

CARTOGRAPHIE DE L'INTENSITÉ DU FEU
ET DE LA SENSIBILITÉ AUX FEUX DE CIMES EN FORÊTS MÉDITERRANÉENNES.
CAS DE LA PROVINCE DE CHEFCHAOUEN AU NORD DU MAROC

Hicham MHARZI ALAOU^{1,2*}, Fouad ASSALI^{1,2}, Mohamed ROUCHDI¹, Driss TAHIRI¹,
Said LAHSSINI³, Abderrahmane AAFI³ & Said MOUKRIM⁴

¹ Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc

² Centre National de Gestion des Risques Climatiques Forestiers, HCEFLCD, Rabat, Maroc

³ École Nationale Forestière d'Ingénieurs, Salé, Maroc

⁴ Université Mohammed V de Rabat, Faculté des Sciences, Rabat, Maroc

* Auteur correspondant. E-mail: hicham.mharzialaoui@gmail.com

SUMMARY.— *Mapping of fire intensity and of sensibility to crown fires in Mediterranean forests. Case of the province of Chefchaouen in northern Morocco.*— The current evolution of the forest fire regime poses new challenges to the usual practices of forest management plans and forest fires strategies. The implementation of wisely measured actions on the ground in terms of preventive silviculture, water points or fire breaks, requires a deep understanding and a fine mapping of the fire behaviour. This paper focuses first on mapping the fire intensity using the Byram formula in the province of Chefchaouen, one of the most affected regions by this scourge in Morocco. The fire speed of spread is estimated using the parametric equations derived from the physical model FireStar, the spatially varying wind fields according to the relief are carried out by the Windninja software. Secondly, the localization of sensitive areas to crown fires was carried out using the Nelson & Adkins model. The ArcGIS model-builder has been very useful to produce automatically all different maps (intensity map, propagation speed map, flame height, etc.). Results show that almost 55 % of forest areas have a fire intensity ranging from medium to very high (> 1700 Kw/m), among which 11 % with extreme intensity values (over 7000 kW/m). Also the study reveals that 30 % of the forests in the study area are sensitive to crown fires mainly located in zones with flames exceeding 2 m height. On the other hand, the spatially varying wind fields using WindNinja shows that the input wind speed (2.8 m/s) has almost tripled (7.72 m/s) on 83 % of the territory, and the propagation speed reaches a maximum of 1.5 m/s (5.4 km/h) on almost 10 % of the forested area.

RÉSUMÉ.— L'évolution actuelle du régime d'incendie de forêts pose de nouveaux défis quant aux pratiques habituelles des plans d'aménagement et stratégies de gestion de feux de forêts. La mise en œuvre d'actions savamment dosées sur le terrain en termes de sylviculture préventive, d'installation des points d'eau ou d'ouverture de tranchée pare-feu, nécessite une compréhension et une cartographie fine du comportement du feu. Le présent article vise, dans un premier lieu, à cartographier l'intensité de feu dans la province de Chefchaouen, une des régions les plus touchées par ce fléau au Maroc, en utilisant la formule Byram; la vitesse de propagation est estimée en utilisant les équations paramétriques issues du modèle physique FireStar, et la modélisation des vents en fonction du relief est réalisée par le logiciel Windninja. Dans un deuxième lieu, la spatialisation des zones sensibles aux feux de cimes a été réalisée en ayant recours au modèle de Nelson & Adkins. L'utilisation du model-builder d'ArcGIS a été d'une grande utilité pour automatiser la production des différentes cartes (carte d'intensité, carte de vitesse de propagation, hauteur des flammes...). Les résultats obtenus montrent que presque 55% des superficies boisées présentent une intensité moyenne à très élevée (> 1700 Kw/m) dont 11% avec des valeurs extrêmes de l'intensité (supérieure à 7000 kW/m). L'étude révèle aussi que 30 % des forêts dans la zone d'étude sont sensibles aux feux de cimes principalement situés dans les zones où la flamme dépasse les 2 m de hauteur. Par ailleurs, la modélisation des vents en fonction du relief en utilisant WindNinja montre que la vitesse utilisée en entrée (2,8 m/s) a été presque triplée (7,72 m/s) sur 83 % du territoire, et la vitesse de propagation atteint un maximum de 1,5 m/s (5,4 km/h) sur presque 10 % de la surface boisée.

Un des défis actuels, sans doute le plus important, concerne les changements climatiques que connaissent les pays du bassin méditerranéen et qui se manifestent, en premier lieu, par des tendances haussières des températures et des fréquences des phénomènes extrêmes, comme par exemple les vagues de chaleur (IPCC, 2014). Ceci se traduit par un impact négatif sur les écosystèmes forestiers qui deviennent très vulnérables aux incendies de forêts, d'autant plus que le

risque lié à ce phénomène est particulièrement élevé sur tout le pourtour du bassin méditerranéen (Jappiot, 2000). Le Maroc n'échappe pas à ce fléau, avec 3000 ha de forêts qui partent annuellement en fumée (HCEFLCD, 2014) ; cette situation se trouve aggravée par les difficultés de régénération et de restauration des espaces, marqués par leurs vulnérabilités naturelles.

L'augmentation de la fréquence des périodes de sécheresse, telle qu'elle s'est produite lors des étés 2003, 2004 et 2006 dans la province de Chafchaouen au nord du Maroc, a conduit à de graves incendies qui ont rendu aussi caduque tous les efforts d'aménagement de forêts. Les variations du climat et ces conséquences prévisibles menacent la viabilité des écosystèmes et compromettent la validité des pratiques habituelles des plans d'aménagement de forêts. Jusqu'à présent, ces plans d'aménagement s'intéressent principalement à la production du bois et à la régénération forestière en omettant en grande partie l'aspect relatif aux incendies de forêt (Cherki, 2012).

La modélisation du comportement du feu s'avère une nécessité pour mieux mener toute action d'aménagement des forêts, pour éviter les effets irrémédiables des feux et augmenter la résilience des écosystèmes forestiers. À l'heure actuelle, plusieurs types de modèles décrivant le comportement du feu ont été développés à travers le monde : Van Wagner *et al.*, 1987 ; Forestry Canada Fire Danger Group, 1992 ; Illera *et al.*, 1999 ; Chuvieco *et al.*, 1999 ; Bovia & Camia, 2000 ; San-Miguel-Ayanz *et al.*, 2002 ; Sebastian *et al.*, 2002 ; Syphard *et al.*, 2008. Les modèles les plus connus étant le Fire Weather Index (FWI) (Canadian Forestry Service, 1987) et BEHAVE (Andrews, 1986 ; Andrews *et al.* 2003).

Toutefois, la plupart de ces modèles, décrivant le comportement du feu, présentent l'inconvénient de ne pas être extrapolables dans des régions autres que celles où ils ont été développés (Faour *et al.*, 2006). L'utilisation de modèles physiques comme celui de Firetec (Larini *et al.*, 1998 ; Morvan & Dupuy, 2001) et FireStar (Linn, 1997 ; Linn & Harlow, 1998 ; Reisner *et al.*, 2000 ; Linn & Cunningham, 2005 ; Cunningham & Linn, 2007 ; Linn *et al.*, 2012) est fortement recommandée en l'absence de modèles empiriques locaux (Larini, 1998 ; Morvan & Dupuy, 2001, 2004), puisqu'ils permettent d'estimer la vitesse de propagation pour pratiquement n'importe quel type de combustible comme une fonction du vent, de la pente et de l'humidité.

Le mécanisme de propagation et l'intensité d'un feu est un phénomène majoritairement physique lié principalement aux composantes traditionnelles du triangle du feu à savoir, les conditions météorologiques, le combustible et une source de chaleur (Countryman, 1972).

Comme il est très difficile de contrôler les conditions météorologiques, les actions d'aménagement doivent se concentrer sur les deux autres composantes afin de conférer à la forêt la résilience souhaitée face aux incendies.

Le présent travail s'assigne pour objectif de cartographier l'intensité du feu et les zones sensibles aux feux de cime moyennant la formule de Byram et le modèle physique FireStar dans la province de Chafchaouen afin d'offrir aux aménageurs de forêts un outil performant d'aide à la décision et d'améliorer la résilience des écosystèmes forestiers.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

ZONE D'ÉTUDE

La Province de Chefchaouen est située au nord-ouest du Maroc sur la chaîne montagneuse rifaine et limitée au nord par la Méditerranée sur une longueur de 120 km (Fig. 1). Les conditions climatiques et l'exposition de la montagne rifaine ont favorisé le développement de l'unique sapinière au niveau de tout le continent africain sur une superficie de 3000 ha (HCEFLCD, 2014). Le domaine forestier de la zone d'étude s'étend sur une superficie d'environ 171 844 ha. Il est caractérisé par une prolifération importante de la biomasse végétale dominée par le chêne-liège et les formations de matorral suivis de loin par le chêne vert, les pins, les eucalyptus, le chêne zeen, le thuya etc. Le tableau I illustre la répartition des essences forestières dans la région forestière (IFN, 2006).

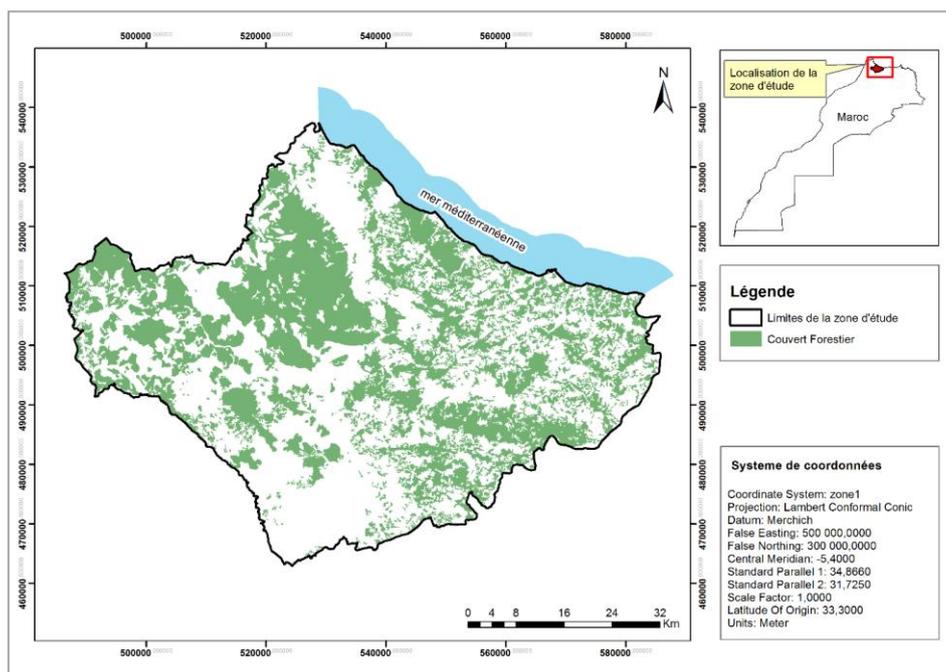


Figure 1.— Carte de localisation de la zone d'étude.

TABEAU I

Couvert forestier dans la province de Chefchaouen (IFN, 2006)

| Type de formations | Espèces | Superficie (ha) | Taux du couvert (%) |
|----------------------|----------------------------------|-------------------|---------------------|
| Résineux | <i>Tetraclinis articulata</i> | 11 359,78 | 7% |
| | <i>Pinus pinaster</i> | 9 396,83 | 5% |
| | <i>Pinus radiata</i> | 4 559,14 | 3% |
| | <i>Pinus brutia</i> | 4 017,03 | 2% |
| | <i>Cedrus atlantica</i> | 4 000,00 | 2% |
| | <i>Abies maroccana</i> | 3 000,00 | 2% |
| | <i>Pinus halepensis</i> | 1 894,40 | 1% |
| | <i>Pinus pinaster atlantica</i> | 79,92 | 0% |
| | Autres Résineux (reboisement...) | 2,37 | 0% |
| Feuillus | <i>Quercus suber</i> | 54 312,72 | 32% |
| | <i>Quercus rotundifolia</i> | 40 818,97 | 24% |
| | <i>Pistacia lentiscus</i> | 24 247,84 | 14% |
| | <i>Quercus coccifera</i> | 8 831,84 | 5% |
| | <i>Quercus pyrenaica</i> | 3 779,55 | 2% |
| | <i>Quercus canariensis</i> | 1 225,40 | 1% |
| | <i>Eucalyptus camaldulensis</i> | 318,33 | 0% |
| Total général | | 171 844,13 | 100% |

Dans la zone montagneuse, le climat est typiquement méditerranéen, pluvieux et froid en hiver et doux en été. Les précipitations y sont les plus importantes et varient entre 1000 et 2000 mm/an avec parfois des chutes de neige. Dans la zone côtière, les précipitations varient entre 300 et 400 mm/an et le climat est de type semi-aride ; la partie sud de la zone d'étude est caractérisée par un climat humide en hiver et sec en été avec des précipitations oscillant entre 900 et 1300 mm/an (HCEFLCD, 2010).

Les incendies constituent pour la province de Chefchaouen 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 1997-2013 s'élèvent respectivement à 38 incendies et à 380 ha/an, avec toutefois des pics ayant atteint 3484 ha en 2004 et 1734 ha en 2006 (HCEFLCD, 2014).

MODÈLES UTILISÉS

INTENSITÉ DU FEU

L'intensité de l'incendie correspond à la quantité d'énergie dégagée par chaque mètre du front de feu par seconde (Byram, 1959), elle permet d'évaluer les conséquences ou les dégâts possibles lors du déclenchement d'un incendie. C'est un paramètre particulièrement important puisqu'il aide, d'une part, à l'optimisation des moyens d'investissement (tranchée pare-feu, piste, sylviculture préventive, etc.) et de lutte anti-feux (Alexandrian & Rouchdi, 2006) et d'autre part, il aide à l'évaluation des impacts écologiques du feu (Sande Silva *et al.*, 2010).

L'intensité de l'incendie est calculée comme une fonction de la biomasse végétale, la vitesse de propagation et une constante communément fixée à 18000 kJ/kg relative au pouvoir calorifique moyen du bois et des végétaux (Byram, 1959) :

$$I = 18000 * B * V_p \quad (\text{Équation 1})$$

avec I : intensité du feu (kW/m) ; B : biomasse du combustible disponible par unité de surface (kg/m²), elle représente la charge de combustible qui brûle effectivement au moment du passage du feu ; V_p : vitesse de propagation du feu (m/sec).

Étroitement liée au stade de développement de la végétation, elle est donc très variable dans le temps et dans l'espace, en fonction de la charge du combustible, des événements passés (incendies, attaque parasitaires...) et des actions mises en œuvre (travaux visant la réduction de la biomasse).

Calcul de la biomasse des types de combustibles

Pour apprécier la biomasse B dans l'équation 1, les cartes des types de peuplement de l'inventaire forestier national (IFN) ont été utilisées. Compte tenu du fait que les relevés *post-mortem* des feux montrent que seul le combustible fin (feuillage, rameaux) d'une épaisseur caractéristique inférieure à 6 mm participe de manière effective à la propagation d'un feu, B doit être réduit à la charge de combustible fin. Pour ce faire, Alexandrian (2008) propose la formule suivante pour transformer les types de peuplement en types de combustibles caractérisés par leur biomasse :

$$BT = \sum (PVi * Di * PCi) + BL + BN \quad (\text{Équation 2})$$

où BT : biomasse totale du combustible en (kg/m²) ; PVi : phytovolume combustible de l'espèce 'i', c'est le produit de la hauteur par le pourcentage du recouvrement ; Di : densité d'encombrement ou masse volumique effective de l'espèce 'i' en (kg/m³), c'est un paramètre qui permet de transformer le phytovolume en biomasse ; PCi : phytomasse consommable de l'espèce 'i' en (%), c'est le pourcentage de biomasse combustible qui participe activement à la propagation du feu (éléments fins de diamètre inférieur à 6mm). Ce coefficient est tiré de la bibliographie (annexe 1) ; BL : biomasse de la litière ; BN : Biomasse de la nécromasse.

Calcul de la vitesse de propagation

Modèles de propagation du feu

Les modèles de propagation du feu sont des outils de prédiction du taux de progression du front du feu quand les conditions de propagation sont réunies, principalement la vitesse et la direction du vent, la pente et l'état du combustible (Dupuy, 1999). Généralement, selon la classification des modèles de propagation, il existe trois familles de modèles de la propagation du feu (Catchpole & De Mestre 1982 ; Burrows, 1994 ; Perry, 1998 ; Pastor *et al.*, 2003 ; Fernandes, 2009) :

- *Modèles empiriques* : visant principalement à corréler statistiquement le taux de propagation des feux en fonction des conditions du milieu, ils sont basés sur des observations et des mesures sur des feux réels ou expérimentaux. Les plus connus sont le modèle Canadien FWI (Forestry Canada Fire Danger Group, 1992) ou le modèle Australien (Sneeuwjagt & Feet, 1985). Ces modèles présentent l'inconvénient de ne pas être extrapolable dans des régions autres que celles où ils ont été développés.

- *Modèles semi-empiriques* : basés sur le principe de conservation de l'énergie, ils reposent sur l'idée que l'énergie transférée à la végétation non brûlée est proportionnelle à celle libérée par la végétation brûlée, ces modèles requièrent plusieurs expérimentations en laboratoire pour la détermination des facteurs de la propagation. Ils présentent l'avantage d'être flexibles et universels. Les plus connus sont les modèles de Rethermel et Behave (Fernandes, 2009).

- *Modèles physiques* : ils tentent d'expliquer la propagation du feu à travers des formules mathématiques complexes traduisant les principes fondamentaux du transfert de chaleur et des caractéristiques physico-chimique de la combustion. L'avantage le plus important de ces modèles est la compréhension des mécanismes de propagation du feu, la conception expérimentale et l'interprétation des essais sur le terrain (Burrows, 1994). Les plus connus sont Firetec (Larini *et al.*, 1998 ; Morvan & Dupuy, 2001) et FireStar (Linn, 1997 ; Linn and Harlow, 1998 ; Reisner *et al.*, 2000 ; Linn & Cunningham, 2005 ; Cunningham & Linn, 2007 ; Linn *et al.*, 2012).

Vitesse de propagation

Dans la présente étude, les équations paramétriques obtenues par interpolation à partir d'un ensemble de simulations numériques réalisées à partir du modèle physique FireStar s'avèrent les plus adaptées pour l'estimation la vitesse de propagation du feu (Alexandrian, 2008).

$$V_p = 0,025 * V_0 * (-0,02 * H + 10,5) * \text{Ln}(VV - 0,3) * \text{Exp}^{[0,07 * P * \cos(\text{Ex} - DV)]} \quad (\text{Équation 3})$$

avec V_p : vitesse de propagation (m/s) ; V₀ : vitesse de propagation initial sans pente ni vent (pente < 5% et vent < 0.3 m/s), due principalement à l'énergie intrinsèque du combustible. Cette vitesse est mesurée en m/s ; H : humidité relative en % ;

VV : vitesse du vent en m/s, cette vitesse doit être supérieure à 0.3 m/s ; DV : direction du vent ; Ex : exposition ; P : pente.
 Alexandrian (2008) a estimé la vitesse V_0 comme une fonction pondérée de l'inflammabilité du type de combustible selon la formule suivante :

$$V_0 = I * (1 + (100 - \sum(H_i * R_i) / \sum(R_i) / 100)) \quad (\text{Équation 4})$$

avec I : inflammabilité moyenne du type de combustible (annexe 1) ; H_i : hauteur de l'espèce 'i' ; R_i : recouvrement de l'espèce 'i'.

SENSIBILITÉ AU FEU DE CIME

La détermination des zones sensibles aux feux de cimes est tributaire de la connaissance des caractéristiques de flamme (longueur, hauteur, angle, etc.) que peut générer un combustible. Ces caractéristiques sont très utiles pour de nombreuses applications dans la prévention et la lutte contre les incendies :

- la longueur de la flamme a été considérée comme une alternative à l'intensité de Byram pour décrire les difficultés de lutte anti-feux (Alexander 1982) ;
- la hauteur de flamme est importante aussi pour déterminer les zones où le risque d'avoir des feux de cimes est très élevé (Van Wagner 1977 ; Cruz *et al.*, 2006),
- en outre, la connaissance de la hauteur et de l'angle de flamme est nécessaire pour déterminer l'énergie transférée par rayonnement (Albini 1985, 1986).

Les modèles développés pour l'estimation des caractéristiques des flammes sont résumés dans le tableau II (Anderson *et al.*, 2006).

TABLEAU II

Modèles de calcul des caractéristiques des flammes

| Caractéristique des flammes | Formule | Référence |
|--------------------------------|---|--|
| Longueur des flammes (L) | $L = aI^b$ | Byram (1959) a = 0,0775 b = 0,46 |
| | | Thomas (1963) a = 0,0266 b = 2/3 |
| Hauteur des flammes (H) | $H = I/aV$ | Nelson & Adkins (1986) a = 360 |
| | | Taylor (1961) b = 0,5 |
| Angle des flammes (α) | $\tan(\alpha) = a V^3 / I^b$ | Nelson (1980) |
| | $\tan(\alpha) = a V^2 / g D$ $\tan(\alpha) = a (V^2/gH)^b$ | Albini (1981) a = 1,22 b = 0,5 |

I : intensité de Byram, V : vitesse du vent

Dans la présente étude, la hauteur de la flamme a été estimée en utilisant la formule de Nelson & Adkins (1986) qui ont donné une approximation du modèle Albini. Ce modèle suggère que la hauteur des flammes est souvent liée à l'intensité de la ligne du front du feu et à la vitesse du vent (V). Le ratio I_b / V a été jugé pertinent pour décrire la hauteur des flammes (Anderson *et al.*, 2006).

Les feux de cime peuvent être enregistrés si la hauteur de la flamme dépasse la hauteur moyenne de la première branche d'un type de combustible, ainsi la carte des zones sensibles au feu de cime sera déterminée en calculant la différence entre la carte de la hauteur de la première branche et la carte de la hauteur de la flamme.

DONNÉES MOBILISÉES

La biomasse

Le premier paramètre pour calculer l'intensité de l'incendie est la biomasse végétale. Les données sur la végétation utilisées dans la présente étude sont celles réalisées en 2006 par le service de l'Inventaire Forestier National (IFN) au Maroc. Ces données comprennent l'étendue spatiale, la densité, la hauteur moyenne et le mode de traitement sylvicole (Futaie ou taillis) des types de peuplement.

Cependant, les données de l'IFN ne renseignent pas sur les strates herbacées et arbustives contribuant grandement à l'éclosion et à la propagation des feux. Pour y pallier et compléter les données de l'IFN et déterminer la biomasse totale (BT) (Équation 2), 73 relevés, décrivant la composition floristique de la végétation, ont été réalisés dans 190 types de peuplement. Ces relevés ont été effectués sur le terrain en 2007 par Benabid, et dans lesquels ont été notées les informations suivantes : (i) la liste exhaustive de l'ensemble des espèces dont le recouvrement dépasse 10% ; (ii) le recouvrement de chaque espèce ;

(iii) la hauteur moyenne de chaque espèce ; (iv) le recouvrement de la litière ; (v) la hauteur de la première branche pour les arbres adultes.

Ces relevés de terrain ont été reportés sur les cartes et ont permis de mettre à jour la typologie de l'inventaire. Ils se répartissent, selon la strate arborée dominante, comme indiqué sur le tableau III et la figure 2.

TABLEAU III

Répartition des types de peuplement dans la province de Chefchaouen (IFN-Maroc 2006)

| Espèces arborées | Nbr de polygones de l'IFN | Superficie (ha) | % Superficie |
|---------------------------------|---------------------------|-----------------|--------------|
| <i>Quercus suber</i> | 16 | 54 312,72 | 31,19 |
| <i>Quercus rotundifolia</i> | 9 | 40 819 | 23,75 |
| <i>Pistacia lentiscus</i> | 2 | 24 248 | 14,11 |
| <i>Tetraclinis articulata</i> | 5 | 11 360 | 6,61 |
| <i>Pinus pinaster</i> | 6 | 9397 | 5,47 |
| <i>Quercus coccifera</i> | 3 | 8832 | 5,14 |
| <i>Abies maroccana</i> | 5 | 3000 | 2,78 |
| <i>Pinus radiata</i> | 1 | 4559 | 2,65 |
| <i>Pinus brutia</i> | 1 | 4017 | 2,34 |
| <i>Quercus pyrenaica</i> | 7 | 3780 | 2,2 |
| <i>Cedrus atlantica</i> | 7 | 4000 | 1,71 |
| <i>Pinus halepensis</i> | 1 | 1894 | 1,1 |
| <i>Quercus canariensis</i> | 5 | 1225 | 0,71 |
| <i>Eucalyptus camaldulensis</i> | 3 | 318 | 0,19 |
| <i>Pinus pinaster atlantica</i> | 1 | 80 | 0,05 |
| Autres (Reboisement...) | 1 | 2 | 0 |
| Total général | 73 | 171 844 | 100,00 |

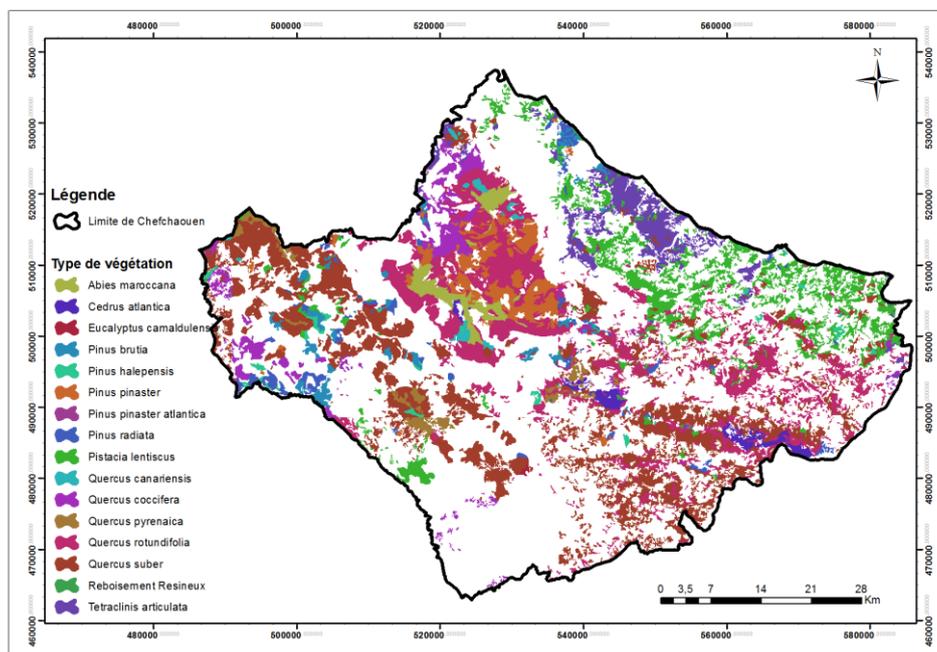


Figure 2.— Carte des types de végétation dans la province de Chefchaouen.

La vitesse de propagation

Le deuxième paramètre de calcul de l'intensité est la vitesse de propagation d'un feu. Cette dernière est influencée par trois paramètres : l'intensité du vent, la teneur en eau de la végétation et la pente du terrain. Comme la pente du terrain reste invariante, les autres paramètres doivent être estimés en fonction des conditions de référence.

Conditions de référence

En général, la définition des conditions de référence se base sur l'étude des feux remarquables représentant les plus grands feux enregistrés dans la zone. En effet, il s'agit de mettre en évidence certaines données caractéristiques telles que les coordonnées des points d'éclosion, la surface brûlée, la direction des vents dominants, la vitesse du vent et le taux d'humidité en se fondant sur l'étude des feux sélectionnés. Alexandrian & Rouchdi (2006) ont défini comme suit les étapes à suivre avec minutie pour étudier les conditions de référence :

- (i) recueil de l'ensemble des feux enregistrés dans la zone étudiée ;
- (ii) choix des feux remarquables dans la région climatique, correspondant aux plus grands feux enregistrés dans la zone ;
- (iii) définition des conditions météorologiques ayant prévalu au moment de chaque grand feu ;
- (iv) analyse des paramètres météorologiques (vitesse du vent, direction dominante, humidité relative, etc.) nécessaires pour les différentes approches de qualification des aléas.

L'analyse de l'historique des incendies enregistrés dans la zone d'étude, pendant la période 1997-2013 a révélé l'existence de 19 feux remarquables dont la superficie touchée est supérieure à 100 ha (Tab IV).

TABLEAU IV

Feux remarquables sélectionnés

| Année | Commune | Forêt | Superficie (ha) | Date d'éclosion | Heure d'éclosion |
|-------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| 1999 | Iounane | Akumsen | 520 | 22/08/1999 | 13:30:00 |
| 2000 | Tamorot | Jbel Asri | 250 | 31/08/2000 | 15:30:00 |
| 2003 | Talambote | Assifane | 300 | 24/08/2003 | 15:30:00 |
| | Bni Selmane | Assifane | 140 | 17/08/2003 | 14:30:00 |
| | Tassift | Tassift | 200 | 13/08/2003 | 05:00:00 |
| 2004 | Bni Bouzra | Beni Bouzra | 140 | 26/08/2004 | 05:00:00 |
| | Tamorot | Ghomara | 110,8 | 23/08/2004 | 13:00:00 |
| 2005 | Tanaqoub | Bouhachem | 214 | 21/09/2005 | 11:15:00 |
| | Bab Taza | Tanghaya | 201 | 21/07/2005 | 16:00:00 |
| 2006 | Moqrissat | Jbel Amzez | 1443 | 02/09/2006 | 22:30:00 |
| | Ouad Malha | Malha | 100 | 27/08/2006 | 16:30:00 |
| 2007 | Tassift | Achacha Tassift | 250 | 19/09/2007 | 18:00:00 |
| 2008 | Ouad Malha | Kourt | 350 | 06/09/2008 | 12:30:00 |
| 2009 | Derdara | Bouhachem | 168 | 11/08/2009 | 11:30:00 |
| | Ouad Malha | Kourt | 166 | 30/08/2009 | 14:10:00 |
| | Derdara | Jbel Sougna | 149 | 26/07/2009 | 16:00:00 |
| 2012 | Bni Selmane | Assifane | 195 | 16/09/2012 | 17:35:00 |
| | Fifi | Khizana | 270 | 09/08/2012 | 22:30:00 |
| | Bab Taza | Tanghaya | 199,4 | 22/08/2012 | 14:10:00 |

Du fait de l'existence d'une seule station météorologique dans la zone d'étude (située dans la ville de Chefchaouen et loin des massifs forestiers), il a été procédé à l'extraction des paramètres météorologiques (température, humidité relative, vitesse et direction du vent) ayant prévalu au moment des feux remarquables (Tab. IV), à partir du modèle de prévision de la Direction de Météorologie Nationale (DMN). 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.

Vent

Le vent est l'un des facteurs les plus influents qui affectent le comportement des incendies de forêt (Catchpole *et al.*, 1998 ; Rothermel, 1972 ; Beer, 1991). La configuration du terrain et du relief provoque des changements locaux de la direction et de la vitesse du vent qui ne sont souvent pas bien prédites par les modèles météorologiques standards (Forthofer, 2007).

Pour tenir compte des modifications locales du vent, plusieurs logiciels de modélisation [WindStation (Lopes 2003), WindWizard (Forthofer 2007 ; Forthofer *et al.*, 2003) et WindNinja (Forthofer 2007)] ont été développés pour améliorer la prise en compte du vent, en modélisant l'écoulement des flux sur le relief.

WindNinja est un des logiciels les plus modernes qui a été développé spécialement pour la simulation spatiale des vents pour la prévision du comportement du feu en relief accidenté et aussi pour d'autres applications qui nécessitent une haute résolution spatiale du vent.

Dans la présente étude, le logiciel WindNinja a été utilisé pour modéliser la vitesse et la direction du vent de référence définies préalablement à partir des données fournies par la DMN à 10 m du sol ; les cartes résultantes présentent la vitesse et la direction du vent en chaque point de la zone d'étude. La résolution spatiale choisie à la sortie du modèle est de 30 mètres (similaire à celle du modèle numérique de terrain (MNT) utilisé dans la cadre de cette étude).

Humidité

Le deuxième paramètre pour calculer la vitesse de propagation de feu est l'humidité de l'air. En effet, grâce aux échanges permanents entre l'air et le combustible, plus l'humidité de l'air est élevée, plus la teneur en eau du combustible est élevée et par conséquent il faudra plus d'énergie pour enflammer ce combustible (Trabaud, 1989).

La carte de l'humidité relative a été obtenue après interpolation des points de grilles fournies par la DMN en utilisant l'inverse de distance pondérée (IDW) d'ArcGIS.

Configuration du terrain (pente et exposition)

Les cartes des expositions et des pentes ont été relevées à partir du modèle numérique de terrain (MNT), d'une résolution de 30 m, en utilisant le logiciel ArcGIS (Fig. 3).

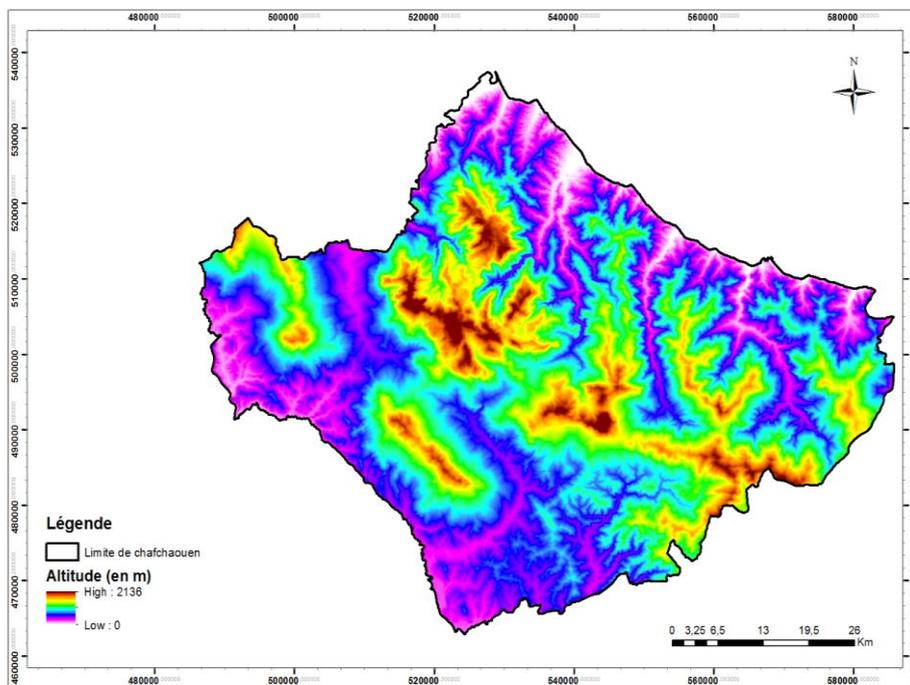


Figure 3.— Carte du modèle numérique de terrain (MNT).

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

INTENSITÉ DE FEU

CARTE DE LA BIOMASSE DES TYPES DE COMBUSTIBLES

L'application de la formule 2 et l'utilisation des données de la phytomasse consommable et de la densité d'encombrement de chaque espèce (annexe 1) ont permis de générer la carte de la biomasse participant réellement à la combustion (Fig. 4).

D'après la carte de la biomasse (Fig. 4) et le tableau V, on remarque que presque 23 % (38 706 ha) des superficies forestières sont caractérisées par une charge de combustible très importante (biomasse supérieure à 2,5 kg/m²), ce type de combustible est constitué majoritairement par les

futaies denses de *Quercus suber* d'une hauteur moyenne de 12 m, souvent en mélange avec *Quercus canariensis*, *Erica arborea*, *Cistus salviifolius* et *pistacia lentiscus*.

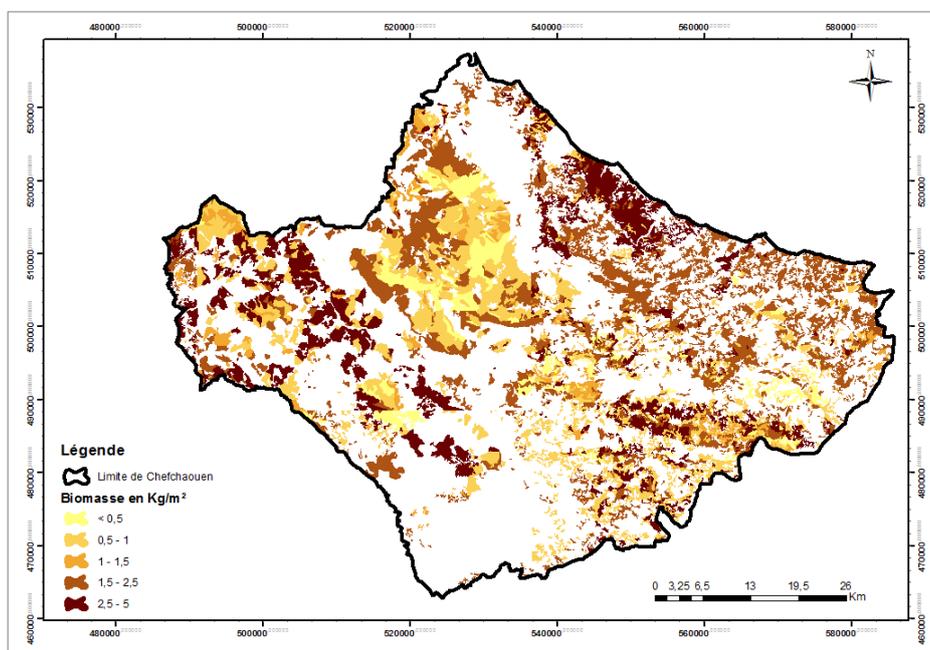


Figure 4.— Carte de la biomasse participant à la combustion.

TABLEAU V

Répartition des classes de biomasse participant à la combustion

| Classe de biomasse | Superficie (ha) | % Superficie |
|--------------------|-----------------|--------------|
| < 0,5 | 13 235,96 | 7,70 |
| 0,5 - 1 | 47 600,56 | 27,69 |
| 1 - 1,5 | 10 258,47 | 5,97 |
| 1,5 - 2,5 | 62 076,42 | 36,12 |
| 2,5 - 5 | 38 705,53 | 22,52 |
| Total | 171 876,93 | 100,00 |

Aussi, dans ces types de peuplement, les hauteurs des premières branches sont inférieures aux hauteurs des strates intermédiaires. Le feu peut donc être transmis facilement à toute la biomasse présente et l'intensité y sera plus forte.

CARTE DE LA VITESSE DE PROPAGATION

Vitesse et direction du vent

L'analyse des conditions météorologiques de référence a permis de dégager la vitesse et la direction dominante des vents à 10m de sol. La figure 5 montre clairement que les vents provenant du Nord-Ouest (285°-345°) sont les vents qui prédominaient lors de l'enregistrement des grands feux. Tandis que, la moyenne de la vitesse du vent provenant de cette direction est de 2,8 m/s (10,08 km/h) qui est jugée relativement moyenne par rapport aux vitesses que connaissent les vents dans la région (moyenne annuelle entre 2,5 et 4 m/s (HCFELCF, 2010) (Fig. 6).

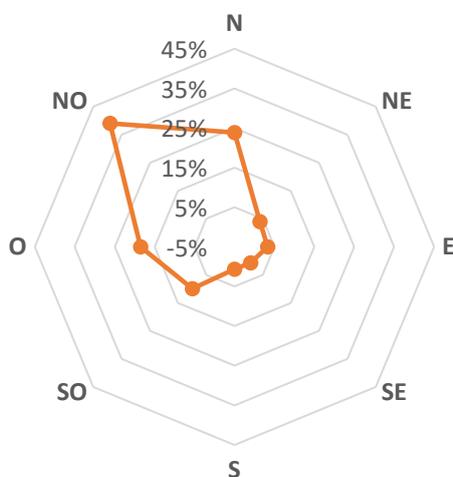


Figure 5.— Rose des vents avec les fréquences.

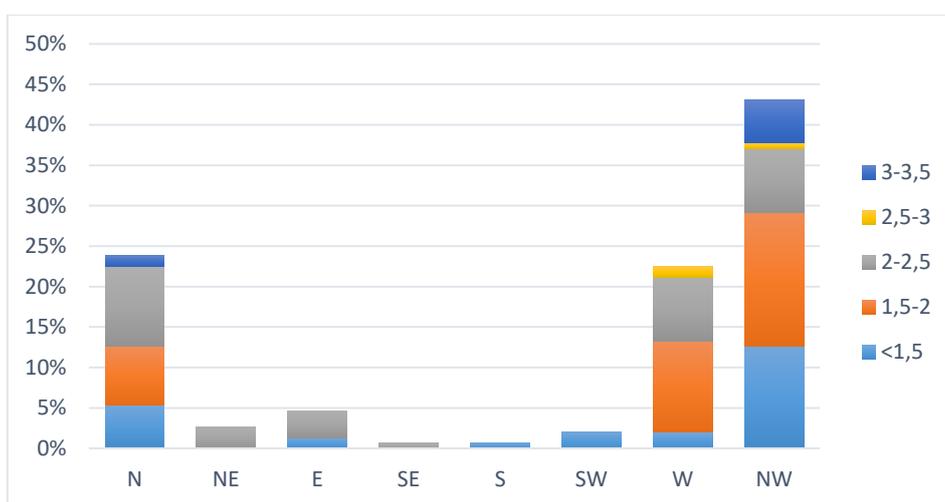


Figure 6.— Répartition des classes de vitesse (en m/s) par direction du vent.

Modélisation du vent en fonction du relief

Les résultats obtenus après la modélisation de la vitesse et de la direction du vent en fonction du relief par le logiciel WindNinja, sont présentés respectivement dans les figures 7 et 8 et le tableau VI. La vitesse à la sortie du modèle est comprise entre 0,6 m/s et 11,15 m/s, alors que la vitesse en entrée au logiciel était seulement de 2,8 m/s. Il est à signaler à ce niveau que la formule de calcul de la vitesse de propagation est singulière pour des vitesses de vents inférieures ou égales à 0,3 m/s ; comme la vitesse minimale obtenue est de l'ordre de 0,6 m/s l'application de cette formule reste toujours valable.

Par ailleurs, sur 83 % du territoire, les vitesses sont comprises entre 5 et 11,15 m/s avec une moyenne de 7,72 m/s (28 km/h), et seulement 17 % de la surface est inférieure au seuil de 5m/s (avec une moyenne de 3,4 m/s). Le terrain accidenté et le relief très marqué de la zone d'étude ont engendré cette très forte variation des vitesses. Aussi, l'orientation des montagnes de hautes altitudes du côté NO-SE engendre la création des vents de couloirs accélérés par l'effet Venturi induit par le

rétrécissement des vallées. Ces facteurs ont joué en faveur de la vitesse du vent et non pas de sa direction puisque la quasi-totalité des directions sont restées inchangées (Fig. 8) (95 % des directions viennent du NO : classe 285-345).

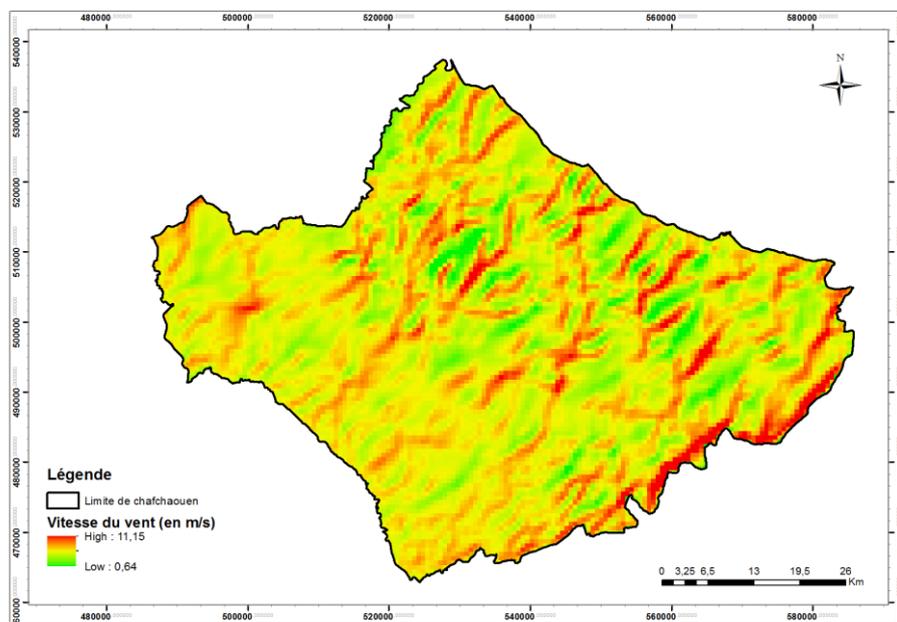


Figure 7.— Carte de la vitesse du vent modélisée en fonction du relief.

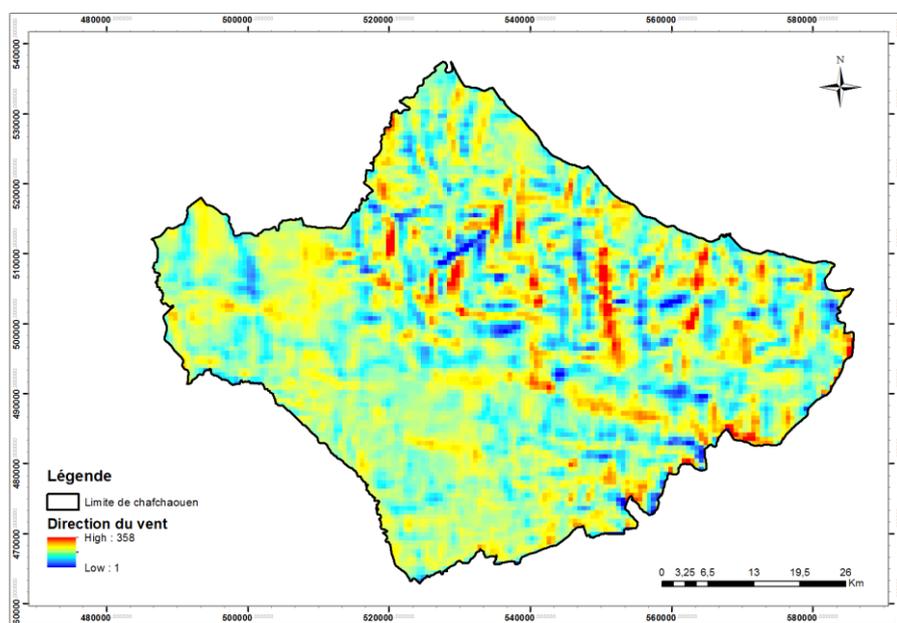


Figure 8.— Carte de la direction du vent modélisée en fonction du relief.

Vitesse initiale V_0

L'application de la formule de la vitesse initiale (V_0) (Équation 4) a permis d'obtenir la carte de la vitesse initiale V_0 (Fig. 9).

TABLEAU VI
Répartition des classes de vitesse du vent

| Classe de Vitesse (m/s) | Superficie (ha) | %superficie |
|-------------------------|-----------------|-------------|
| < 3 | 1615,23 | 0,4% |
| 3 - 5 | 65 316,87 | 17% |
| 5 - 7 | 289 846,08 | 74% |
| 7 - 9 | 31 169,34 | 8% |
| 9 - 12 | 1818,81 | 0,5% |
| Total | 389 766,33 | 100% |

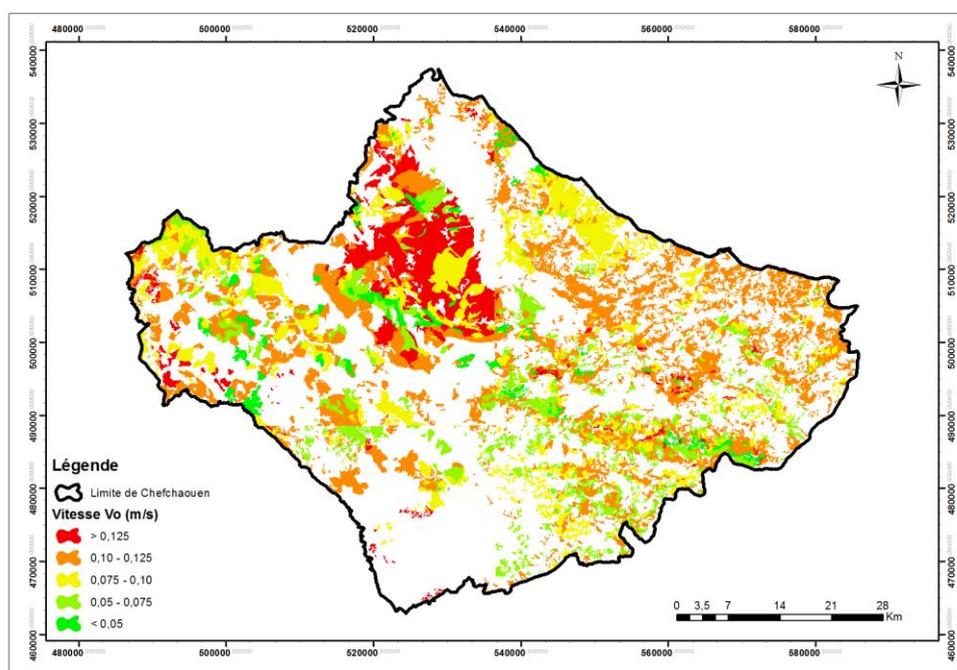


Figure 9.— Carte de la vitesse de propagation initiale (V_0).

Une biomasse importante nécessite plus de temps pour qu'elle soit brûlée, ce qui se traduit par une vitesse initiale de propagation très faible. Ceci explique pourquoi dans les régions Nord-Ouest de la zone d'étude, caractérisées par une biomasse faible (Fig. 4), on assiste à de valeurs de vitesse initiale élevée ($V_0 > 0,125$ m/s).

Humidité

La carte d'humidité (Fig. 10) obtenue montre que la zone du côté Nord-Est est caractérisée par une hygrométrie élevée (entre 51 et 57 %) due principalement aux masses d'air marines. Tandis que, du côté continental au Sud-Ouest de la zone, l'air est relativement sec (humidité entre 33 et 36 %).

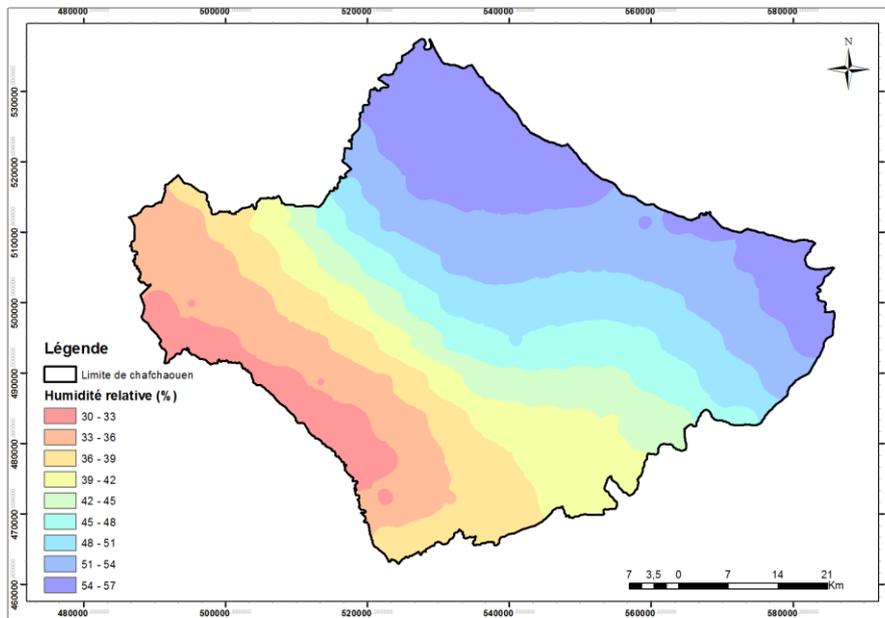


Figure 10.— Carte de l'humidité relative.

Vitesse de propagation

La vitesse de propagation est calculée en utilisant la formule de l'équation 3, le résultat est présenté dans la figure 11 et le tableau VII.

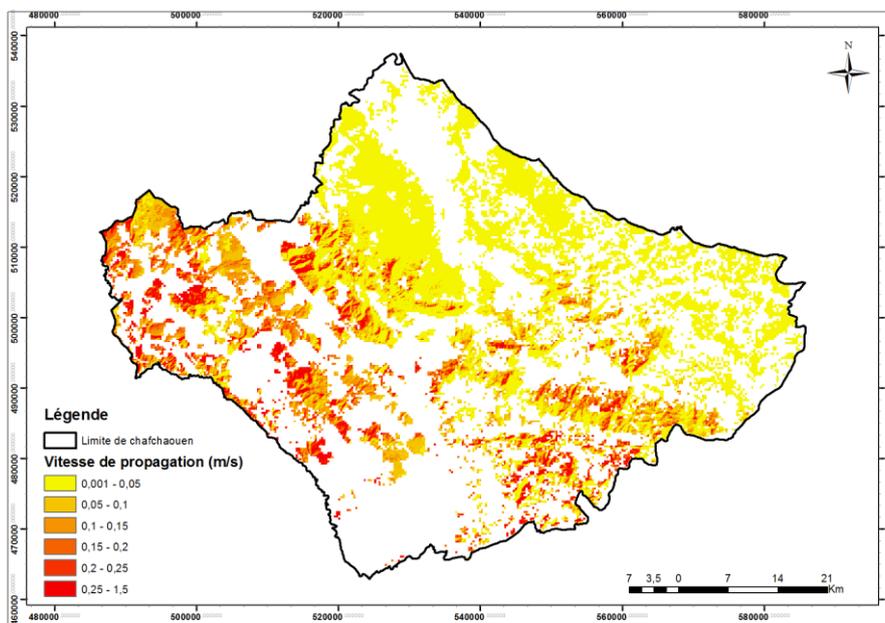


Figure 11.— Carte de la vitesse de propagation.

TABLEAU VII

Répartition des classes de la vitesse de propagation

| Vitesse de propagation (m/s) | Superficie (en ha) | % Superficie |
|------------------------------|--------------------|--------------|
| 0,01 - 0,05 | 96 441,84 | 57% |
| 0,05 - 0,10 | 26 977,59 | 16% |
| 0,10 - 0,15 | 17 233,56 | 10% |
| 0,15 - 0,20 | 9 528,66 | 6% |
| 0,20 - 0,25 | 5 704,56 | 3% |
| 0,25 - 1,50 | 12 649,50 | 8% |
| Total | 168 535,71 | 100% |

La partie Nord-Est est caractérisée par une vitesse de propagation très faible (< 0,05 m/s) sur 57 % de la surface boisée (Tab. VII). Ceci est expliqué principalement par un taux d'humidité élevé dans cette zone (Fig. 10). Tandis que, sur les versants NO caractérisés par une vitesse de vent importante, la vitesse de propagation a atteint un maximum de 1,5 m/s (5,4 km/h) sur presque 10 % du couvert forestier.

CARTE D'INTENSITÉ FINALE

L'application de la formule de Byram ainsi que l'utilisation de la classification adoptée par Lampin (2002, 2003, 2010) (Tab. VIII) ont permis de générer la carte de l'intensité du feu (Fig. 12).

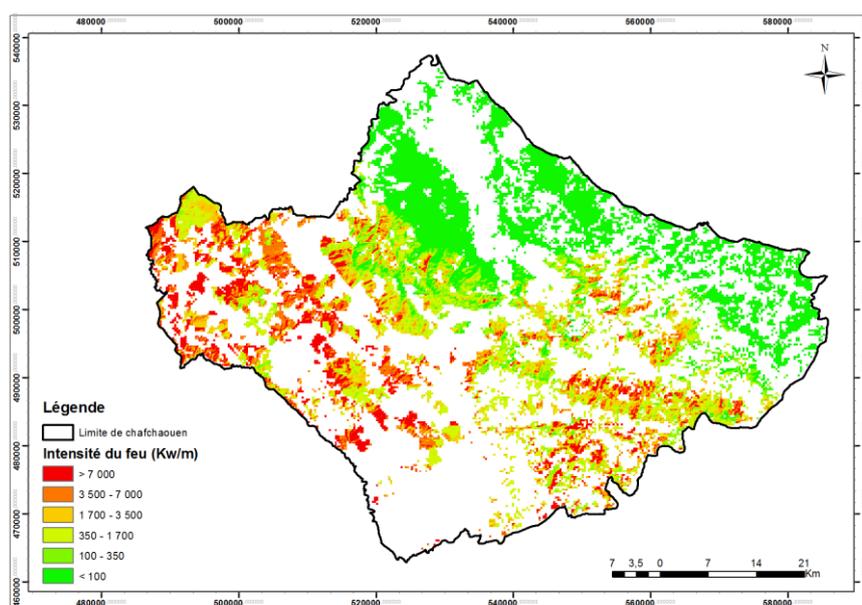


Figure 12.— Carte d'intensité du feu

Cette carte a permis de mettre en exergue que les classes d'intensité moyenne à très élevée (> 1700 kw/m) représentent presque 55 % des superficies boisées dont 11 % affichent des valeurs extrêmes (supérieures à 7000 kW/m) (Fig. 12 & 13). Ces zones sont caractérisées par une croissance spectaculaire de la strate arbustive et une accumulation de la biomasse de combustibles qui dépasse dans certains cas 3-5 kg/m², et elles sont constituées majoritairement par des espèces hautement inflammables comme *Erica arborea*, *Cistus salviifolius*, *Cistus crispus*, *Pistacia lentiscus*, etc.

TABLEAU VIII

Classes d'intensité de feux (Lampin, 2002, 2003)

| Classe | Intensité | Puissance du front de feu (en kW/m) |
|--------|-------------|-------------------------------------|
| 1 | Très faible | Moins de 100 |
| 2 | Faible | Entre 100 et 350 |
| 3 | Moyenne | Entre 350 et 1700 |
| 4 | élevé | Entre 1700 et 3500 |
| 5 | Très élevé | Entre 3500 et 7000 |
| 6 | extrême | Plus de 7000 |

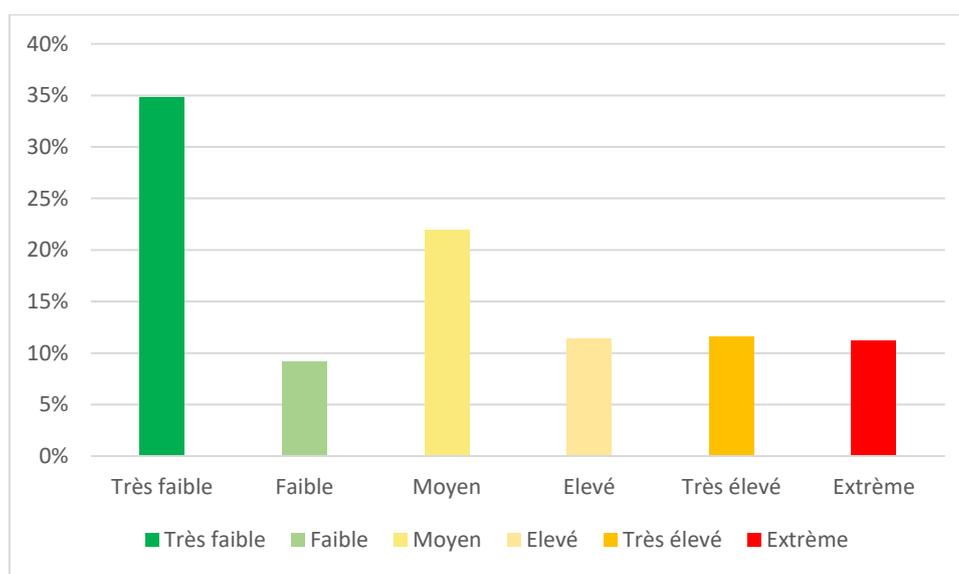


Figure 13.— Répartition des classes d'intensité.

Les travaux d'Assali (2016) dans la zone de Chefchaouen-Ouazzane ont montré que le risque d'éclosion est élevé. Un tel risque conjugué avec une accumulation de la biomasse et une accessibilité moyenne engendreront des dommages importants aux forêts, douars et installations adjacentes. Une sylviculture préventive visant la diminution de la charge du combustible est fortement recommandée pour circonscrire tout départ de feu.

ZONE SENSIBLES AUX FEUX DE CIMES

Les feux de cimes peuvent être enregistrés si la hauteur de la flamme dépasse la hauteur moyenne de la première branche d'un type de combustible, ainsi la carte des zones sensibles au feu de cimes est déterminée en calculant la différence entre la carte de la hauteur de la première branche (obtenue lors de la description des relevés de terrain) (Fig. 14) et la carte de la hauteur de la flamme (obtenue après l'application du modèle de Nelson & Adkins) (Fig. 15).

Le calcul de la différence entre la hauteur de la première branche et la hauteur de la flamme a permis de générer la carte des zones sensibles aux feux de cimes (Fig. 16), qui montre que presque 30 % des forêts dans la zone d'étude sont sensibles aux feux de cimes. De ce fait, la diminution de la charge de combustible ainsi que la rupture de la continuité verticale entre les différentes strates constituent un aspect central de gestion des incendies dans ces zones.

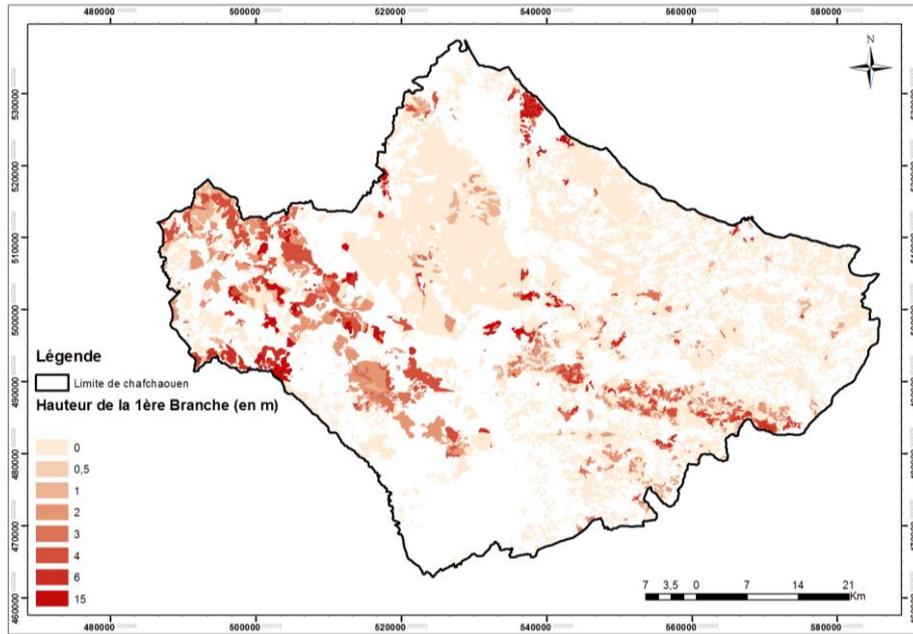


Figure 14.— Carte de la hauteur de la première branche.

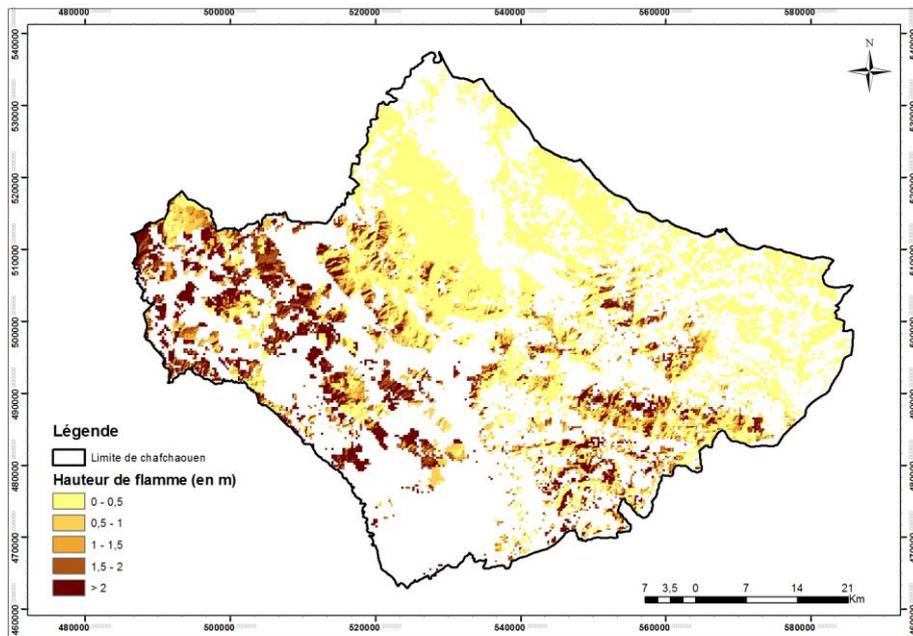


Figure 15.— Carte de la hauteur des flammes.

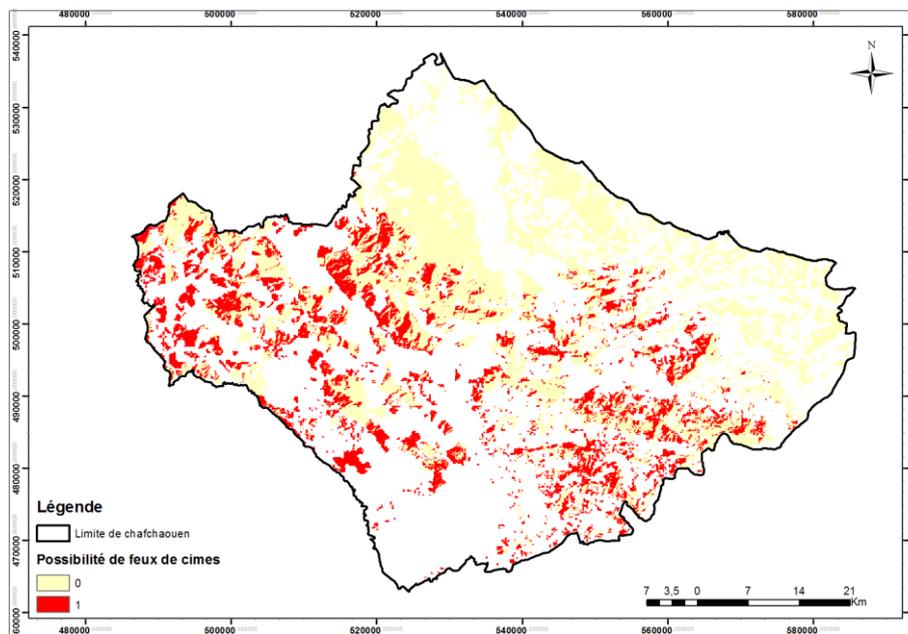


Figure 16.— Carte des zones sensibles aux feux de cimes.

CONCLUSION

Le présent travail, visant la cartographie de l'intensité du feu et des feux de cimes, a mis en évidence que presque 55 % des superficies boisées sont caractérisées par des classes d'intensité moyenne à élevée ($> 1700 \text{ kw/m}$). Ces zones sont caractérisées par une croissance rapide de la strate arbustive et une accumulation d'une biomasse combustible importante, constituée essentiellement d'espèces hautement inflammables (*Erica arborea*, *Cistus salviifolius*, *Cistus crispus*, *Pistacia lentiscus*, etc.). L'accumulation de la biomasse conjuguée avec une accessibilité moyenne et une probabilité d'éclosion forte (Assali *et al.*, 2016) engendrera des dommages importants aux forêts, villages et installations adjacentes. Ainsi, des actions visant la diminution de la charge de combustible (sylviculture préventive) s'avèrent nécessaire afin de limiter toute progression du feu. Toutefois, l'intensité de feu du côté Nord-Est de la zone d'étude affiche des valeurs très faibles malgré l'accumulation de la biomasse végétale ($2\text{-}2.5 \text{ kg/m}^2$), ceci est dû principalement aux taux d'humidité élevés (50-60 %) dans ces zones.

La caractérisation de la disposition des différentes strates du combustible et de la hauteur de la flamme a montré que 30 % de la superficie forestière est située dans des zones sensibles aux feux de cimes. Ainsi, la diminution de la charge de combustible et la rupture de la continuité verticale constituent un aspect central pour la protection des espèces arborées nobles dans ces zones.

De plus, sur presque 10 % du couvert forestier, la vitesse de propagation des feux atteint son maximum de $1,5 \text{ m/s}$ ($5,4 \text{ km/h}$). Les incendies dans ces zones seront d'autant plus difficiles à juguler que le relief et l'altitude imposeront des délais non négligeables pour l'organisation de la lutte. De ce fait, la concentration d'actions visant la résorption des conditions de déclenchement des feux et le pré-positionnement des moyens d'intervention rapide dans les lieux à risque permettra de limiter la propagation en cas d'incendie.

Par ailleurs, La modélisation des vents par le biais du logiciel Windninja a permis de mettre en exergue une grande variation en termes de vitesse du vent, due principalement au relief accidenté de

la zone d'étude. En effet, dans 83 % du territoire, la vitesse a été triplée (en moyenne 7,72 m/s) par rapport à celle entrée au modèle (2,8 m/s). Une nécessité se fait sentir de son utilisation lors des opérations de lutte pour modéliser les prévisions des vents, facteur important dans la propagation des feux, surtout pour les incendies de plusieurs jours.

Enfin, et en vue d'automatiser le traitement de l'ensemble des opérations de calcul de l'intensité et de la hauteur des flammes, il a été procédé au développement d'un outil informatique intégré dans l'environnement d'ArcGIS, basé sur le script Phyton (Annexe 2), permettant de générer automatiquement toutes les cartes (carte d'intensité du feu, biomasse du combustible, vitesse de propagation, hauteur des flammes et zones sensibles aux feux de cimes) afin d'offrir aux décideurs un outil générique et applicable dans d'autres massifs de la région méditerranéenne.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent tout d'abord à remercier vivement le Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte contre la désertification au Maroc. Ils expriment aussi leur profonde gratitude à M. Daniel Alexandrian et à feu Pr. Abdelmalek Benabid ainsi qu'aux quatre relecteurs anonymes qui ont commenté une première version de ce texte.

RÉFÉRENCES

- ALBINI, F.A. (1985).— A model for fire spread in wildland fuels by radiation. *Combust. Sci. Technol.*, 42: 229-258.
- ALBINI, F.A., (1986).— Wildland fire spread by radiation - a model including fuel cooling by natural convection. *Combust. Sci. Technol.*, 45: 101-113.
- ALEXANDER, M.E. (1982).— Calculating and interpreting forest fire intensities. *Can. J. Bot.*, 60: 349-357.
- ALEXANDRIAN, D. (2008).— *Élaboration des cartes de risques aux incendies de forêts du Nord du Maroc. Appui à la mise en oeuvre du programme forestier national*. Projet UTF/MOR, FAO-Rabat, Maroc.
- ALEXANDRIAN, D. & ROUCHDI, M. (2006).— *Cartographie du risque d'incendies de forêts au Maroc*. Rapport Mission-FAO, UTF/MOR/028.
- ANDERSON, W, PASTOR, E., BUTLER, B., CATCHPOLE, E., DUPUY, J.-L., FERNANDES, P., GUIJARRO, M., MENDES-LOPES, J.-M. & VENTURA, J., (2006).— Evaluating models to estimate flame characteristics for free-burning fires using laboratory and field data. *For. Ecol. Manage.*, 234S: S77.
- 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)
- ASSALI, F., MHARZI ALAOU, H., ROUCHDI, M. & BADRAOUI, M. (2016).— Modélisation et cartographie du risque d'éclosion d'incendie de forêt dans le nord-ouest du Maroc (région de chefchaouen-ouazzane). *Rev. Ecol. (Terre et Vie)*, 71: 111-128.
- BEER, T. (1991).— The interaction of wind and fire. *Boundary-Layer Meteorol.*, 54: 287-308.
- 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 Élaboration des cartes de risques aux incendies de forêts du Nord du Maroc. 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.
- BURROWS, N. (1994).— *Experimental development of a fire management model for jarrah (Eucalyptus marginata Donn ex Sm) forest*. PhD thesis, Dept of Forestry, Australian National University, Canberra.
- BYRAM, G.M. (1959).— Combustion of forest fuels. Pp 90-123 In: K.P. Davis (ed.). *Forest fire: Control and use*. McGraw-Hill, New York.
- CATCHPOLE, E.A., DE MESTRE, N.J. & GILL, A.M. (1982).— Intensity of fire at its perimeter. *Austral. For. Res.*, 12: 47-54.
- CATCHPOLE, W.R., CATCHPOLE, E.A., ROTHERMEL, R.C., MORRIS, G.A., BUTLER, B.W. & LATHAM, D.J. (1998).— Rate of spread of free-burning fires in woody fuels in a wind tunnel. *Combust. Sci. Technol.*, 131: 1-37.
- CHERKI, K. & GMIRA, N. (2012).— Répartition spatiale des incendies dans la forêt de la Mâamora (Maroc) en fonction des facteurs humains et physiques. *For. Méditer.*, 33: 19-30.
- 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.

- COUNTRYMAN, C.M. (1972).— *The fire environment concept*. USDA Forest Service, Berkely, CA.
- CRUZ, M.G., BUTLER, B.W., ALEXANDER, M.E., FORTHOFFER, J.M. & WAKIMOTO, R.M. (2006).— Predicting the ignition of crown fuels above a spreading surface fire. Part I: model idealization. *Int. J. Wildland Fire*, 15: 47-60.
- CUNNINGHAM, P. & LINN, R.R. (2007).— Numerical simulations of grass fires using a coupled atmosphere–fire model: dynamics of fire spread. *J. Geophys. Res.*, 112 (D5).
- DUPUY, J. (1999).— *An analysis of semi-empirical and physical models for fire spread in wildland fuels*.
- 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*, 5, n°4: 359-377.
- FERNANDES P., (2009).— *Modelling fire behaviour and effects: recent models*. Forest fires: impacts and post-fire management, 13 - 18 April 2009, Antalya, Turkey
- 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.
- FORTHOFFER, J.M. (2007).— *Modeling wind in complex terrain for use in fire spread prediction*. Colorado State University.
- FORTHOFFER, J.M., BUTLER, B.W., SHANNON, K.S., FINNEY, M.A., BRADSHAW, L.S. & STRATTON, R. (2003).— Predicting surface winds in complex terrain for use in fire spread models. *In Proceedings of the Fifth Symposium on Fire and Forest Meteorology and Second Wildland Fire Ecology and Fire Management Congress*. Orlando, FL. (American Meteorological Society).
- 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 du Rif*. Direction Régionale des Eaux et Forêts de Chefchaouen, Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte contre la Désertification, Tétouan, Maroc.
- HCEFLCD (2014).— *Rapport annuel d'incendies de forêts et bases de données du Service de la Protection des Forêts interne*. Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte contre la Désertification, Rabat-Chellah, Maroc.
- LAMPIN, C., JAPPIOT, M., ALIBERT, N., MANLAY, R. & GUILLANDE, R. (2002).— Prototype of an intensity scale for the natural hazards: Forest fire. *In D. Viegas, (ed.) Proc. IV Intern. Conf. For. Fire Res.* Luso, Portugal.
- LAMPIN CABARET, C., JAPPIOT, M., ALIBERT, N. & MANLAY, R. (2003).— *An intensity scale for forest fire phenomenon*. SURNAT - Journées pour la prévention des risques naturels (JPRN), Orléans, 29-30 janvier 2003.
- LAMPIN-MAILLET C., MANTZAVELAS, A., GALIANA, L., JAPPIOT, M., LONG, M. ET AL., (2010).— *Wildland urban interfaces, fire behaviour and vulnerability: characterization, mapping and assessment*. Towards Integrated Fire Management - Outcomes of the European Project Fire Paradox, European Forest Institute. <hal-00593577>
- LARINI, M., GIROUD, F., PORTERIE, B. & LORAUD, J.-C. (1998).— A multiphase formulation for fire propagation in heterogeneous combustible media. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 41: 881-897.
- LOPES, A.G. (2003).— WindStation - A software for the simulation of atmospheric flows over complex topography. *Envir. Model. & Softw.*, 18: 81-96.
- LINN, R.R. (1997).— *A transport model for the prediction of wildfire behavior*. LosAlamos National Laboratory, Los Alamos, NM (dissertation) LA-13334-T.
- LINN, R.R., CANFIELD, J.M., CUNNINGHAM, P., EDMINSTER, C., DUPUY, J.-L. & PIMONT, F. (2012).— Using periodic line fires to gain a new perspective on multi-dimensional aspects of forward fire spread. *Agric. & For. Meteorol.*, 157: 60-76.
- LINN, R.R. & CUNNINGHAM, P. (2005).— Numerical simulations of grass fires using a coupled atmosphere-fire model: basic fire behavior and dependence on wind speed. *J. Geophys. Res.*, 110 (D13).
- LINN, R.R. & HARLOW, F.H. (1998).— Mixing-limited transport model used for description of wildfires. Pp. 161-168 *In: Computational Technologies for Fluid/Thermal/Structural/ Chemical Systems with Industrial Applications*. ASME, New York.
- MORVAN, D. & DUPUY, J.L. (2001).— Modelling of fire spread through a forest fuel bed using a multiphase formulation. *Combustion and Flame*, 127: 1981-1994.
- MORVAN, D. & DUPUY, J.L. (2004).— Modelling the propagation of a wildfire through a Mediterranean shrub using a multiphase formulation. *Combustion and Flame*, 138: 199-210.
- NELSON, R.M. JR. (1980).— *Flame characteristics for fires in southern fuels*. USDA For. Serv. Res. Pap. SE-205. Southeast For. Exp. Station, Asheville, NC, USA.
- NELSON, R.M. JR. & ADKINS, C.A. (1986).— Flame characteristics of wind-driven surface fires. *Can. J. For. Res.*, 16: 1293-1300.
- PASTOR, E., ZARATE, L., PLANAS, E. & ARNALDOS, J. (2003).— Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour. *Progr. Energy & Combust. Sci.*, 29:139-153.

- PERRY, G. (1998).— Current approaches to modelling the spread of wildland fire: a review. *Progr. Phys. Geogr.*, 22: 222-245.
- REISNER, J.M., WYNN, S., MARGOLIN, L. & LINN, R.R. (2000).— Coupled atmospheric-fire modeling employing the method of averages. *Monthly Weather Rev.*, 128: 2683-2691.
- ROTHERMEL, R.C. (1972).— *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels*. USDA Forest Serv. Intermountain Forest and Range Exp. Stn. Res. Pap. INT-115.
- SANDE SILVA, J., REGO, F., FERNADES, P. & RIGOLOT, E. (2010).— *Towards integrated fire management – Outcomes of the European Project Fire Paradox*. European Forest Institute Research Report 23. 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.
- SNEEUWJAGT, R.J. & PEET, G.B. (1985).— *Forest fire behavior tables for Western Australia*. 3rd edn. WA department of Conservation and Land Management, Perth.
- 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. Wildl. Fire*, 17: 602-613.
- TAYLOR, G.I. (1961).— Fire under influence of natural convection. Pp 10-31 In: W.G. Berl (ed.), *International Symposium on the use of models in fire research*. National Academy of Sciences-National Research Council, Washington D.C.,
- THOMAS, P.H., HINKLEY, P.L., THEOBALD, C.R. & SIMMS, D.L. (1963).— Investigations into the flow of hot gases in roof venting. Fire Research Technical Paper No. 7, HMSO, London.
- TRABAUD, L. (1989).— *Les feux de forêts. Mécanismes, comportement et environnement*. France Sélection, Aubervillier.
- VAN WAGNER, C.E. (1977).— Conditions for the start and spread of crown fire. *Can. J. For. Res.*, 7: 23-34.
- 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.

ANNEXE 1

Phytomasse consommable, Densité d'encombrement et Indice d'inflammabilité par espèce végétale dans la province de Chafchaouen (CEMAGREF in Alexandria, 2008)

| Nom de l'espèce | Indice d'inflammabilité | Densité d'encombrement | Phytomasse consommable |
|---------------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| <i>Abies maroccana</i> | 2 | 2 | 0,3 |
| <i>Acer granatensis</i> | 4 | 1 | 0,3 |
| <i>Ampelodesma mauritanica</i> | 4 | 1,75 | 1 |
| <i>Arbutus unedo</i> | 4 | 1,09 | 0,7 |
| <i>Asphodelus cerasiferus</i> | 5 | 1 | 0,7 |
| <i>Berberis hispanica</i> | 4 | 0,75 | 0,8 |
| <i>Bupleurum spinosum</i> | 5 | 2 | 0,9 |
| <i>Buxus balearica</i> | 5 | 2 | 0,9 |
| <i>Calycotome villosa</i> | 5 | 0,36 | 0,9 |
| <i>Cedrus atlantica</i> | 2 | 2 | 0,7 |
| <i>Chamaerops humilis</i> | 5 | 1,5 | 0,9 |
| <i>Cistus albidus</i> | 5 | 1,34 | 1 |
| <i>Cistus crispus</i> | 4 | 2 | 1 |
| <i>Cistus ladaniferus</i> | 4 | 2 | 1 |
| <i>Cistus laurifolius</i> | 4 | 2 | 1 |
| <i>Cistus monspeliensis</i> | 3 | 2,37 | 1 |
| <i>Cistus salviifolius</i> | 3 | 1,8 | 1 |
| <i>Crataegus lacinata</i> | 2 | 1 | 0,7 |
| <i>Cytisus triflorus</i> | 5 | 0,39 | 0,7 |
| <i>Daphne laureola</i> | 5 | 0,8 | 0,9 |
| <i>Erica arborea</i> | 7 | 1,77 | 0,9 |
| <i>Erica australis</i> | 6 | 1,56 | 0,9 |
| <i>Erica multiflora</i> | 6 | 1,56 | 0,9 |
| <i>Erica scoparia</i> | 7 | 1,56 | 0,9 |
| <i>Erica umbellata</i> | 6 | 1,56 | 0,9 |
| <i>Eucalyptus camaldulensis</i> | 7 | 1,5 | 0,3 |
| <i>Eucalyptus globulus</i> | 7 | 1,5 | 0,3 |
| <i>Eucalyptus gomphocephala</i> | 7 | 1,5 | 0,3 |

| | | | |
|-----------------------------------|---|------|-----|
| <i>Genista demnatensis</i> | 7 | 2 | 0,9 |
| <i>Genista quadriflora</i> | 6 | 2,1 | 0,7 |
| <i>Halimium atlanticum</i> | 4 | 2 | 0,7 |
| <i>Halimium atriplicifolium</i> | 7 | 1,5 | 1 |
| <i>Halimium halimifolium</i> | 3 | 0,5 | 1 |
| <i>Halimium lasianthum</i> | 3 | 2 | 0,7 |
| <i>Helleborus foetidus</i> | 2 | 1 | 1 |
| <i>Juniperus oxycedrus</i> | 7 | 1,5 | 0,9 |
| <i>Juniperus phoenicea</i> | 4 | 2 | 0,9 |
| <i>Lavandula dentata</i> | 7 | 2,23 | 1 |
| <i>Lavandula stoechas</i> | 7 | 2,23 | 1 |
| <i>Myrtus communis</i> | 6 | 1,55 | 0,9 |
| <i>Olea oleaster</i> | 4 | 1 | 0,3 |
| <i>Paeonia maroccana</i> | 1 | 1 | 1 |
| <i>Phillyrea latifolia</i> | 6 | 0,79 | 0,9 |
| <i>Pinus brutia</i> | 8 | 2 | 0,3 |
| <i>Pinus halepensis</i> | 8 | 2 | 0,3 |
| <i>Pinus mauretana</i> | 6 | 2 | 0,3 |
| <i>Pinus pinaster</i> | 6 | 2 | 0,3 |
| <i>Pinus pinaster atlantica</i> | 6 | 2 | 0,3 |
| <i>Pinus pinaster maghrebiana</i> | 6 | 2 | 0,3 |
| <i>Pinus pinea</i> | 5 | 2 | 0,3 |
| <i>Pinus radiata</i> | 6 | 2 | 0,3 |
| <i>Pistacia lentiscus</i> | 6 | 2 | 0,9 |
| <i>Prunus lusitanica</i> | 6 | 1,5 | 0,7 |
| <i>Pteris aquilinum</i> | 7 | 1 | 1 |
| <i>Pterospartum tridentatum</i> | 6 | 1 | 1 |
| <i>Quercus canariensis</i> | 3 | 1 | 0,3 |
| <i>Quercus coccifera</i> | 6 | 1 | 0,9 |
| <i>Quercus faginea</i> | 4 | 1 | 0,3 |
| <i>Quercus pyrenaica</i> | 3 | 1 | 0,3 |
| <i>Quercus rotundifolia</i> | 6 | 1 | 0,3 |
| <i>Quercus suber</i> | 7 | 1 | 0,3 |
| <i>Rhamnus alaternus</i> | 5 | 1,5 | 0,9 |
| <i>Rosa sicula</i> | 5 | 1 | 0,9 |
| <i>Rosmarinus officinalis</i> | 7 | 1,5 | 0,9 |
| <i>Smilax aspera</i> | 7 | 2 | 1 |
| <i>Tetraclinis articulata</i> | 4 | 2 | 0,3 |
| <i>Teucrium oxylepis</i> | 2 | 2 | 1 |
| <i>Thymus capitatus</i> | 7 | 1,55 | 1 |
| <i>Ulex boivini</i> | 5 | 0,5 | 0,7 |
| <i>Ulex parviflorus</i> | 7 | 2 | 0,9 |
| <i>Viburnum tinus</i> | 5 | 2 | 0,9 |

ANNEXE 2

Script Python pour l'estimation de l'intensité de feu et les feux de cimes

```
# -*- coding: utf-8 -*-
# -----
# script.py
# Created on: 2015-12-19 00:41:26.00000
# (generated by ArcGIS/ModelBuilder)
# Description:
# -----
# Import arcpy module
import arcpy
# Check out any necessary licenses
arcpy.CheckOutExtension("spatial")
# Set Geoprocessing environments
arcpy.env.cartographicPartitions = ""
```

```

arcpy.env.snapRaster = "MNT.img"
arcpy.env.cartographicCoordinateSystem =
"PROJCS[Geographic_Coordinate_System_Lambert_Conformal_Conic,GEOGCS[GCS_Geographic_Coordinate_System
',DATUM[D_Merchich',SPHEROID[Clarke_1880',6378249.145,293.465]],PRIMEM[Greenwich',0,0],UNIT[Degree',0,0
174532925199433]],PROJECTION[Lambert_Conformal_Conic],PARAMETER[false_easting',500000.0],PARAMETER
[false_northing',300000.0],PARAMETER[central_meridian',-
5.4],PARAMETER[standard_parallel_1',33.3],PARAMETER[standard_parallel_2',33.3],PARAMETER[scale_factor',0.9
99625769],PARAMETER[latitude_of_origin',33.3],UNIT[Meter',1.0]]"
arcpy.env.referenceScale = ""
arcpy.env.extent = "486376,710778238 462892,859658338 585826,710778238 537412,859658338"
arcpy.env.cellSize = "MNT.img"
arcpy.env.mask = "MNT.img"

# Local variables:
Weather = "Meteo_ref_chefchaouen"
Fuel = "IFN_chafchaouen"
Wind_direction = "direction.img"
Wind_speed = "vitesse_finale.img"
DEM = "MNT.img"
Biomasse = "C:\\Users\\Hicham\\Documents\\ArcGIS\\Default.gdb\\IFN_chafchaouen_PolygonToRas"
Vo = "C:\\Users\\Hicham\\Documents\\ArcGIS\\Default.gdb\\IFN_chafchaouen_PolygonToRas1"
Aspect_ = "C:\\Users\\Hicham\\Documents\\ArcGIS\\Default.gdb\\Aspect_img1"
Slope_deg = "C:\\Users\\Hicham\\Documents\\ArcGIS\\Default.gdb\\Slope_img1"
Slope_perc = "C:\\Users\\Hicham\\Documents\\ArcGIS\\Default.gdb\\Slope_img2"
Humidity = "C:\\Users\\Hicham\\Documents\\ArcGIS\\Default.gdb\\ldw_shp3"
speed2 = "C:\\Users\\Hicham\\Documents\\ArcGIS\\Default.gdb\\rastercalc4"
Slope_45 = "C:\\Users\\Hicham\\Documents\\ArcGIS\\Default.gdb\\rastercalc5"
Speed3 = "C:\\Users\\Hicham\\Documents\\ArcGIS\\Default.gdb\\rastercalc6"
speed1 = "C:\\Users\\Hicham\\Documents\\ArcGIS\\Default.gdb\\rastercalc7"
speed_final = "C:\\Users\\Hicham\\Documents\\ArcGIS\\Default.gdb\\rastercalc8"
fire_intensity = "C:\\Users\\Hicham\\Documents\\ArcGIS\\Default.gdb\\rastercalc9"
flame_high = "C:\\Users\\Hicham\\Documents\\ArcGIS\\Default.gdb\\rastercalc10"
fire_intensity__ = "C:\\Users\\Hicham\\Documents\\ArcGIS\\Default.gdb\\rastercalc11"
v1st_branch = "C:\\Users\\Hicham\\Documents\\ArcGIS\\Default.gdb\\IFN_chafchaouen_PolygonToRas2"
Crown_fire = "C:\\Users\\Hicham\\Documents\\ArcGIS\\Default.gdb\\rastercalc12"

# Process: Polygon to Raster
arcpy.PolygonToRaster_conversion(Fuel, "biomasse", Biomasse, "MAXIMUM_AREA", "NONE", "300")

# Process: Polygon to Raster (2)
arcpy.PolygonToRaster_conversion(Fuel, "vitesse", Vo, "MAXIMUM_AREA", "NONE", "280")

# Process: IDW
arcpy.gp.Idw_sa(Weather, "H_REL", Humidity, "30", "2", "VARIABLE 12", "")
# Process: Raster Calculator (4)
arcpy.gp.RasterCalculator_sa("0.25 * (\\%Vo%) * (- 0.2 * \\%Humidity% + 10.5) * Ln((\\%Wind_speed%) - 0.3)",
speed1)
# Process: Slope
arcpy.gp.Slope_sa(DEM, Slope_deg, "DEGREE", "1")
# Process: Raster Calculator (2)
arcpy.gp.RasterCalculator_sa("Con(\\%Slope_deg% < 45, \\%Slope_deg%", 45), Slope_45)
# Process: Slope (2)
arcpy.gp.Slope_sa(DEM, Slope_perc, "PERCENT_RISE", "1")
# Process: Aspect
arcpy.gp.Aspect_sa(DEM, Aspect_)
# Process: Raster Calculator
arcpy.gp.RasterCalculator_sa("Con(\\%Slope_perc% < 5.0) | (\\%Aspect_% == -1), 0, Cos((\\%Aspect_%") -
(\\%Wind_direction%)) * 3.14 / 180.0)", speed2)
# Process: Raster Calculator (3)
arcpy.gp.RasterCalculator_sa("Exp(0.07 * \\%Slope_45% * \\%speed2%)", Speed3)

# Process: Raster Calculator (5)
arcpy.gp.RasterCalculator_sa("\\%speed1% * \\%Speed3%", speed_final)

```

```
# Process: Raster Calculator (6)
arcpy.gp.RasterCalculator_sa("18000 * \">%Biomasse%\ " * \">%speed_final%\ ", fire_intensity)

# Process: Raster Calculator (8)
arcpy.gp.RasterCalculator_sa("Con(\">%fire_intensity%\ "<0,0,\">%fire_intensity%\ ")", fire_intensity_)

# Process: Raster Calculator (7)
arcpy.gp.RasterCalculator_sa("\">%fire_intensity_+\ " / (360 * \">%Wind_speed%\ ")", flame_high)

# Process: Polygon to Raster (3)
arcpy.PolygonToRaster_conversion(Fuel, "1ere_bran", v1st_branch, "MAXIMUM_AREA", "NONE", "30")

# Process: Raster Calculator (9)
arcpy.gp.RasterCalculator_sa("\">%flame_high%\ " - \">%1st_branch%\ ", Crown_fire)
```