Biology*, 15: 48-62.
- Laris, P. and Bakkouri A. (2008). Nouvelles leçons d'une vieille pratique: mosaïque du feu dans la savane du Mali. *Bois et Forêts des Tropiques*, 2008, N° 296 (2): 5-16
- Linsoussi, A.C. (2011). Regionalization of a Remote Sensing based Spatial Decision Support System for Bush Fire Management in Benin. PhD Thesis, University of Bonn, 176 p.
- Oloukoi, J. (2012). Utilité de la Télédétection et des Systèmes d'Information SGéographique dans l'étude de la dynamique spatiale de l'occupation des terres au Centre du Bénin. Thèse de Doctorat unique EDP/FLASH de l'Université d'Abomey-Calavi 304 p.
- Santin-Janin, H. Garel M., Chapuis, J. L., Pontier, D. (2009). Assessing the performance of NDVI as a proxy for plant biomass using non-linear models: a case study on the Kerguelen archipelago, *Polar Biol*, 32:861–871

- Sharples, J.J., McRae R.H.D., Weber R.O. , Gill, A.M. (2009). A simple index for assessing fire danger rating, *Environmental Modelling & Software*, 24: 764–774
- Sibson, R. (1981). A brief description of natural neighbor interpolations, In *Interpreting Multivariate Data* , Ed. V. Barnett, Chichester, 21-36, John Wiley.
- Tandjiékpon, A.M., (2001). Fire Situation in Bénin. *IFFN*, 25: 2-4
- Thamm H-P. 2008. Les feux de brousse au Bénin, In: Judex, M. and Thamm, H.-P. (ed.) (2008): IMPETUS Atlas Benin. Research Results 2000 - 2007. Department of Geography, University of Bonn, Germany, 97-98.
- Tucker, C.J., (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8: 127-150.
- Valea, F. & Ballouche A. (2012) Les feux de brousse en Afrique de l'Ouest: contraintes environnementales ou outil de gestion environnementale? L'exemple du Burkina Faso. *Territoires d'Afrique*, 2012, vol. 3, p. 36-47.
- Valea, F. (2005). Élaboration d'une méthode de suivi et d'analyse spatio-temporelle des feux de brousse en Afrique de l'Ouest : cas du Sénégal et du Burkina Faso. Guide méthodologique, Laboratoire d'Enseignement et de Recherche en Géomatique, Dakar, Sénégal, 93 p.
- Wooster, M. J., Roberts G., Perry G. L. W., et Kaufman, Y. J., (2005). Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release. *Journal of Geophysical Research*. 110, D24311. doi:10.1029/2005JD006318.
- Yameogo, U. (1999). Contribution à l'étude des feux comme outil de gestion dans les aires protégées. Cas des feux tardifs dans le Ranch de Gibier de Nazinga, Université d'Orléans, IRD, 118 p.
- Yacouba, D., Guangdao H., Xingping W. (2009). Assessment Of Land Use Cover Changes Using Ndvi And Dem In Puer And Simao Counties, Yunnan Province, China, *World Rural Observations* 1(2):1-11