

SIG, TELEDETECTION ET EVALUATION DE RISQUE D'INCENDIE DE FORETS «EXEMPLE DU MASSIF FORESTIER KHEZANA (PROVINCE DE CHAOUENE)»

Ali Faleh,¹ Houcine Lakhouaja, Abdelhamid Sadiki et Jamal Chaouan
Université Sidi Med. B. Abdellah, Fès (Maroc)

RESUMEN

Los incendios forestales constituyen el factor más temible de degradación del bosque marroquí. Caen gravosamente sobre el desarrollo y la economía local. Los métodos clásicos generalmente utilizados en Marruecos para la prevención y la lucha contra los incendios requieren de tiempo y no son siempre fiables dada la complejidad y la diversidad de ecosistemas forestales.

El objetivo de este trabajo es la utilización de SIG y de la teledetección para la aplicación de un método propuesto por DAGONE Y DUCHE en 1994 a fin de elaborar una cartografía de peligro de incendio de la masa forestal de Khezana situada en la provincia de Chaoune. La aproximación adoptada es un modelo empírico que hace intervenir a tres parámetros que controlan el comportamiento del fuego, la topomorfología del terreno, la combustibilidad de la cobertura vegetal y la actividad humana.

Palabras clave: incendios, SIG, teledetección, vulnerabilidad, riesgo, bosque, Khezana, peligro.

SIG, TELEDETECTION AND EVALUATION OF FOREST RISK «EXAMPLE OF FOREST KHEZANA (PROVINCE CHAOUENE)»

RÉSUMÉ

L'incendie de forêts constitue le facteur de dégradation le plus redoutable de la forêt marocaine. Il pèse lourdement sur l'environnement et l'économie locale. Les méthodes classiques généralement utilisées au Maroc pour la prévention et la lutte contre les incendies demandent du temps et ne sont pas toujours fiables au vu de la complexité et de la diversité des écosystèmes forestiers.

L'objectif de cette note est l'utilisation du SIG et de la télédétection pour l'application d'une méthode mise au point par DAGORNE Y. DUCHE en 1994 afin d'élaborer une carte de risque d'incendie du massif forestier Khezana située dans la province de Chaouene. L'approche adoptée est un modèle empirique qui fait intervenir trois paramètres qui contrôlent le comportement du feu, la topomorphologie du terrain, la combustibilité du couvert végétal et l'activité humaine.

Mots clés: incendies, SIG, Télédétection, vulnérabilité, aléa forêts, Khezana, risque.

Fecha de recepción: 1 de marzo de 2012. Fecha de aceptación: 23 de noviembre de 2012.

¹ Faculté des Lettres Saïss – Fès, LEGAC BP 59 Route D'Imouzzer –Maroc.
falehali2001@yahoo.fr/sadiki_a@yahoo.fr

INTRODUCTION

L'incendie représente la menace naturelle et le phénomène chronique qui pèsent lourdement sur les forêts du bassin méditerranéen. Elle cause des dégâts énormes par l'ampleur des surfaces touchées. Chaque année 400 000 ha de forêts et d'espaces naturels sont ravagés par le feu et pas moins de 50 000 départ de feu sont déclarés (TAILLEUX, 2006). Le Maroc contribue par une superficie moyenne annuelle de 2938 ha et un nombre moyen de départ de feu de 266 /an. Des maxima de l'ordre de 11 300ha en 1983 et 8660ha en 2004 ont été enregistrés (HCEFLCD, 2006). Ceci engendre des pertes économiques, écologiques et sociales importantes sur le long terme en plus des pertes forestières immédiates.

L'apparition, la fréquence et l'intensité des incendies de forêt sont étroitement liées aux conditions climatiques et topomorphologiques, aux caractéristiques de la végétation et aux actions anthropiques. Le climat méditerranéen de la province de Chaouene est marqué par de longues périodes estivales sèches, accompagnées le plus souvent, par des vents violents et desséchants (chergui). Ces conditions font baisser l'humidité atmosphérique au-dessous de 30% et la teneur en eau de la litière forestière en dessous de 5% accentuant sa combustibilité. L'abondance du combustible végétal, plus le caractère accidenté du relief et la forte densité démographique font de cette province une zone à haut risque pour les feux de forêts au Maroc. Dans cette région, on enregistre le plus important nombre de départs de feux et une perte d'environ 450ha/an (moyenne sur 20 ans) pour 25 incendies/an en moyenne (HCEFLCD, 2006).

Parmi les incendies qui ont marqué l'histoire de la province de Chaouene, celle survenue dans le massif forestier Khezana le 23 août 2004. Il a ravagé une superficie de 4500 ha (dont 1500 ha dans la province d'Ouezzane) soit un pourcentage de (55%) des superficies incendiées à l'échelon national (HCEFLCD, 2004).

Quelque soit les moyens de lutte contre le feu, il y a toujours des dégâts plus ou moins importants lorsque l'incendie est déclaré. C'est pourquoi, la prévention s'impose comme seul moyen de lutte efficace contre ce phénomène. L'incertitude, la complexité et la diversité des facteurs qui contrôlent le risque d'incendie de forêts font que la prévention par des moyens traditionnels reste insuffisante. Elle ne peut se concrétiser qu'à travers la contribution d'une cartographie interactive avec des moyens modernes et rapides comme les SIG et la Télédétection.

Dans cette perspective, l'objectif de cette étude est d'évaluer la susceptibilité des secteurs exposés au risque d'incendie à travers un modèle qui intègre et organise spatialement des données multi sources. La cartographie de la variabilité spatiale des principaux facteurs du risque d'incendie de forêts permet une caractérisation basée sur une analyse thématique et spatiale et une modélisation des paramètres physiques et humains.

1. PRESENTATION DU MASSIF FORESTIER KHEZANA

Le massif forestier Khezana couvrant une superficie de 14 560 ha, chevauche sur deux provinces: La province d'Ouezzane au sud-ouest et celle de Chefchaouen. Il s'étend entre les parallèles 34°58'09" N et 34°43'38" N et les méridiens 5° 20'19" W et 5° 32'21"

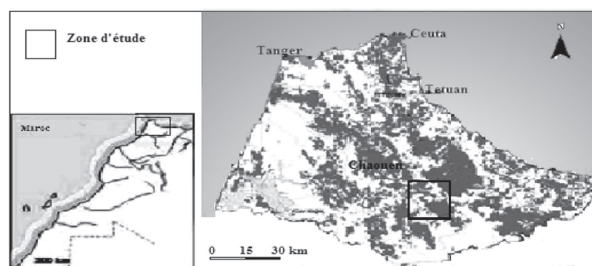


FIGURE 1. Localisation géographique de la zone d'étude

W. Le massif forestier Khezana est caractérisé par un relief accidenté et dont l'amplitude altitudinale est comprise entre 350 et 1690 m environ.

Le massif Khezana est situé dans le thermoméditerranéen dont l'ensemble floristique caractérisant la végétation forestière est dominé par les formations de *Chêne liège* qui occupent 34%, de *Pinus halepensis* à concurrence de 24%, de *Quercus rotundifolia* à hauteur de 20% et de sol nu et enclaves agricoles de l'ordre de 22%. La carte de l'occupation du sol met en relief l'impact des formations résineuses comme le montre le tableau 2 ci-dessous, totalisant 58% de la superficie de la forêt augmentant les risques de déclenchement des incendies

2. APPROCHE METHODOLOGIQUE

L'établissement de la carte de risque d'incendie de forêts fait appel à l'application d'un modèle mis en place par DAGORNE Y. DUCHE (1994) et testés sur les massifs forestiers de la région méditerranéenne.

Ce modèle fait intervenir les trois principaux facteurs pour l'évaluation du risque de feu de forêt à savoir: la topomorphologie, le combustible et l'Homme qui constitue en même temps un facteur mais aussi l'enjeu présentant une certaine vulnérabilité. Le modèle repose sur la formule suivante:

$$\mathbf{IR} = \mathbf{5.IC} + \mathbf{2.IH} + \mathbf{IM}$$

IR: Indice de risque de feu de forêt

IC: Indice de combustibilité (facteur lié au combustible)

IH: Indice d'occupation humaine (facteur lié à l'activité humaine)

IM: Indice topomorphologique (facteur lié à la topomorphologie du terrain)

La caractérisation de cet indice est basée sur la variabilité spatiale du risque d'incendie dont la détermination est issue des paramètres physiques et humains intervenant dans le modèle choisi.

1. L'indice topomorphologique (IM)

Trois paramètres topographiques interviennent dans le modèle: la pente, l'exposition et l'altitude. Tous ces paramètres sont déduits à partir du modèle numérique de terrain (M.N.T) de la région. Cet indice est exprimé par la relation suivante:

$$IM = 3p + (m \cdot e)$$

p: la pente

m: la topomorphologie

e: l'exposition

2. L'Indice de Combustibilité (IC)

La végétation est caractérisée par sa combustibilité qui représente son aptitude à propager le feu en se consumant. Elle traduit donc sa façon de se consumer, en libérant des quantités de chaleur plus ou moins importantes. La combustibilité dépend de la structure et des espèces dominantes de la forêt. Elle est corrélée à la quantité de biomasse combustible (BV) lié à la structure du combustible et sa composition.

Pour évaluer l'indice de combustibilité (IC), MARIEL (1995) proposée la méthode suivante:

$$IC = 39 + 0,23 BV (E1 + E2 - 7,18)$$

BV: représente le biovolume de la formation végétale.

E1: représente les notes de combustibilité pour les ligneux hauts les plus dominantes.

E2: représente les notes de combustibilité pour les ligneux bas ou les herbacées les plus dominantes.

3. L'indice d'occupation humaine (IH)

La présence de la population et de ses habitations près des forêts constituent l'enjeu dont l'importance détermine le degré de vulnérabilité du milieu. Il s'agit de la protection des vies humaines et des installations. Ainsi le paramètre anthropique est le principal terme dans le modèle de l'indice de l'activité humaine.

Cet indice dépend de l'occupation humaine de l'espace et de son activité. Pour décortiquer la composante activité humaine, nous avons proposé une démarche faisant intervenir deux aspects : source de départ de feu et enjeux.

- Le premier paramètre (IV) est basé sur l'impact anthropique sur le proche voisinage forestier sur une profondeur de 100 m. Nous supposons que l'être humain exerce une pression sur son proche voisinage forestier.
- Le deuxième paramètre (ID) tient compte les infrastructures routières (routes, pistes, sentiers). Cependant les éclosions d'incendie sont beaucoup plus fréquentes près des routes et des chemins de parcours des forêts.

L'indice d'occupation humaine sera, alors, exprimé par la combinaison linéaire des deux indices soit:

$$IH = IV + 2ID$$

IV: indice de voisinage

ID: indice de présence humaine

III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Pour évaluer le risque d'incendie de forêts lors de cette étude on a adopté le modèle cité plus haut en deux étapes:

Etape 1^o Elaboration des cartes thématiques des facteurs de risque par la digitalisation des données spatiales et élaboration des bases de données attributaires. Cette étape consiste à intégrer en mode vecteur la variabilité spatiale des différents facteurs (peuplement, voisinage, occupations humains et topographie). Convertir ensuite les données en mode raster pour applique des analyses spatiales et en déduire la topomorphologie.

Etape 2 Superposition et croisements des cartes thématiques et application des formules de la technique dans le SIG pour faire ressortir les cartes de vulnérabilité avec les statistiques nécessaires pour l'interprétation.

1. Indice topomorphologique (IM)

La digitalisation des courbes de niveaux a permis de générer le model numérique du terrain (MNT) à partir du quel on a déduit la géométrie des surfaces. Le SIG a permis par la suite de déduire la carte des pentes et de l'exposition des versants de la zone d'étude. Ces cartes ont été utilisées pour calculer l'Indice Topomorphologique l'un des paramètres retenu et utilisé dans l'approche méthodologique.

A. La carte des pentes

La pente modifie l'inclinaison relative des flammes par rapport au sol et favorise, lors d'une propagation ascendante, l'efficacité des transferts thermiques par rayonnement et convection. Les feux ascendants brûlent donc plus rapidement sur les pentes fortes. En revanche, un feu descendant voit sa vitesse considérablement ralentie.

Quatre classes de pente ont été retenues en fonction de leur incidence, leur fréquence d'apparition et leur distribution spatiale (Tableau 1, Fig 2).

TABLEAU 1. Classes de pentes

Classes de pentes	Superficie en ha	Pourcentage %	Code
$P < 15\%$	1 048,38	15%	1
$15\% \leq P < 30\%$	3 060,24	43,79%	2
$30\% \leq P < 60\%$	2 669,30	38,19%	3
$P \geq 60\%$	211,14	3,02%	4

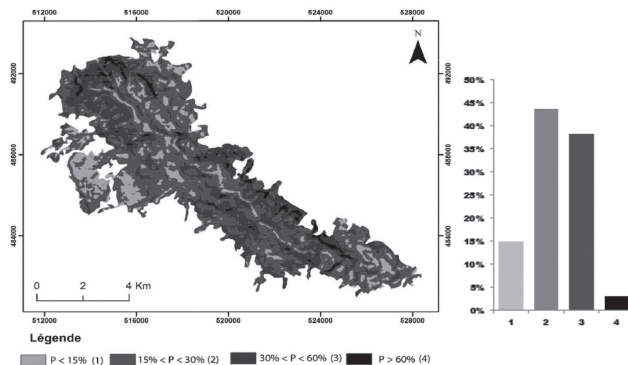


FIGURE 2. Carte de pentes

La carte des pentes (Fig. 2) montre un faible pourcentage des classes de pentes faibles et très fortes dans la zone d'étude respectivement 15% et 3,02%, les classes de pentes moyennes et fortes représentent respectivement 43,79% et 38,19%, donc notre zone d'étude est presque dominée par les classes de pentes moyennes et fortes (plus de 82%).

B. La carte des expositions

L'exposition traduit la situation du versant par rapport aux vents dominants et à l'ensoleillement. En effet, elle joue également un rôle indirect sur la progression du feu.

Sur les versants exposés aux vents la propagation est différente à ceux exposés sous le vent. En général, les versants SUD et EST présentent les conditions les plus favorables pour une inflammation. (Tableau 2).

Tableau 2: Classes des expositions

Orientation	Superficie en ha	Pourcentage	Code
EST	1 633,48	23,37%	3
SUD	2 190,29	31,34%	2
OUEST	1 672,76	23,93%	1
NORD	1°492,55	21,36%	0

Quatre principales classes d'expositions ont été retenues dont chaque exposition correspondant à un quartier de 45° centré sur la valeur moyenne de cette exposition. Elles sont déterminées par rapport aux quatre points cardinaux avec des valeurs exprimées en degré avec le nord comme origine.

La carte des expositions du massif forestier Khezana (Fig. 3), ne présente que 23,37% de surfaces ayant des expositions EST et que 31,34 % de celles ayant des expositions

SUD, en revanche les expositions défavorables pour l'ensoleillement et les vents dominants (OUEST et NORD) représentent moins de 45 % de la superficie totale de la zone d'étude.

C. La Carte de Topomorphologie

La position dans le versant ou la topomorphologie «m» pondère l'intensité du feu en fonction de la position sur le relief. La topomorphologie a été retenue en fonction des classes de pentes dérivées du MNT.

Les quatre classes définissent les situations topographiques de plus en plus défavorable pour la lutte:

TABEAU 3. Classes de la topomorphologie «m»

Classe des pentes	Topographie	Pourcentage	Superficie	Code
$P < 3\%$	Plaine	0,39 %	27,17	1
$3\% \leq P < 12,5\%$	Bas piémont	8,22 %	574,30	2
$12,5\% \leq P \leq 25$	Haut piémont	35,81%	2 502,72	3
$P > 25\%$	Montagne	55,59%	3 884,88	4

Le tableau ci-dessus reflète un pourcentage de plus de 90% de la superficie étudiée des montagnes et des hauts piémonts, par contre les plaines et les bas piémonts représentent un faible pourcentage par rapport à la surface étudié (moins de 10%).

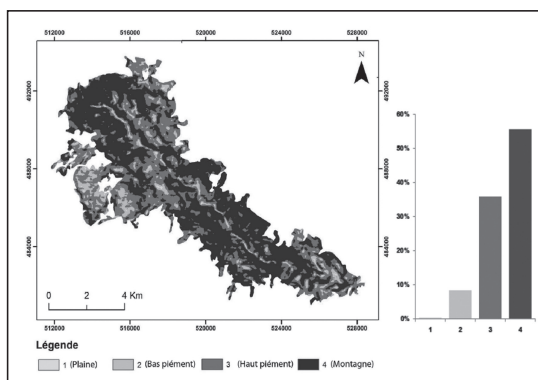


Figure 4. Carte de la topomorphologie

D. Carte de l'indice topomorphologique (IM)

L'indice topomorphologique est obtenu par superposition de la carte de pentes, de l'exposition et de la topomorphologie et l'intégration de la formule de l'indice topomorphologique dans le SIG.

Les résultats obtenus nous ont permis d'obtenir quatre classes topomorphologiques récapitulées selon leur importance dans le tableau 4.

TABEAU 4: classes de l'indice topomorphologique

IM	Signification	Pourcentage %	Superficie (ha)	Code
IM<9	Peu favorable	75,62	5284,88	1
9<IM<14	Moyennement favorable	13,57	948,52	2
14<IM<19	Favorable	8,13	568,44	3
IM>19	Très favorable	2,68	187,22	4

Un pourcentage de plus 75% de la superficie de la forêt Khezana se trouve dans des conditions topomorphologiques peu favorables à l'accentuation de feu. Les conditions moyennement favorable au risque incendie sont de 13%, et seulement 10% dans les tranches, favorable et très favorable.

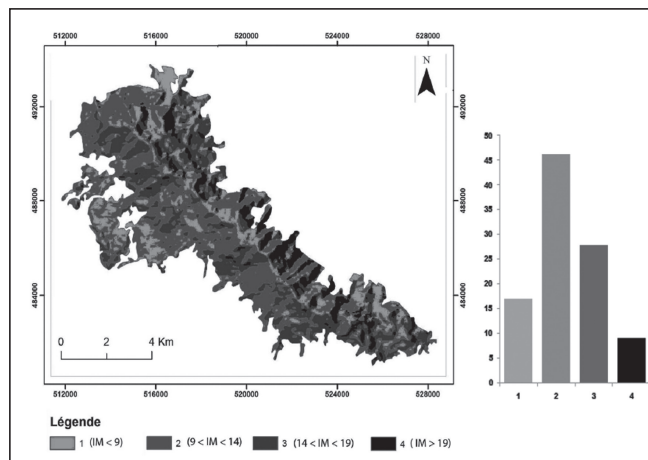


FIGURE 5. Carte de l'indice Topomorphologique

2. l'Indice de combustibilité

A. Carte de l'indice de combustibilité

La carte de l'indice de combustibilité IC a été extraite à partir de la carte de végétation, de la carte NDVI (Fig. 6) et de la carte de combustibilité de chaque espèce. La densité de la végétation ou la biomasse relative est considérée comme un facteur important dans l'extension des incendies de forêt. Elle a été déterminée en calculant l'indice de végétation normalisé (NDVI) à partir des images satellitaires, par contre les notes d'intensité calorique des espèces présentes dans la forêt Khezana (E1 et E2) ont été extraites de celles

établies par le CEMAGREF à l'exception de Chêne liège qui a été assimilé au chêne vert qui est l'espèce la plus proche.

Les valeurs de l'indice de combustibilité sont codées en quatre classes reflétant le mieux possible la répartition du combustible dans le massif en relation avec la combustibilité de chaque espèce. Les résultats de ce traitement sont illustrés par la carte de l'indice de combustibilité (Fig.7), et récapitulé par le tableau 6.

Tableau 5: Indice de combustibilité

Classe de l'IC	Note de risque	Superficie en ha	pourcentage	Code
IC<40	FAIBLE	6442,37	92,18%	1
4 ≤ IC < 50	MODERE	546,71	7,82%	2
50 ≤ IC < 60	ELEVE	0	0%	3
IC ≥ 60	TRES ELEVE	0	0%	4

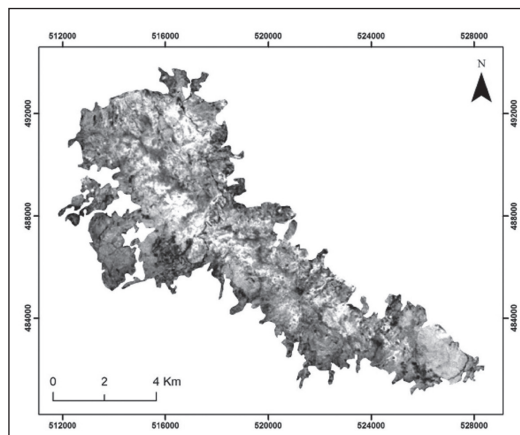


FIGURE 6: Carte de l'indice de végétation

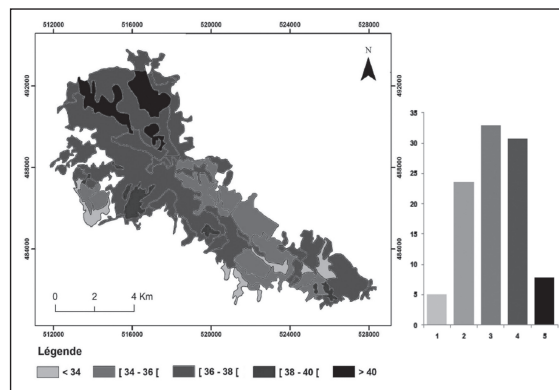


FIGURE 7: Carte de l'indice de combustibilité

On remarque que plus de 92% de la superficie de la forêt Khezana présente un indice de combustibilité faible et uniquement 7 % de cette superficie présente un indice de combustibilité modéré. Ceci peut-être expliqué par la dominance des espèces à combustibilité faible tel que le Chêne liège et le chêne vert et qui se manifestent favorablement contre la propagation de feu.

3. L'Indice d'occupation humaine

Comme nous avons détaillé auparavant dans la partie méthodologique, l'indice d'occupation humaine, se décompose selon la formule adopté en deux indices, celui de voisinage et celui d'occupation humaine, qu'on a assimilé par des surfaces tampons (Buffers) de 100 m de profondeur de part et d'autre des routes et des pistes selon leur degré de trafic et autour les habitations installées au sein ou en lisière de la forêt.

L'Indice d'occupation Humaine, reflète des petites superficies dont le risque de départ de feu de forêt intervient, cette situation est due aux faibles densités humaines et à la faible densité du réseau routier implanté en forêt.

4. Carte de l'indice de risque de feu

Le calcul de l'indice de risque du feu est le résultat de croisement entre la couche de l'indice de combustibilité, la couche de l'indice topomorphologique et l'indice d'activité humain en appliquant la formule suivante:

$$IR = 5.IC + 2.IH + IM$$

Tableau 6: Classes de l'Indice de Risque de feu (IR)

Classe de l'IR	Signification	Superficie	Pourcentage
IR > 12	Risque très fort	646,16	9,25%
9 < IR < 12	Risque fort	466,76	6,68%
6 < IR < 9	Risque moyenne	4967,3	71,07%
IR < 6	Risque faible	908,86	13,00%

La forêt Khezana reste au regard des résultats obtenus, malgré la forte présence d'espèces ligneuses, dans le domaine du risque moyen avec une proportion de 71% et du risque faible avec un pourcentage de 13% face aux incendies. Cette conclusion se confirme en exploitant les données statistiques des incendies dans cette forêt qui n'a pratiquement pas subi d'incendies entre la période 1994 et 2004 (HCEFLCD, 2006).

Les conditions topomorphologiques de la forêt Khezana sont peu favorables (faible pentes, exposition vers l'OUEST et vers le NORD), ainsi que la forêt Khezana est dominée par un indice de combustibilité faible (92%), ce qui minimise le risque d'avoir des

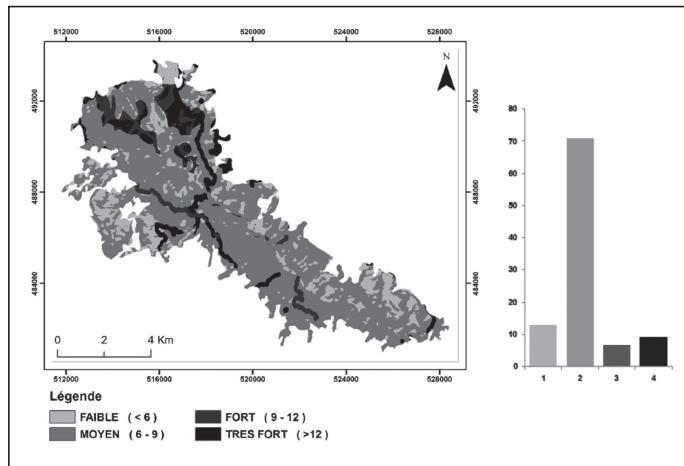


Figure 8: Carte de l'Indice Risque de Feu

incendies. Cette situation peut conforter notre résultat vu le rôle primordial de la topomorphologie du terrain et la combustibilité du couvert végétal sur les risques des incendies de forêt.

Les résultats de l'application de ce modèle empirique ne peuvent être acceptés sans s'interroger sur leur validation comme c'est le cas pour tous les modèles empiriques. Dans notre cas l'application du modèle s'est effectuée sans tenir compte des incendies de forêts qui se sont produits dans la région.

L'étude diachronique des feux de forêts sur les images satellites ont permis de constater que la majorité des feux qui se sont déclarés aux cours de la dernière décennie se sont produits surtout dans les zones à risque fort et très fort et que les feux qui se sont déclarés dans les zones à risque faible et moyen ont été très limités dans le temps et dans l'espace.

CONCLUSION GENERALE

L'étude et l'évaluation des risques d'incendies au niveau de la forêt Khezana à l'aide de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques (SIG), ont permis d'établir une carte de risque de feu de forêt en superposant plusieurs couches d'informations tirées des documents existants ou collectés sur le terrain.

La carte du risque du feu de forêt elle-même, n'est pas un moyen de lutte proprement dit, mais elle permettra au forestier de mettre en place un dispositif de lutte adéquat d'une part, et d'acquérir des équipements adéquats permettant une lutte plus efficace d'autre part.

La carte résultante des différents croisements issus du modèle appliqué a été visualisée et validée à l'aide de repérage des sites de feu déclarés et observés sur le terrain

La validation a été aussi possible grâce à la télédétection. En comparant les indices NDVI des images satellites prises périodiquement. Le NDVI permet de distinguer différentes occupations des sols et de détecter les zones affectées par les feux de forêts.

L'application de la géomatique pour évaluer le risque d'incendie de forêts constitue:

- Une aide à la décision pour une politique raisonnée en matière de gestion de l'environnement, notamment en matière de lutte et de prévention contre les incendies de forêts.
- Un outil efficace pour définir les priorités d'implantation ou d'entretien des infrastructures de lutte et d'aménagement des terrains exposés au risque d'incendie.

L'ampleur de l'incendie survenue dans le massif Khezana en 2004 ne peut être expliquée simplement par les résultats obtenus par le modèle adopté (IM, IC, IH). Localement ce modèle a montré ses limites car il existe d'autres facteurs qui ne sont pas pris en compte dans le modèle. Il s'agit d'un facteur anthropique lié à la culture de Cannabis.

La population peut être responsable du déclenchement volontaire des feux de forêts pour deux raisons, le défrichement de la forêt pour l'extension des terrains agricoles et comme réaction aux campagnes d'éradication des champs de culture de cannabis entreprise par les autorités. On constate une certaine coïncidence entre les interventions d'éradication de cette culture et des départs de feux.

Les écosystèmes équilibrés et ayant une composition floristique naturelle, sont les moins sensibles au déclenchement des incendies, ce qui vise une révision de la politique de reboisement des pins.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- CEMAGREF, (1989): *Guide technique du forestier méditerranéen Français, protection des forêts contre les incendies*, volume II, France, Fiches 5 et 8.
- DAGORNE, Y. DUCHE et al. (1994): Protection des forêts contre les incendies & Système d'information géographique: Application à la commune d'Auribeau sur Siagne (Alpes Maritimes). *Revue forêt méditerranéenne* t. XV, n°4, octobre.
- HCEFLCD, (2004): Rapport annuel sur les incendies de forêts, *Division d'Équipement et de la Protection des Forêts*, Rabat, Maroc, 20 pp.
- HCEFLCD, (2006): Rapport sur les incendies de forêts, *Division d'Équipement et de la Protection des Forêts*, Rabat, Maroc, 35 pp.
- MARIEL, A. (1995): Cartographie du niveau de risque d'incendie: exemple du massif des Maures, *CEMAGREF*.
- TAILLEUX, C. (2006): Cemagref, UR Ecosystèmes Méditerranéens et Risques. Info DFCI, *Bulletin du Centre de Documentation « Forêt Méditerranéenne et Incendie »* Novembre 2006 N° 57, 8 pp.