

MODÉLISATION ET CARTOGRAPHIE DU RISQUE D'ÉCLOSION D'INCENDIE DE FORÊT DANS LE NORD-OUEST DU MAROC (RÉGION DE CHEFCHAOUEN-OUAZZANE)

Fouad ASSALI^{1*}, Hicham Mharzi ALAOUI¹, Mohamed ROUCHDI¹ & Mohamed BADRAOUI²¹ Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc² Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Maroc* Auteur correspondant. E-mail : assali.eauxetforets@gmail.com

SUMMARY.— *Modelling and mapping forest fire ignition risk in North-West Morocco (Chefchaouen-Ouazzane Region).*— This study explores the possibility of modelling and mapping the probability of forest fire ignitions on 229 000 ha of forests in Chefchaouen-Ouazzane region, located in North-West Morocco, using GIS techniques. The geographic information system was used to locate 608 forest fires recorded between 1997 and 2011. Modelling the forest fires ignitions was based on the principle which states that to produce and maintain a fire (fire triangle), there must be at the same time oxygen, fuel and the heat of combustion for exothermic reaction. The human action was apprehended by calculating a parameter called "Firing Annual Pressure (FAP)", on a 4 km² grid cell. In order to generate the final map of forest fire ignitions probability, the FAP was combined with the data on forest vegetation flammability and with those related to topoclimate, mainly aspect and wind directions. For the case study, 118 forest fires recorded during the period 2012-2013, were used to test the prediction accuracy of the forest fire ignitions probability map. Although the Chi² statistical test showed that the observed values (period 2012-2013) do not fit with the theoretical values (period 1997-2011), a major interest should be given to the results of the forest fire ignitions probability map. In fact, we were able to predict 58 % of fires reported in 2012 and 2013, for two important levels of risk, medium and high. The forest fire ignitions probability map could operationally improve the alerts processes, the lookout posts positioning and the early intervention against fires by the units in charge of initial attacks. It should be emphasized that in this study ways of improving are proposed in order to increase the accuracy of the forest fire ignitions probability map.

RÉSUMÉ.— Cette étude examine la possibilité de modélisation et de cartographie par SIG de la probabilité d'éclosion d'incendies de forêts sur une superficie forestière de 229 000 ha située dans la région de Chefchaouen-Ouazzane au nord-ouest du Maroc. Le système d'information géographique a été utilisé pour la localisation de près de 608 feux de forêt, enregistrés entre 1997 et 2011. La modélisation des éclosions des incendies de forêts est développée sur le principe que, pour produire un feu et l'entretenir (triangle du feu), il faut la présence en même temps de l'oxygène, du combustible, de la chaleur d'inflammation et de la réaction exothermique. L'action anthropique a été appréhendée par le calcul d'un paramètre appelé la pression annuelle de mise à feu (PAMF) sur une grille de 4 km². Cette PAMF a été combinée avec les données d'inflammabilité des types de végétations forestières et avec celles du topoclimat, notamment les expositions et les directions du vent, pour générer la carte finale de probabilité d'éclosion. Ensuite, les incendies de forêts enregistrés durant la période 2012-2013, au nombre de 118, ont servi pour tester la précision de prévision de la carte de probabilité d'éclosion. Bien que le test statistique Chi² montre que les valeurs observées (2012-2013) ne s'ajustent pas aux valeurs théoriques (1997-2011), la carte de probabilité d'éclosion permet cependant de prédire, pour les 2 classes importantes de risque moyen et élevé, 58 % des incendies déclarés durant les années 2012 et 2013. Cette carte pourrait, sur le plan opérationnel, améliorer les processus d'alerte et le positionnement des postes de guets et des unités d'intervention chargées des attaques initiales des feux naissants. Des voies d'amélioration sont également proposées pour augmenter sa précision.

Les incendies de forêts constituent un véritable péril naturel pour les forêts mondiales parce qu'ils les appauvrissent en détruisant chaque année, et en un temps réduit, des millions d'hectares de forêts, de bois et d'autres végétaux ainsi qu'un grand nombre d'êtres vivants (Commission de l'Environnement, 2006). Par ailleurs, ils induisent d'immenses pertes économiques, non seulement en termes de ressources détruites mais également en termes de moyens mobilisés dans les opérations d'extinction. Bien évidemment, d'autres dommages directs et indirects sont à considérer, en particulier les atteintes à la santé humaine, les perturbations sociales, la pollution de

l'environnement, la perte de la diversité biologique, les dommages aux valeurs de loisirs, les préjudices d'érosion aux terres, les dysfonctionnements phytosanitaires (apparition d'épidémies et de maladies après des incendies) (FAO, 2006).

Selon la FAO en 2007, il est signalé que la pression anthropique est la principale cause des incendies de forêts dans plusieurs pays dans le monde. En effet, la part estimée de ce facteur est de 95 % pour la Méditerranée, 90 % pour l'Asie du Sud, 85 % pour l'Amérique du Sud, 80 % pour l'Asie du Nord et 59 % pour les Balkans. Ce n'est que dans les zones très reculées du Canada et de la Russie que la foudre est la cause majeure des feux de forêts (50-70 % rapportés pour la Russie). Les causes humaines les plus fréquentes d'incendies de forêts à l'échelle internationale sont le défrichement dû aux activités agricoles, l'extraction de produits forestiers non ligneux, le développement industriel, la chasse, la négligence, les incendies criminels (FAO, 2007). La communauté internationale reconnaît l'importance de l'évaluation du risque d'incendie de forêts. La prévision du risque d'occurrence ou de propagation du feu de forêt permet d'une part, d'orienter et d'optimiser, dans le court et le moyen terme, les moyens d'investissement, notamment les infrastructures, les équipements et les opérations d'aménagement anti-feu en milieu forestier, et d'autre part, de pré-positionner les moyens d'intervention et de déclencher en temps réel le processus d'alerte.

Au Maroc, et bien que limitée par rapport aux moyennes des superficies incendiées dans d'autres pays à conditions similaires, notamment du pourtour méditerranéen, la superficie moyenne endommagée durant la dernière décennie (2003-2012) de 4300 ha/an est importante eu égard aux rôles majeurs joués par les forêts et aux difficultés de leur reconstitution et régénération dans le contexte socioéconomique et environnemental national. Le nombre moyen annuel de feux correspondant à cette même période est de 500 éclosions (HCEFLCD, 2013).

Pour faire face à l'effet impondérable et récurrent des incendies de forêts, plusieurs types de modèles, indices et algorithmes mathématiques décrivant le danger d'incendies, aussi bien le risque afférent aux probabilités de propagation et/ou d'intensité qu'à celui de l'éclosion, ont été développés à travers le monde : Van Wagner *et al.*, 1987 ; Forestry Canada Fire Danger Group, 1992 ; Illera *et al.*, 199 ; Chuvieco *et al.*, 1999 ; Bovia & Camia, 2000 ; San-Miguel-Ayanz *et al.*, 2002 ; Sebastian *et al.*, 2002 ; Syphard *et al.*, 2008. Parmi les modèles les plus connus, on peut citer FWI (Canadian Forestry Service, 1987), BEHAVE (Andrews, 1986 ; Andrews *et al.*, 2003) et FARSITE (Finney, 1998). Cependant, il faut souligner la complexité et la diversité des données relatives à l'environnement qui exigent une adaptation de ces modèles aux conditions spécifiques de chaque pays voire même pour chaque région et ce, en s'appuyant sur les bases de données disponibles (Faour *et al.*, 2006). Le comportement des feux, en termes de propagation et d'intensité, est un phénomène majoritairement physique lié principalement aux composantes traditionnelles du triangle du feu à savoir, le climat, le combustible et la topographie (Countryman, 1972). D'autre part, il ne faut pas omettre que les régimes naturels des feux de forêts ont été de plus en plus modifiés par l'homme depuis les derniers milliers d'années de sorte que, dans la plupart des régions du monde, les activités humaines sont devenues beaucoup plus responsables que les sources naturelles d'éclosions d'incendies (Crutzen & Goldammer, 1993).

Durant les deux dernières décennies, des chercheurs et scientifiques à travers le monde, ont commencé à s'intéresser davantage à des études prospectives sur des milieux forestiers connaissant une grande fréquence d'éclosion des feux en relation avec les activités humaines (agriculture, récolte de produits forestiers, campement, récréations, loisirs, ouverture de voies d'accès, etc.). Ainsi, et à titre d'exemple, plusieurs études aux USA (Californie et Arizona) et au Canada (Vancouver) se sont focalisées sur la cartographie des points d'éclosion et des lieux de probabilité d'incendies (Pew & Larsen, 2001 ; Dickson *et al.*, 2006 ; Syphard *et al.*, 2008). Les équations développées dans ces études permettent d'identifier les lieux de susceptibilité d'éclosion des feux et de cerner les facteurs liés aux pressions humaines favorisant la mise à feu (Pew & Larsen, 2001). Souvent, les informations relatives à la nature et à la charge du combustible sont les

seuls facteurs considérés dans les opérations de gestion des activités relatives à la réduction du risque d'incendies de forêts (Dickson *et al.*, 2006). La détermination des questions « où, quand et pourquoi » des éclosions des feux de forêts peut permettre aux décideurs d'améliorer, sur les plans de la prévention et de la détection, leur capacité de gestion du fléau, et par suite, faciliter l'allocation efficace des moyens d'interventions de manière à être proactif contre les feux naissants (Sande Silva *et al.*, 2010).

Le présent travail est focalisé sur l'analyse, par le biais d'un Système d'Informations Géographiques (SIG), de l'historique des points d'éclosion des incendies, couvrant la période 1997 à 2013, et leur relation avec les données écologiques (types de végétations forestières incendiées et leur degré d'inflammabilité), topo-climatiques (pente, exposition et direction du vent) et anthropiques (secteurs de forte pression de mise à feu) au nord-ouest du Maroc (région de Chefchaouen-Ouazzane). Les forêts de Chefchaouen-Ouazzane connaissent un niveau élevé d'actes de mise à feu (42 incendies/an en moyenne) par comparaison aux autres régions forestières du pays. Aussi et en l'absence actuellement de modèle d'éclosion élaboré et testé sous les conditions locales et même nationales, nous avons décidé d'appréhender ce paramètre d'éclosion grâce à la démarche présentée ci-après. L'objectif final est d'élaborer pour cette région, la carte de probabilité d'éclosion d'incendies de forêt qui permettra, sur le plan opérationnel, d'améliorer les processus d'alerte et le positionnement sur le terrain des postes de guets et des unités d'interventions chargées des attaques initiales des feux naissants.

MATÉRIEL ET MÉTHODOLOGIE

ZONE DE L'ÉTUDE

La zone d'étude de Chefchaouen-Ouazzane (Fig. 1), d'une superficie de près de 6000 km², est localisée dans la partie nord-ouest du Maroc entre les parallèles 34°25'14" et 35°32'25"N, et les méridiens 04°19'33" et 05°53'53"W. Le domaine forestier de la zone d'étude s'étend sur une superficie d'environ 229 000 ha.

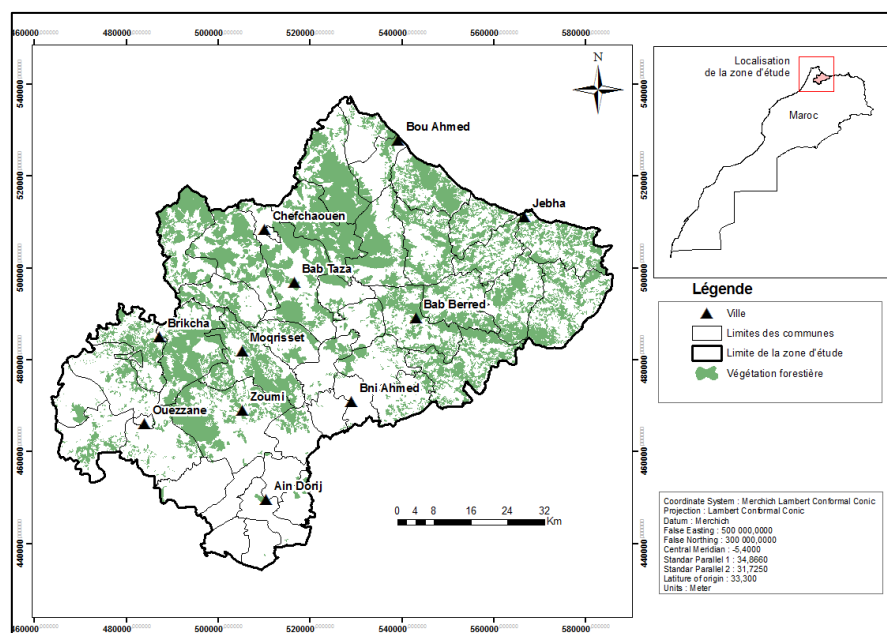


Figure 1.— Carte de localisation de la zone d'étude (Chefchaouen-Ouazzane) dans le nord-ouest du Maroc (IFN-Maroc, 2006).

TABLEAU I

Taux du couvert forestier dans la région de Chefchaouen-Ouazzane (IFN-Maroc, 2006)

Type de formations	Type d'essences	Superficie (ha)	Taux du couvert (%)
Résineuses naturelles	Cèdre	4 000	2
	Thuya	3 500	2
	Pins	10 000	4
	Sapin	3 000	1
Feuillues naturelles	Chêne vert	24 000	10
	Chêne liège	60 000	26
	Chêne zéen	3 000	1
Autres essences (+ reboisement)		31 500	14
Matorral		90 000	39
Total		229 000	100

Il est constitué par des formations à Chêne-liège (26 %), Chêne vert (10 %), Cèdre (2 %), Thuya (2 %), Sapin (1 %), Chêne zéen (1 %), Pin maritime du Maghreb, Pin noir, Pin d'Alep, Chêne tauzin, Genévrier oxycèdre, ainsi qu'un grand nombre d'espèces arbustives et herbacées (39 %) (Tab. I). Ces ressources forestières sont marquées par de très fortes pressions anthropiques. En fait, les populations riveraines considèrent que toute terre à végétation naturelle même arborée constitue un patrimoine collectif qui peut être mobilisé et par suite, défriché et mis en culture à tout moment (HCEFLCD, 2010).

Les incendies constituent pour la région de Chefchaouen-Ouazzane l'un des principaux facteurs de dégradation et de destruction des forêts. À titre indicatif, la moyenne annuelle du nombre de feux et celle des superficies endommagées, durant la période 1997-2011 s'élèvent respectivement à 41 incendies et à 666 ha/an, avec toutefois des pics ayant atteint 3484 ha en 2004 et 1734 ha en 2006 (HCEFLCD, 2013). Les éclosions des feux sont majoritairement concentrées au cours des mois de juin, juillet, août et septembre. Ces mois enregistrent 71 % des incendies déclarés dans la région et 95 % des superficies endommagées (HCEFLCD, 2013).

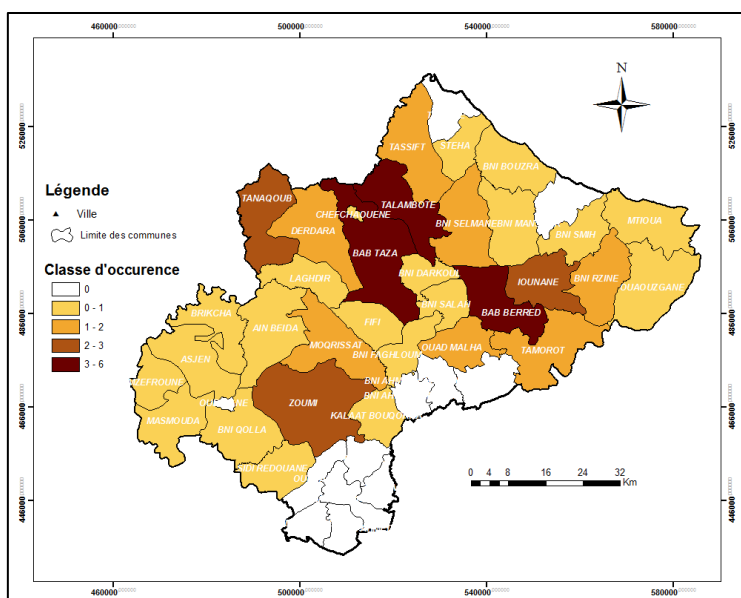


Figure 2.—Carte d'occurrence annuelle moyenne d'incendie de forêt par commune rurale (Région de Chefchaouen-Ouazzane) couvrant la période 1997-2011 (HCEFLCD, 2013).

La zone d'étude est constituée par 45 communes dont 33 sont touchées par les incendies de forêts (Fig. 2) ; 54 % des incendies déclarés et 66 % de la superficie touchée par les feux sont localisés dans les 6 communes de Bab Taza,

Talambote, Bab Berred, Zoumi, Iounane et Tanaqoub. Les rapports d'enquêtes du département des eaux et forêts du Maroc (HCEFLCD, 2013) signale que la quasi-totalité (99 %) des départs des feux en forêts dans la zone d'étude résultent de l'action de l'homme soit par imprudence soit intentionnellement pour le défrichement des espaces forestiers en vue de leur mise en culture.

COLLECTE DES DONNÉES

La réaction physique de combustion ne peut se produire que si l'on réunit trois éléments : un combustible, un comburant et une énergie d'activation. On représente de façon symbolique cette association par le triangle du feu (Countryman, 1972). Nous nous sommes basés sur ce principe pour la collecte des données ainsi que pour leur traitement.

Parmi les composantes naturelles, le vent (vitesse et direction) joue un rôle important car il réduit l'angle entre les flammes et la végétation au sol. La végétation intervient par son inflammabilité et sa combustibilité. Le relief joue également un rôle à double titre ; la pente modifie l'inclinaison des flammes par rapport au sol, ce qui favorise les transferts thermiques vers la végétation située en amont, et l'exposition détermine des versants chauds ou frais, ainsi que des zones exposées au vent dominant (Jappiot *et al.*, 2003).

Pour cette étude, la carte de probabilité d'éclosion a été réalisée par la collecte, le traitement et l'incorporation des données numériques indiquées ci-après (Tab. II) :

TABLEAU II

Données et variables analysées

Nature de la donnée disponible	Résolution	Source	Description
Points d'éclosion des feux	Point	HCEFLCD, 2013 (Service de la protection des forêts)	N = 608 entre 1997-2011 (pour l'élaboration du modèle) N = 118 entre 2012-2013 (pour tester le modèle)
Exposition et pente	30 m	Dérivée à partir du Modèle Numérique de Terrain (ANCFCC), 2008	-
Type de végétation et son inflammabilité	Polygone	- IFN-Maroc, 1996 - FAO (rapports de M. Benabid, et M. D. Alexandrian de 2007) - HCEFLCD, 2013 (Service de la protection des forêts)	-
Direction du vent à 10 m de hauteur	Grille de Point (5 km)	DMN-Maroc, 2011	Interpolation de chaque point de grille en utilisant la DIP (Distance Inverse Pondérée ou IDW en anglais).

HCEFLCD : Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification.

IFN : Inventaire Forestier National.

ANCFCC : Agence Nationale de la Conservation Foncière, du Cadastre et de la Cartographie.

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture.

DMN : Direction de la Météorologie Nationale.

N : Nombre d'incendies déclarés dans la zone d'étude.

IDW : Inverse Distance Weighted (ArcGis, Copyright).

- la base de données (BD) de type alphanumérique de l'historique régional des incendies (1997 à 2013), récupérée du service de la protection des forêts du HCEFLCD. On recense sur cette période 726 points d'éclosion. Chaque point d'incendie possède ses propres métadonnées relatives à l'heure d'éclosion, le jour, le mois, l'année, la superficie brûlée, l'espèce végétale endommagée et la cause présumée ;

- l'exposition et la pente dérivées à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT). Ce MNT, datant de 2008 et d'une résolution de 30 m, a été obtenu auprès de l'Agence Nationale de la Conservation Foncière, du Cadastre et de la Cartographie du Maroc (ANCFCC) ;

- l'inflammabilité des espèces végétales, obtenue suite à des missions de prospection de terrain et par la transformation (via une clé de conversion) de la carte des types de peuplements (Inventaire Forestier National, IFN) en une carte de types de combustibles ;

- la direction dominante du vent à 10 m de hauteur sur une grille de 5 km (à la date d'éclosion). Ces données ont été obtenues auprès de la division du système d'information de la Direction de la Météorologie Nationale (DMN, Casablanca, Maroc).

MODÉLISATION DE LA CARTE DE PROBABILITÉ D'ÉCLOSION

Les principales composantes du risque à prendre en compte dans la cartographie de l'aléa « feu de forêt » sont les activités humaines, les facteurs climatiques, la végétation et la topographie (Jappiot *et al.*, 2003). Pour notre cas spécifique, l'indice de probabilité d'éclosion a été élaboré par la combinaison des données de 3 cartes, à savoir :

- la carte l'inflammabilité des types de combustible ;

- la carte des zones de grande pression de mise à feu (zones privilégiées de déclenchement des feux) ;
- la carte du topo-climat pour l'appréhension des expositions sèches et ventées à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT) et des données météorologiques des journées dites « de référence », ayant connu une grande fréquence d'incendies.

Le diagramme fonctionnel simplifié ci-après (Fig. 3), interconnecte les principales tâches réalisées et les types de cartes produites.

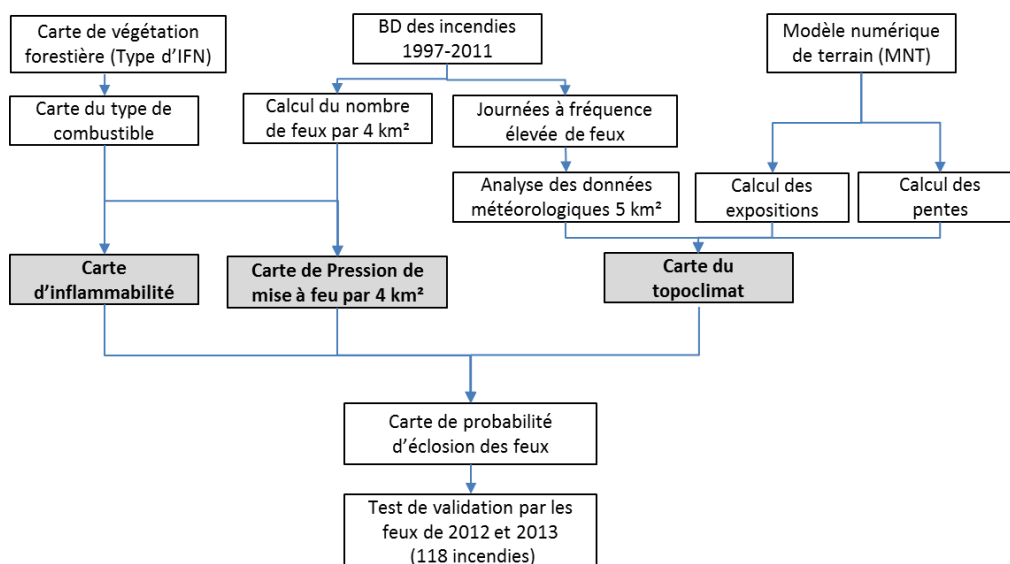


Figure 3.— Diagramme fonctionnel simplifié de traitement des données pour l'élaboration de la carte de probabilité d'éclosion dans la région de Chefchaouen-Ouazzane.

Carte de pression annuelle de mise à feu (PAMF)

L'occupation humaine imprime sur l'espace des pressions qui, lorsqu'elles s'appuient sur un type de végétation sensible avec des conditions climatiques propices, provoquent une éclosion d'incendie. Le feu est ainsi le produit d'un système de forces sociales et environnementales en interaction. Plus l'espace est occupé et utilisé, plus les probabilités d'éclosion augmentent (Mangiavillano, 2010).

Pour notre cas d'étude, les données initiales présentaient différentes échelles et résolutions. Par souci de leur uniformisation, l'ensemble du territoire de la zone d'étude a été subdivisé en unités de carreaux à surface égale de 4 km², qu'on a appelées cellules de grille. La résolution spatiale des cartes finales est donc de 2 km. Le choix de cette surface de 4 km² est lié au fait que lorsqu'on distribue aléatoirement le total des feux enregistrés sur l'ensemble du territoire boisé, on aurait un seul incendie par unité de surface égale (distribution de l'espace en grille). Cette surface de grille a donc été obtenue en divisant la surface totale boisée de la zone d'étude (soit 229 000 ha) par le nombre total des incendies enregistrés durant 15 ans, entre 1997 et 2011 (soit 608 incendies de forêts) (Fig. 4).

Ensuite, nous avons calculé au niveau de chaque cellule de grille de 4 km², la surface boisée correspondante et le nombre moyen annuel de feux durant les 15 années (1997-2011). Ces deux paramètres ont été utilisés pour calculer la Pression Annuelle de Mise en Feu pour chaque cellule de grille de 4 km² (PAMFp), selon la formule (1.1) ci-dessous :

$$PAMFp = \frac{M_f}{S_{bp}}$$

Avec :

PAMFp : pression annuelle de mise à feu par cellule de grille de 4 km² ;

S_{bp} : surface boisée de la cellule de grille de 4 km² ;

M_f : moyenne annuelle du nombre de feux durant les 15 années par cellule de grille de 4 km².

Nous avons attribué aux cellules de la grille sans feux de forêts, mais possédant des surfaces boisées, la valeur minimale de la PAMF de la zone d'étude. Ceci est justifié par le fait qu'aucune surface boisée ne possède le risque d'éclosion d'incendies égal à '0' (Alexandrian, 2007).

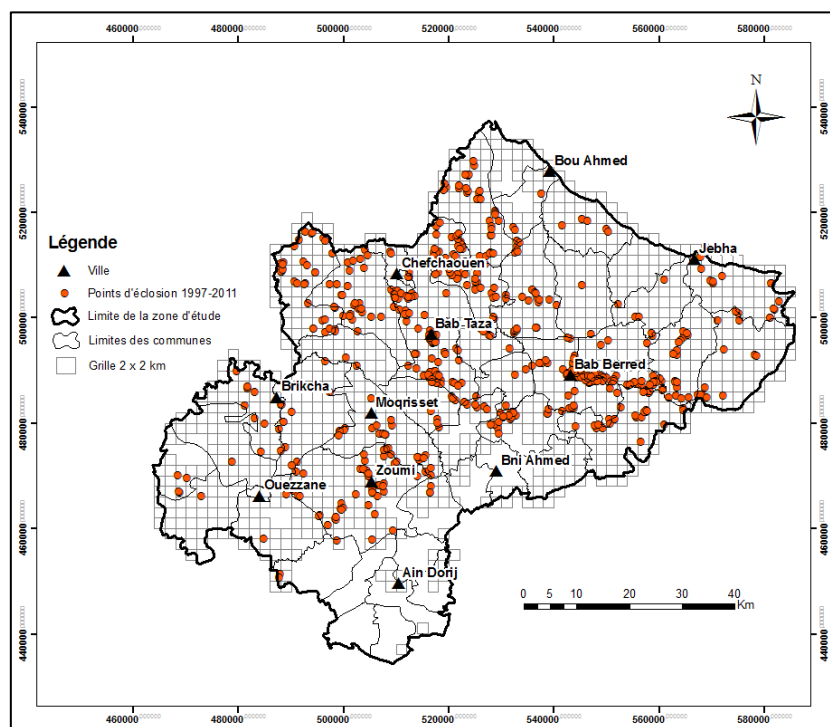


Figure 4.— Carte de localisation des cellules de grille et des incendies enregistrés à Chefchaouen-Ouazzane durant la période 1997-2011.

Carte du topoclimat

Les périodes de sécheresse et les épisodes de vents forts sont favorables à l'écllosion des incendies. Le vent accélère le dessèchement des sols et des végétaux et augmente les risques de mises à feu. La chaleur dessèche les végétaux par évaporation et provoque, lors des périodes les plus chaudes, la libération d'essences volatiles, à l'origine de la propagation des flammes (MAP, 2006).

Pour ce qui est de la *composante climatique*, il faut répondre à deux questions fondamentales : (1) quel est le type de données climatiques susceptible d'être pris en considération dans la modélisation de la probabilité d'écllosion des feux de forêts ? et (2) pour quelle fréquence (mensuelle, journalière et/ou horaire) ?

Les feux estivaux interviennent surtout au cours des mois de juin, juillet, août, septembre (Fig. 5) et dans la fenêtre horaire 13 h - 17 h (51,5 % des départs de feu) pour laquelle on enregistre 62 % de la superficie incendiée (Fig. 6). Par conséquent, nous avons limité le choix des données climatiques à cette période de la journée et aux cas ayant connu une fréquence élevée d'éclussions

Après dépouillement de la base de données, il a été identifié 43 journées dites « de référence », durant lesquelles est enregistrée une fréquence élevée d'éclussions de feux, variant de 2 à 6 incendies par jour. Les incendies des journées de référence, au nombre de 108, ont été enregistrés entre 13 h et 17 h et ont endommagé une superficie cumulée de 6170 ha.

Du fait de l'existence d'une seule station météorologique synoptique à l'échelle de la zone d'étude (située dans la ville de Chefchaouen, loin des massifs forestiers incendiés), il a plutôt été procédé à l'extraction des données météorologiques (température, hygrométrie, vitesse et direction du vent, pluviométrie) correspondant aux 43 journées de référence, à partir du modèle de prévision de la DMN du Maroc. Les principales caractéristiques de ce modèle de prévision, dit "ALBACHIR", sont les suivantes (Haddouch, 2011) :

- il est couplé avec le modèle global ARPEGE (Météo-France), la fréquence du couplage étant de 3 heures ;
- il utilise une représentation spectrale de Fourier dans les deux directions méridienne et zonale ;
- l'intégration temporelle utilise le schéma semi-implicite, semi-Lagrangien qui permet d'utiliser des pas de temps relativement longs.

En référence aux travaux d'Alexandrian (2007) et également en l'absence d'une étude d'analyse statistique de corrélation entre les conditions météorologiques et les éclussions des feux de forêts au niveau de la zone d'étude, nous avons opté pour le choix de n'utiliser que la direction du vent pour approcher l'effet du topoclimat. En effet, le but est simplement d'appréhender les zones ventées et sèches, et plus précisément de mettre en évidence si la direction du vent, en tant que facteur favorisant, aggrave ou au contraire atténue la xéricité des versants sud. Aussi, l'utilisation du vent est justifiée par

ses effets mécaniques sur le feu et leurs conséquences sur l'apport supplémentaire d'oxygène (Carrega, 1988). Le vent (vitesse et direction) joue également un rôle important car il réduit l'angle entre les flammes et la végétation au sol, et favorise ainsi le transport des particules en avant du front de flammes (Colin *et al.*, 2002).

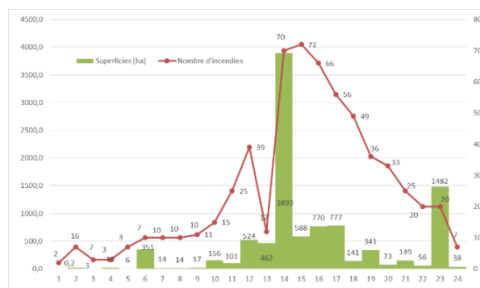
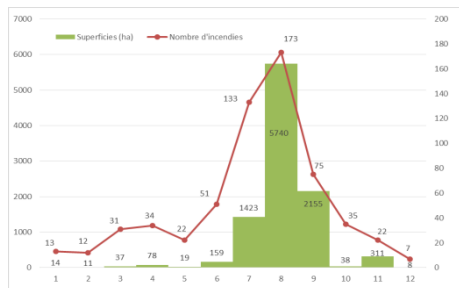


Figure 5 (à gauche).—Évolution mensuelle du cumul du nombre de feux et de la surface brûlée dans la région de Chefchaouen-Ouazzane (1997-2011).

Figure 6 (à droite).— Évolution du cumul du nombre de feux et de la surface brûlée par tranche horaire dans la région de Chefchaouen-Ouazzane (1997-2011).

Ainsi, l'opération d'extraction des directions de vent, à partir du modèle précité, sur une grille de 5 km de résolution, a permis d'obtenir, sur la totalité de la zone d'étude, 723 points de grille de prévisions numériques (sorties du modèle) nécessaires à la détermination des conditions de référence. Ensuite, pour les 43 journées de référence sélectionnées, il a été déterminé pour chaque point de grille, la direction de vent la plus fréquente aux heures d'éclosion des feux. Les résultats montrent que sur l'ensemble de l'échantillon (723 points x 43 jours), les directions de vent les plus fréquentes correspondent clairement au vent de direction ouest (valeurs comprises entre 240° et 300°, Fig.7).

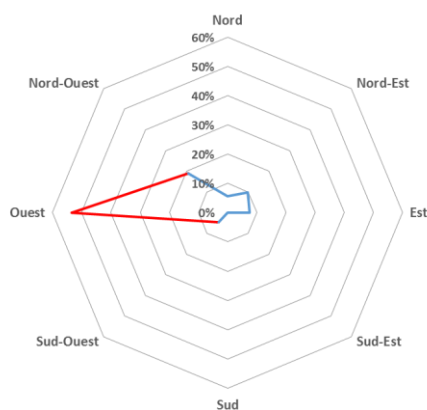


Figure 7.— Fréquence des directions de vent (en dizaines de degrés) dans la région de Chefchaouen-Ouazzane pour les 43 journées de référence.

La *composante topographique* a été prise en considération grâce à deux paramètres prépondérants, la pente et l'exposition. En effet, la pente influence la vitesse de propagation d'un feu qui peut être tout à fait différente selon que le feu gravit ou descend une pente. L'exposition est généralement prise en compte pour distinguer les zones ventées. Elle peut également servir à déterminer les zones exposées au sud, qui sont plus ensoleillées et donc plus sèches (MAP, 2006).

Pour notre cas, les données des expositions (en dizaines de degrés) sont extraites à partir du modèle numérique de terrain (30 m de résolution). Elles sont ensuite classées avant leur intégration dans la formule retenue, selon le gradient découpé en 4 niveaux : 1) 315° à 360° et 0 à 45° (Nord), 2) 45° à 135° (Est), 3) 135° à 225° (Sud) et 4) 225° à 315° (Ouest). Tout terrain dont la pente est inférieure à 5 % est considéré plat.

La carte du topoclimat est générée par la combinaison des deux cartes des expositions et de la direction de vent (en dizaines de degrés), selon la formule (2.2) ci-après (Alexandrian, 2007) :

$$\text{Indice topoclimatique} = 2 + \text{Cos}(\text{exposition} - \text{direction vent}) + \text{Cos}(\text{exposition} - 180)$$

Carte de l'inflammabilité

L'inflammabilité caractérise la facilité avec laquelle le matériel végétal prend feu sous l'action d'une source de chaleur. Elle varie en fonction de sa composition floristique, de sa structure, de sa biomasse, de l'état des matériaux qui le composent (individus vivants et morts), et des facteurs du milieu (climat, sol, topographie), ainsi que de l'histoire du paysage (l'action passée de l'homme en particulier). L'inflammabilité est mesurée de façon conventionnelle par un épi-radiateur. Le principe est de calculer le temps, mesuré en secondes, qui s'écoule entre le dépôt du matériel végétal à la surface de l'épi-radiateur et l'apparition des premières flammes. L'inflammabilité d'une formation végétale est celle de l'espèce la plus inflammable, si elle est représentée en proportion suffisante (Trabaud, 1976).

Pour l'élaboration de la carte d'inflammabilité de la végétation forestière de la zone d'étude, nous nous sommes appuyés sur les résultats de l'étude réalisée en 2007 par M.D. Alexandrian et M.A. Benabid pour la cartographie des risques d'incendies de forêts des régions du nord du Maroc. Ces deux experts se sont basés sur les données de l'inventaire forestier national (IFN) du Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification (HCEFLCD) combinées à des résultats de travaux de terrain pour transformer la carte des types de peuplement (ou IFN) en une carte de types de combustible. La région de Chefchaouen-Ouazzane, couverte par 229 000 ha de forêts, est constituée par 50 types de peuplements.

Cette carte des types de peuplements, élaborée à l'échelle nationale par le HCEFLCD, est utilisée pour caractériser la végétation forestière au Maroc et connaître les potentialités du milieu. Cependant, nous avons constaté que cette carte des types de peuplements n'intègre pas les informations relatives à la continuité verticale de la végétation, telles que, par exemple, des données sur la litière, la nécromasse ainsi que les strates herbacées et arbustives qui contribuent directement et significativement aux processus d'éclosion des feux de forêts et à leur propagation.

L'opération de transformation de la carte des types de peuplements en une carte de types de combustibles s'est effectuée à l'aide d'une « clé de conversion » qui permet la description verticale de la structure et de la composition floristique de chaque type. Les travaux de terrain ont été conduits selon un échantillonnage bien défini tributaire de l'accessibilité, de la densité et de la diversité du type de combustible (Benabid, 2007). Les tableaux III et IV illustrent un exemple du processus de conversion d'un type d'IFN (Qs-H1-F) en un type de combustible (QsH1F) à base d'espèces de Chêne-liège, d'*Erica arborea* et d'*Arbutus unedo*. Il est procédé à la description verticale de chaque type d'IFN en identifiant (Tab. IV) :

TABLEAU III

Exemple de description d'un type d'IFN codifié comme une Futaie dense de chêne liège "Qs-H1-F" (IFN-Maroc, 1996)

Type	Symbole	Données descriptives
Type IFN	Qs-H1-F	Qs-H1-F [= une Futaie dense de chêne liège] - Qs : <i>Quercus suber</i> [Espèce dominante ayant un taux de recouvrement >75%]. - Hauteur : Haut (H), si hauteur >2m, ou bien, Bas (B) si hauteur <2m. - Densité : Dense (1) ; Moyennement dense (2) ; Faible densité (3). - Régime de traitement : Futaie (F) ; Taillis (Taillis).

TABLEAU IV

Exemple de conversion d'un type de peuplement (ou type d'IFN) « Qs-H1-F » en un type de combustible (Benabid, 2007)

Type de combustible	Espèces (1 à N)	Inflammabilité (2 à 9)	Hauteur (m)	Recouvrement (%)	Nécromasse (%)	Litière (%)
QsH1F (même nomenclature que le type d'IFN)	<i>Quercus suber</i>	7	8	70		
	<i>Erica arborea</i>	7	3	30	10	70
	<i>Arbutus unedo</i>	4	3	50		

- les espèces végétales (variant de 1 à 7 selon les cas rencontrés dans la zone d'étude) qui le constituent, leurs inflammabilités (sur une échelle de 9), leurs hauteurs (en mètre) et leurs recouvrements respectifs (en pourcentage) ;

- puis les recouvrements de la nécromasse et de la litière (en pourcentage).

Pour chaque espèce végétale identifiée, il lui est attribué une note d'inflammabilité (de 2 à 9) en concordance avec les résultats d'autres études réalisées dans des conditions similaires, notamment celles au sud de la France et de l'Espagne. Une note intégratrice d'inflammabilité (formule 3.3.) est ensuite attribuée au type de combustible reflétant la moyenne des inflammabilités des différentes espèces (possédant une hauteur inférieure à 5 m) proportionnellement à leur recouvrement (Alexandrian, 2007).

Inflammabilité du type de combustible = [Inflammabilité des espèces à hauteur de moins de 5 m] + [Inflammabilité de la litière] - K

$$\text{Inflammabilité} = \left[\frac{\sum (I_i \times K_i \times R_i)}{\sum (K_i \times R_i)} \right] + [I_L \times L/100] - K$$

Avec :

- Ki : coefficient prenant la valeur 0 ou 1 (1 si la hauteur est de moins de 5 m, 0 si la hauteur est supérieure à 5 m) pour l'espèce i ;
- Ri : recouvrement de l'espèce i ;
- li : inflammabilité de l'espèce i ;
- IL : inflammabilité de la litière (valeur moyenne égale à 5 par défaut) ;
- L : recouvrement de la litière exprimé en %. Le recouvrement est divisé par 100 pour retrouver les mêmes valeurs calculées dans le 1^{er} bloc de la formule (la moyenne des inflammabilités des différentes espèces proportionnellement à leur recouvrement) ;
- K : constante dont la valeur attribuée est de 2 pour garder la fourchette de la variation des valeurs de l'inflammabilité des types IFN entre 2 et 9.

Pour ce calcul de l'inflammabilité du groupement végétal (formule 3.3.), il n'a été considéré ici que les espèces qui participent en grande partie au processus d'alimentation de la source de chaleur et du maintien de son activité, et qui sont celles possédant une hauteur de moins de 5 m (coefficient K avec des valeurs 0 ou 1). En effet, le feu ne prend presque jamais au niveau des cimes des arbres (Alexandrian, 2007).

Carte de prévision du risque d'éclosion

Il est considéré dans les sciences de modélisation et de simulation des éclosions et des propagations des incendies de forêts que pour produire un feu et l'entretenir (triangle du feu), il faut la présence en même temps de l'oxygène, du combustible, de la chaleur d'inflammation et de la réaction exothermique (Countryman, 1972).

La formule adoptée (Alexandrian, 2007) pour le calcul de l'indice de la probabilité d'éclosion est la suivante (4.4) :

$$I (PE) = Tc \cdot I_f \cdot PAMF$$

Avec :

- I (PE) : Indice de la probabilité d'éclosion ;
- Tc : Topoclimat ;
- I_f : Inflammabilité des espèces ;
- PAMF : Pression annuelle de mise à feu.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

CARTE DE PRESSION ANNUELLE DE MISE À FEU (PAMF)

La carte de PAMF a été générée en appliquant la formule [1.1] et en utilisant 5 classes (Fig. 8), du niveau très faible à très élevé. La classification des valeurs de la PAMF adoptée est celle à fréquence égale, de manière à ce que la valeur du centre de chaque classe s'approche de la représentabilité de l'ensemble des valeurs de la classe (Tab. V).

TABLEAU V

Répartition des superficies forestières de Chefchaouen-Ouazzane en fonction des classes de PAMF (1997-2011)

Classe	Nombre de feux par km ²	Nombre de feux par 100 km ²	Superficie boisée (ha)	Superficie boisée (%)
Très Faible	0,008 – 0,02	<= 2	168 345	74
Faible	0,02 – 0,05	2 - 5	34 695	15
Moyenne	0,05 – 0,07	5 - 7	9 679	4
Elevée	0,07 – 0,17	7 - 17	13 892	6
Très Elevée	0,17 – 1,12	17 - 112	2 389	1
Total	-	-	229 000	100

Seulement 11 % du territoire de la zone d'étude (Tab. V) connaît une pression de mise à feu moyenne à très élevée, soit une superficie forestière de 25 960 ha. Corroborant les figures 2 et 8, ce sont bien les communes de Bab Taza, Talambote, Bab Berred, Zoumi, Iounane et Tanaqoub qui connaissent une pression incendiaire élevée. Les points d'éclosion au niveau de ces communes sont récurrents et spatialement regroupés ; en effet, durant la période 1997-2011, une fréquence de 15 feux de forêt par 4 km² a été atteinte au niveau de ces sites. D'ailleurs Grenton (2006) a démontré que les incendies suspectés comme étant d'origine criminelle sont spatialement plus

regroupés que ceux produits par allumage involontaires ou par d'autres causes accidentelles (Grenton et al.,2006).

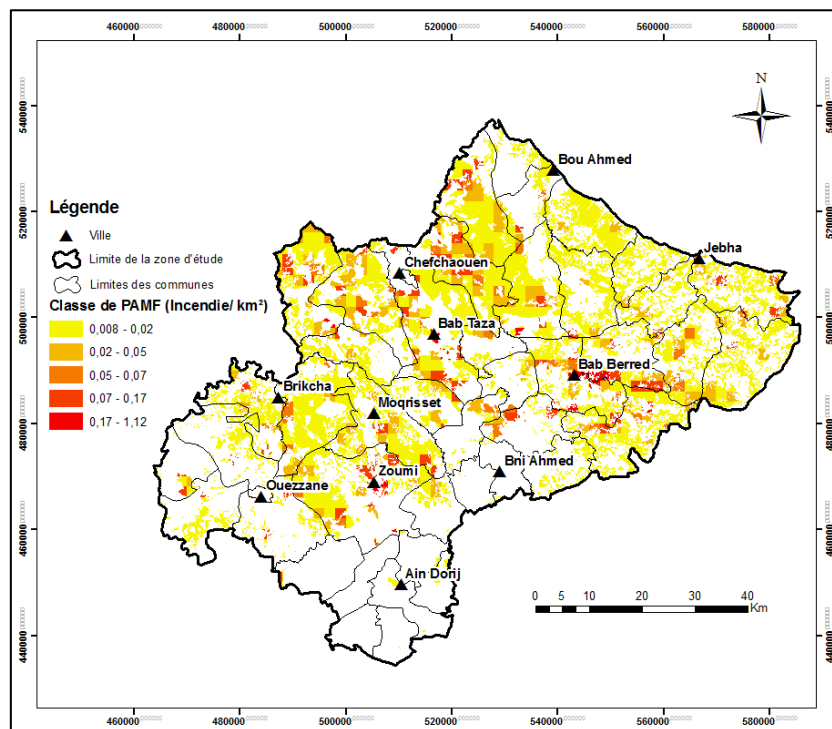


Figure 8.— Carte de la pression annuelle de mise à feu (PAMF) de la région de Chefchaouen-Ouazzane sur la période moyenne 1997-2011.

CARTE DU TOPOCLIMAT

La carte du topoclimat (Fig. 9) a été générée en appliquant la formule [2.2]. Les valeurs de l'indice du topoclimat varient entre 1 et 4, la valeur maximale signifiant que le site forestier en question a une exposition sud (sèche) et que le vent provient également du sud ; cet effet combiné des deux paramètres est le plus propice à l'éclosion des incendies, et 29 % de la superficie forestière de la zone d'étude (soit 65 496 ha) possède un indice topoclimatique 4 (Tab. VI).

TABLEAU VI

Répartition des superficies forestières de Chefchaouen-Ouazzane en fonction de l'indice du topoclimat (1997-2011)

Indice du topoclimat	Superficie forestière		Incendies 1997-2011	
	Hectares	Pourcentage	Nombre	Pourcentage
1	9 573	4	48	8
2	70 201	31	165	27
3	83 473	36	193	32
4	65 496	29	202	33
Total	228 743	100	608	100

Les sites forestiers possédant des indices 3 et 4 sont situés majoritairement au centre et au sud-ouest de la zone d'étude, couvrant les communes habituellement connues pour leur grande occurrence de mises à feu, à savoir Bab Taza, Talambote, Bab Berred, Zoumi et Tanaqoub (Fig.

5). Et 65 % des incendies déclarés sur la période 1997-2011 sont situés dans des sites forestiers possédant un indice climatique 3 et 4 (Tab. VI).

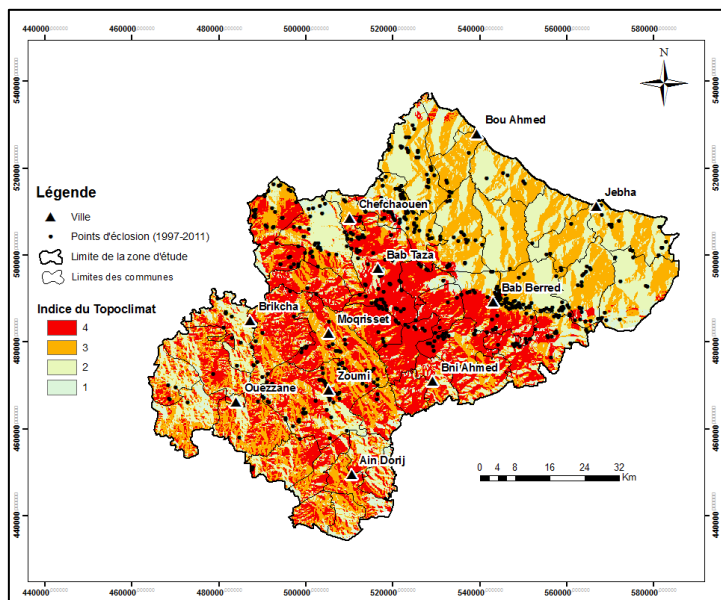


Figure 9.— Carte d'indice du topoclimat de la région de Chefchaouen-Ouazzane (1997-2011).

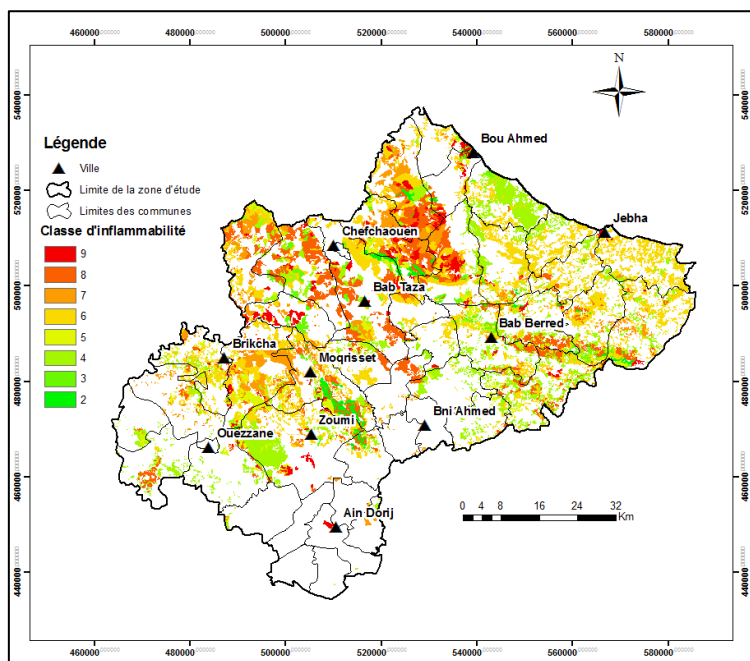


Figure 10.— Carte d'inflammabilité de la végétation forestière de la région de Chefchaouen-Ouazzane (1997-2011).

CARTE DE L'INFLAMMABILITÉ DES TYPES DE COMBUSTIBLE

La carte de l'inflammabilité des espèces forestières (Fig. 10) a été obtenue en utilisant la formule [3.3]. 34 % (76 000 ha) du territoire de la zone d'étude (Fig. 10 & 11) est constitué d'espèces à inflammabilité élevée, à savoir les indices 7, 8 et 9, cumulant 38 % des incendies de la période 1997-2011. Pour ces sites à inflammabilité élevée, la végétation forestière dominante est constituée essentiellement de reboisement résineux, de Pin pignon, de Chêne-liège, de Chêne Kermès et du matorral (Garrigue).

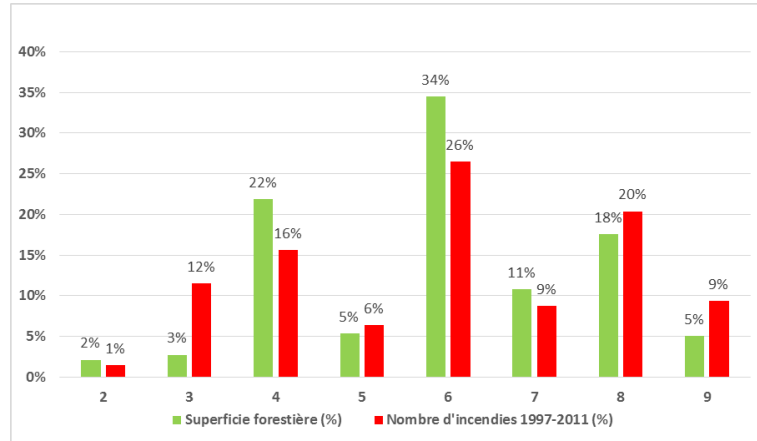


Figure 11.— Répartition de la superficie forestière de Chefchaouen-Ouazzane et du nombre d'incendies enregistrés sur la période 1997-2011, en fonction des indices d'inflammabilité (indice 2 à 9).

En termes statistiques (test $\text{Khi}^2 = 34,50$), et au seuil d'erreur de 5 % (avec un degré de liberté de 7), la répartition du pourcentage du nombre d'incendies par indice d'inflammabilité ne s'ajuste pas à la distribution du pourcentage des superficies forestières correspondantes (Fig. 11). Ce résultat affirme le fait que le processus d'éclosion des incendies de forêts dans cette zone d'étude ne s'effectue pas de manière aléatoire (*i.e.* la distribution ne suit pas celle des superficies forestières). On peut donc dire qu'il y a un effet de l'inflammabilité.

Cependant, les feux ne se déclarent pas systématiquement dans les sites possédant des indices d'inflammabilité élevés (Fig. 11). En effet, les éclosions des feux de forêts ne sont pas seulement liés aux degrés d'inflammabilité de la végétation forestière, mais également à d'autres facteurs favorisant, à savoir le climat, la topographie, les lieux de pression anthropique ou de conflits, etc.

CARTE DE PRÉVISION DU RISQUE D'ÉCLOSION

Les valeurs calculées de l'indice de probabilité d'éclosion, issues de l'utilisation de la formule [4.4], sont très élevées, puisque la pression annuelle de mise à feu (PAMF) a été multipliée par le topoclimat et l'inflammabilité ; les résultats sont alors pondérés par un coefficient général (K) pour retrouver au final la fourchette des valeurs de la PAMF (Alexandrian, 2007).

Au final, la probabilité d'éclosion (P_e) est définie ainsi (5.5) :

$$P_e = k \cdot T_c \cdot I_f \cdot \text{PAMF}$$

$$K = \frac{V_{sm}}{I_{Pe}}$$

Avec :

K : Coefficient de pondération de l'indice de la probabilité d'éclosion, égal à 0,051.

Vsm : Valeur statistique moyenne qui représente la valeur moyenne de la PAMF de l'ensemble de la zone d'étude, égale à 0,0177 incendie/km².

I.Pe : Indice moyen de la probabilité d'éclosion de la zone d'étude qui représente la valeur moyenne de l'indice de probabilité d'éclosion de la zone d'étude, égale à 0,34258 incendie/km².

Quatre classes sont retenues pour la présentation cartographique de la probabilité d'éclosion (Tab. VII & Fig. 12). Ces seuils sont communément utilisés pour hiérarchiser la « pression incendiaire » qui s'exerce sur un territoire donné (Alexandrian, 2007). Ils caractérisent une sorte d'échelle de tolérance et priorisent les secteurs à forte probabilité d'éclosion dans lesquels des efforts supplémentaires de prévention et de surveillance doivent être mis en œuvre.

TABLEAU VII

Classe de la probabilité d'éclosion et des superficies boisées correspondantes dans la région de Chefchaouen-Ouazzane (1997-2011)

Classe	Nombre de feux par km ²	Nombre de feux pour 100 km ²	Superficie boisée (ha)	Superficie boisée (%)
Très Faible	0 – 0,0067	<= 1	98 682	43
Faible	0,0067 – 0,014	1-2	67 889	30
Moyenne	0,014 – 0,04	2-4	37 712	16
Elevée	0.04 – 1,11	>4	24 717	11
Total			229 000	100

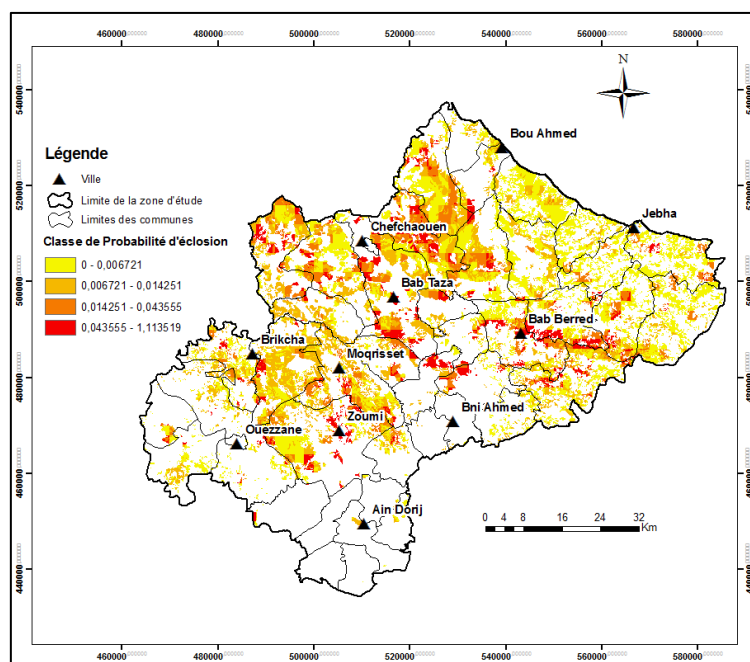


Figure 12.— Carte de la probabilité d'éclosion d'incendie de forêt de la région de Chefchaouen-Ouazzane (1997-2011).

Une fois la carte de probabilité d'éclosion générée (Fig. 12), nous avons testé sa précision de prévision en utilisant les points d'éclosions des feux des années 2012 et 2013. Il a ainsi été identifié pour chaque classe de probabilité d'éclosion (Tab. VIII) :

- les superficies forestières et les pourcentages correspondants ;

- le nombre des éclosions des feux de la période 1997-2011 et les pourcentages correspondants ;

- le nombre des éclosions des feux de la période 2012-2013 et les pourcentages correspondants.

TABLEAU VIII

Classe de la probabilité d'éclosion et des superficies boisées correspondantes pour la région de Chefchaouen-Ouazzane (1997-2013)

Classe Probabilité	Superficie forestière		Incendies 1997-2011		Incendies 2012-2013	
	Hectares	Pourcentage	Nombre	Pourcentage	Nombre	Pourcentage
Très Faible	98 682	43	22	4	32	27
Faible	67 889	30	47	8	18	15
Moyenne	37 712	16	211	35	27	23
Elevée	24 717	11	328	54	41	35
Total	229 000	100	608	100	118	100

Deux tests statistiques χ^2 sont ensuite calculés dans le but d'analyser la précision des cartes de probabilité d'éclosion :

- Le 1^{er} test détermine si la distribution des valeurs des éclosions des feux de la période 2012-2013 s'ajuste à celles des valeurs des superficies forestières (Tab. IX). Le résultat montre qu'il y a un rejet de H_0 , c'est-à-dire que la distribution des valeurs des éclosions de la période 2012-2013 n'est pas aléatoire (la distribution ne suit pas celle des superficies forestières) et qu'il y a un effet probable des classes de probabilité d'éclosion.

TABLEAU IX

Résultat du 1^{er} test statistique χ^2 relatif à la comparaison entre la distribution des valeurs des éclosions des feux de la période 2012-2013 et celles des superficies forestières (région de Chefchaouen-Ouazzane)

Classe Probabilité	Valeurs observées	Valeurs théoriques	Somme [(Obs-théorique) ² /théorique]
Très Faible	27	43	5,95
Faible	15	30	7,50
Moyenne	23	16	3,06
Elevée	35	11	52,36
Total	100	100	69

χ^2 Observé (=69) > χ^2 Théorique (=7,81)
[ddl = 3 et seuil d'erreur =5%]

TABLEAU X

Résultat du 2^{ème} test statistique χ^2 relatif à la comparaison, par classe de risque, entre la distribution des valeurs des éclosions des feux de la période 2012-2013 et celles des éclosions de la période 1997-2011 (région de Chefchaouen-Ouazzane)

Classe Probabilité	Valeurs observées	Valeurs théoriques	Somme [(Obs-théorique) ² /théorique]
Très Faible	27	4	132,25
Faible	15	8	6,13
Moyenne	23	35	4,11
Elevée	35	53	6,11
Total	100	100	148,60

χ^2 Observé (=148,6) > χ^2 Théorique (=7,81)
[ddl = 3 et seuil d'erreur =5%]

- Le 2^{ème} test détermine par classe de risque si la distribution des valeurs des éclosions des feux de la période 2012-2013 s'ajuste à celles des éclosions de la période 1997-2011 (Tab. X). Les incendies de la tranche 1997-2011 constituent l'état de référence, parce qu'ils ont servi à

l'élaboration de la carte de la pression annuelle de mise à feu (PAMF) et à la génération de la carte de la probabilité d'éclosion dans la zone d'étude. La distribution de ces valeurs théoriques (1997-2011) à travers les différentes classes de risque est normale et logique (la distribution suit le gradient du risque), avec respectivement, 4 % pour la classe très faible, 8 % pour la classe faible, 35 % pour la classe moyenne et 54 % pour la classe élevée. Le résultat du test statistique [test $\chi^2 = 148$, au seuil d'erreur de 5 % et avec un degré de liberté de 3] montre qu'il y a aussi un rejet de H_0 , c'est-à-dire que la distribution des valeurs des éclosions de la période 2012-2013 ne s'ajuste pas à celles des éclosions de la période 1997-2011 et par conséquent, ne s'ajuste pas aux classes de risque.

Les résultats du modèle proposé sous-estiment clairement la probabilité d'éclosion pour les classes de risque très faible et faible et les surestiment pour les classes moyenne et élevée. Cependant, un intérêt capital devra être accordé aux résultats de la carte de probabilité d'éclosion obtenus, parce qu'ils ont permis de prédire, pour les deux classes importantes de risque moyen et élevé, 58 % des incendies déclarés durant les années 2012 et 2013, soit l'équivalent de 68 incendies sur un total de 118 feux enregistrés dans la zone d'étude. L'espace concerné par ces deux classes de risque moyen et élevé n'est que de 27 %, soit l'équivalent d'une superficie totale de 62 429 ha.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Pouvoir prédire 58 % des incendies déclarés entre 2012 et 2013 par le biais de la carte de probabilité d'éclosion générée (Fig. 12) est un résultat encourageant pour le futur afin d'affiner davantage les facteurs et de cerner les paramètres qui interviennent dans le processus d'éclosion des feux de forêts dans la région de Chefchaouen-Ouazzane. Il nous est difficile de donner un seuil de confiance à la précision de prédiction atteinte ici, parce que la démarche de test ne repose que sur deux années de données d'incendies (2012 et 2013).

La carte de probabilité d'éclosion élaborée est le résultat de l'intégration à poids égal des données relatives à la PAMF, du topoclimat et de l'inflammabilité. Il serait utile pour la prochaine étape d'analyser le poids qu'il faut donner à chacun de ces paramètres dans le processus de calcul de la probabilité d'éclosion, pour rechercher une bonne corrélation entre les paramètres (PAMF, topoclimat, inflammabilité), ce qui permettrait d'augmenter la précision de prévision de manière à ce qu'elle dépasse 58 %. Les travaux de Syphard (2008), conduits pour l'élaboration de cartes de prédiction au feu de forêt, au sud de la Californie (USA), recommandent de soustraire les variables qui expriment la même chose dans les algorithmes de calcul de prévisions du risque, qu'elles soient paramétriques ou non.

Près de 93 % des incendies déclarés sur la période 1997-2013 ont des causes inconnues (HCEFLCD, 2013). Si on avait une bonne connaissance des causes de mise à feu, il aurait été possible de reporter sur une carte les éléments liés à l'activité humaine, qui sont le plus souvent à l'origine des incendies (routes, pistes, carrières, travaux agricoles, lieux de campement, etc.), en fonction de leur contribution au risque d'éclosion des feux de forêts (Colin *et al.*, 2001). La pression anthropique d'un territoire est la synthèse des pressions qu'il renferme. À travers ces pressions, ce sont les pratiques sociales qui sont observées (Mangiavillano, 2010). Ce travail, conduit dans la région de Chefchaouen-Ouazzane, pourrait donc être complété par une analyse statistique de corrélation entre les lieux des points d'éclosion et les facteurs anthropiques potentiellement susceptibles d'être à l'origine des feux, en l'occurrence, les routes, les pistes, les habitations, etc. ; sans pour autant omettre que la connaissance exacte de la cause d'un incendie demeure difficile et rare, et dans l'immense majorité des cas, reste juste une supposition.

Aussi, il faut tenir compte que l'approche des risques d'éclosion doit être étudiée en lien avec les sciences sociales. Il faut privilégier l'analyse d'éclosion des feux basée sur l'organisation de l'espace et qui se démarque totalement des approches traditionnelles basées sur la connaissance

utopique des causes des feux. Le lieu d'éclosion est particulier parce qu'il rassemble des susceptibilités qui se combinent et qui répondent à une pression sociale sur un environnement particulier (Mangiavillano, 2010).

D'autres aspects pourraient être abordés pour affiner cette carte de risque d'éclosion et notamment ceux se rapportant à la prise en compte des moyens de défense (tels que le temps d'accès pour la première intervention, la difficulté de lutte, la densité de points de réapprovisionnement en eau, le cloisonnement des massifs forestiers par les coupures de combustible, etc.), et également des enjeux forestiers (tels que les peuplements remarquables, les peuplements porte-graines, les terrains sensibles à l'érosion, etc.).

Dans notre étude, nous nous sommes basés lors de l'élaboration de la carte d'inflammabilité (Fig. 10), sur l'apport à « dire d'experts » (Benabid & Alexandrian, 2007), émanant, non seulement d'autres travaux similaires conduits dans le sud de l'Espagne et de la France, mais également de leur expérience pratique de connaissance des espèces forestières, de la prévention et de la lutte contre les feux de forêts. À ce niveau, il serait opportun de recommander la nécessité de conduire, en condition nationale, des travaux de tests spécifiques d'inflammabilité des végétaux. À long terme, il est souhaitable que soit également élaborée une typologie nationale du combustible, incluant une clé de détermination photographique, qui pourra être utilisée dans tous les aménagements forestiers.

Pour améliorer l'appréhension des expositions sèches et ventées à travers la carte du topoclimat, il serait aussi pertinent d'améliorer sa précision en utilisant un modèle de simulation de vent sur le relief, au lieu des données ponctuelles extrapolées par la méthode DIP. Le facteur du topoclimat devrait être renforcé par une analyse multicritère en essayant d'intégrer d'autres paramètres comme la température, l'humidité de l'air, la réserve en eau du sol ou l'évapotranspiration (Carrega, 1988).

La carte du risque d'éclosion de feu de forêt aura un intérêt capital pour les aménageurs et pour les services de lutte, du fait qu'elle va leur permettre de mieux négocier la priorisation d'implémentation dans les peuplements forestiers concernés, des postes de surveillance, des lieux de pré-positionnements des véhicules d'intervention, des itinéraires de patrouille, des pistes d'accès ou des points d'eau.

RÉFÉRENCES

- ALEXANDRIAN, D. (2007).— *Élaboration des cartes de risques aux incendies de forêts du Nord du Maroc. Appui à la mise en œuvre du programme forestier national*. Projet UTF/MOR, FAO-Rabat, Maroc.
- ANDREWS, P. (1986).— *BEHAVE: Fire behavior prediction and fuel modelling system-burn subsystem, part 1*. U.S. Forest Service, General Technical Report INT-194.
- ANDREWS, P., BEVINS, C. & SELI, R. (2003).— *Behave Plus fire modelling system. Version 2.0*. Systems for Environmental Management, PO Box 8868, Missoula, MT 59807 (www.fire.org)
- BENABID, A. (2007).— *Description de la composition et de la structure des types de combustibles. Appui à la mise en œuvre du programme forestier national. Elaboration des cartes de risques aux incendies de forêts du Nord du Maroc*. Projet UTF/MOR, FAO-Rabat, Maroc.
- BOVIA, G. & Camia, A. (2000).— *Computation of meteorological fire danger indices for Southern Europe*. Contract N. 145261998-11 SF1P1 ISP IT, Final Report.
- CANADIAN FORESTRY SERVICE (1987).— *Tables for the Canadian Forest Fire Weather Index System*. *Environ. Can., Can. For. Serv., For. Tech. Rep.* 25 (4th ed.): 1-48.
- CARREGA, P. (1988).— Une formule améliorée pour l'estimation des risques d'incendie de forêt dans les alpes maritimes. *Revue d'analyse spatiale, quantitative et appliquée, Nice*, n°24, 165-170.
- COMMISSION DE L'ENVIRONNEMENT (2006).— *La prévention des incendies de forêts*. Rapport Commission de l'environnement, de l'agriculture et des questions territoriales (Doc. 10962 du 12 juin 2006).
- CHUVIECO, E., SALAS, F.J., CARVACHO, L. RODRIGUEZ-SILVA, F. (1999).— *Integrated fire risk mapping*. In: E. Chuvieco (ed.), *Remote sensing of large wildfires*. Springer Verlag, New York.
- COLIN, P., JAPPIOT, M. & MARIEL, A. (2001).— *Protection des forêts contre l'incendie ; fiches techniques pour les pays méditerranéens*. CEMAGREF (département de gestion des territoires, Groupe d'Aix en Provence) Cahier FAO conservation 36. Rome. Italy.

- COLIN, P.Y. (2002).— *SALTUS program-Spot fires. Knowledge and modelling*. IV International Conference on Forest Fire Research (18-22 novembre 2002, Luso, Portugal). Millpress, Rotterdam.
- COUNTRYMAN, C.M. (1972).— *The fire environment concept*. USDA Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, General Technical Report PSW-7, (Berkeley, CA).
- CRUTZEN, P.J. & GOLDAMMER, J.G. (1993).— *Fire in the environment: The ecological, atmospheric, and climatic importance of vegetation fires*. John Wiley and sons, West Sussex, United Kingdom.
- DICKSON, B.G., PRATHER, J.W., XU, Y., HAMPTON, H.M., AUMACK, E.N. & SISK, T.D. (2006).— Mapping the probability of large fire occurrence in northern Arizona, USA. *Landsc. Ecol.*, 21: 747-761.
- FAO (2006).— *Global Forest Resources Assessment 2006. Progress towards sustainable forest management*. FAO Forestry Paper n°147. Rome.
- FAO (2007).— *Fire management global assessment 2006. A thematic study prepared in the framework of the Global Forest Resources Assessment 2005*. FAO Forestry Paper n° 151. Rome.
- FAOUR, G., BOU KHEIR, R. & DARWISH, A. (2006).— Méthode globale d'évaluation du risque d'incendies de forêt utilisant la télédétection et les SIG : cas du Liban. Contemporary Publishing International, publié sous l'enseigne Éditions Scientifiques GB. *Télédétection*, 2006, Vol. 5, n°4: 359-377.
- FINNEY, M. (1998).— *FARSITE users guide and technical documentation*. USDA Forest Service General, Technical Report RMRS-RP-4.
- FORESTRY CANADA FIRE DANGER GROUP (1992).— *Development and structure of the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System*. ST-X-3, Canadian Forest Service, Ottawa, Ontario, Information Report ST-X-3.
- GENTON, M.G., BUTRY, D.T., GUMPERTZ, M.L. & PRESTEMON, J.P. (2006).— Spatio-temporal analysis of wildfire ignitions in the St Johns River. *Int. J. Wildland Fire*, 15: 87-97.
- HADDOUCH, H. (2011).— *Interpolation du modèle de prévision météorologique Al-Bachir*. Rapport Interne, Direction de la Météorologie Nationale. Casablanca.
- HCEFLCD (2010).— *Rapport interne sur la monographie de la région de Chefchaouen*. Direction Provinciale des Eaux et Forêts de Chefchaouen, Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte contre la Désertification, Rabat-Chellah, Maroc.
- HCEFLCD (2013).— *Rapport annuel d'incendies de forêts et bases de données du Service de la Protection des Forêts. Bilan interne*. Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte contre la Désertification, Rabat-Chellah, Maroc.
- IFN-MAROC (1996).— *Base de données cartographiques de l'Inventaire Forestier National, Rapport Interne*. Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification. Rabat, Chellah, Quartier Administratif, Maroc.
- ILLERA, P., FERNANDEZ, A., CALLE, A., CASANOVA, J.L. (1996).— Temporal evolution of the NDVI as an indicator of forest fire danger. *Int. J. Remote Sensing*, 17: 1093-1105.
- JAPPIOT, M., BLANCHI, R. & ALEXANDRIAN, D. (2003).— Cartographie du risque d'incendie de forêt : besoins, méthodes et données. Essai de normalisation. *Forêt Méditerranéenne*, « Les travaux du GIS Incendies de Forêt » 4: 427-434.
- MANGIAVILLANO, A. (2010).— *L'éclosion du feu de forêt : comprendre et spatialiser l'aspect humain de l'aléa*. Rapport Interne, Centre d'Essais et de Recherche de l'Entente, Sécurité Civile, Valabre, Gardanne.
- MAP (2006).— *Plan départemental de protection des forêts contre les incendies. Département des Pyrénées orientales*. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche de France, document principal, Paris.
- PEW K.L. & LARSEN C.P.S. (2001).— GIS analysis of spatial and temporal patterns of human-caused wildfires in the temperate rainforest of Vancouver Island, Canada. *For. Ecol. & Manage.*, 140: 1-18.
- SANDE SILVA, J., REGO, F., FERNANDES, P. & RIGOLOT, E. (2010).— *Towards integrated fire management – Outcomes of the European Project Fire Paradox*. European Forest Institute Research Report 23, 2010, Torikatu Joensuu, Finland.
- SAN-MIGUEL-AYANZ, J., ANNONI, A. & SCHMUCK, G. (2002).— Towards a coherent forest fire information system in Europe: The European Forest Fire Information System (EFFIS). In: X. Viegas (ed.). *Forest fire research and wildland fire safety*. Millpress, Rotterdam, ISBN 90-77017-72-0.
- SEBASTIAN, L., SAN-MIGUEL-AYANZ, J. & BURGAN, R. (2002).— Integration of satellite sensor data, fuel type maps and meteorological observations for the evaluation of forest fire risk at the pan-European scale. *Int. J. Remote Sensing*, 23: 2713-2719.
- SYPHARD, A.D., RADELOFF, V.C., KEULER, N.S., TAYLOR, R.S., HAWBAKER, T.J., STEWART, S.I. & CLAYTON, M.K. (2008).— Predicting spatial patterns of fire on a southern California landscape. *Int. J. Wildland Fire*, 17: 602-613.
- TRABAUD, L. (1976).— Inflammabilité et combustibilité des principales espèces méditerranéenne. *Ecol. Plantar.*, 11: 117-136.
- VAN WAGNER, C.E. (1987).— *Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System*. Canadian Forestry Service, Ottawa, Ontario, Forestry Technical Report 35.