Télédétection, 2006, Vol. 5, n°4, p. 359-377
© 2006 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions Scientifiques GB*

MÉTHODE GLOBALE D'ÉVALUATION DU RISQUE D'INCENDIES DE FORÊT UTILISANT LA TÉLÉDÉTECTION ET LES SIG : CAS DU LIBAN

Ghaleb FAOUR[1]*, Rania Bou KHEIR[1] et Ali DARWISH[2]

[1] *Conseil National de la Recherche Scientifique,*
Centre de Télédétection, B.P. 11-8281, Beyrouth, Liban.
Téléphone : +961 4 409 845 / 6 ; télécopieur : +961 4 409 847.
Courriel : gfaour@cnrs.edu.lb ; raniabk@cnrs.edu.lb

[2] *Association "Ligne Verte", Bâtiment Yammout, 3ème étage,*
rue Spears, Beyrouth, Liban.
Téléphone : +961 1 746 215.
Courriel : greenline@greenline.org.lb

(Soumis le 19 août 2005 ; révisé le 8 novembre 2005; accepté le 3 décembre 2005)

Les incendies de forêt et d'espaces naturels constituent le désastre naturel le plus dangereux à la vie humaine et le plus sérieux économiquement dans plusieurs pays méditerranéens, entre autres, le Liban. Cette étude a été conduite dans le contexte de définir une stratégie de combat contre les incendies dans ce pays. Afin de parvenir à cet objectif national, on a procédé à la création d'un modèle permettant de cartographier sous un système d'information géographique (SIG) le risque potentiel d'incendies à moyen terme. Ce modèle intègre deux indices : les indices de « probabilité d'occurrence » et de « vulnérabilité aux incendies ». Le premier indice estime la probabilité d'occurrence des incendies en se référant aux feux passés qui se sont produits durant 20 ans. Le deuxième vise à estimer la susceptibilité du milieu naturel à la propagation des incendies. Cette susceptibilité résulte de la combinaison de plusieurs facteurs ayant trait à la densité de la végétation, aux types de combustible, au gradient et à l'exposition des pentes et à l'évapotranspiration. Les poids relatifs de ces facteurs ont été calculés en se référant à la carte des zones brûlées qui a été extraite de l'interprétation visuelle des images satellitaires à moyenne (TM et ETM+ de Landsat) et très haute résolutions (IKONOS et SPOT-5). La carte des feux passés montre une prédominance d'occurrence très faible (48 % de la superficie totale du Liban). La carte de vulnérabilité aux incendies indique une quasi-égalité des superficies occupées par les classes très faible, faible et moyenne, soit 75 % du Liban. Une bonne partie du pays (33,5 %) est affectée par des risques potentiels d'incendies moyen, fort et très fort qui sont principalement localisés sur les pentes sud de la chaîne du Mont-Liban. La validation sur le terrain de ce modèle indique une précision totale égale à 79 %, ce qui permet de l'extrapoler à d'autres pays méditerranéens.

Mots-clefs : incendie ; SIG ; région méditerranéenne ; images satellitaires ; modélisation.

CONTRIBUTION OF REMOTE SENSING AND GIS TO THE MAPPING OF FOREST FIRE RISKS : CASE STUDY OF LEBANON

Forest fires constitute the most serious economic and life-threatening natural disaster in many Mediterranean countries, among these, Lebanon. This study was conducted in the context of defining a strategy for combating forest fires in the country. In order to reach this national objective, we proceeded to the creation of a model allowing the mapping under a geographic information system (GIS) of the potential risk of fires in the mid term. The model integrates two indices : a « probability of occurrence » index and a « vulnerability to fire » index. The first index estimates the probability of occurrence of fires by referring to past fires having occurred over 20 years. The second aims to estimate the susceptibility of the natural environment to the propagation of fires. This susceptibility results from the combination of several factors related to the density of vegetation, fuel types, slope gradient and exposure and evapotranspiration. The relative weights of these factors were calculated by referring to the map of burnt areas, was extracted from the visual interpretation of satellite imagery at medium (Landsat TM and ETM+) and very high resolutions (IKONOS and SPOT-5). The map of past fires shows a predominance of very low occurrence (48 % of the total area of Lebanon). The map of vulnerability to fire indicates a quasi-equality of areas occupied by very low, low and medium classes, occupying about 75 % of Lebanon. A good part of the country (33.5 %) is affected by medium, high and very high potential risk of fires principally located on the south slopes of Mont-Lebanon. Field validation of this model indicates a total precision equal to 79 %, allowing its extrapolation to other Mediterranean countries.

Keywords : fire ; GIS ; Mediterranean region ; satellite imagery ; modelling.

1. INTRODUCTION

Tous les ans, les incendies de forêt ravagent plusieurs centaines de milliers d'hectares dans la région méditerranéenne (Pausas et Vallejo, 1999 ; Varela *et al.*, 2003). Plus de la moitié des feux présentent une ou plusieurs sautes de particules incandescentes donnant naissance à des foyers secondaires. Le Liban est l'un des pays méditerranéens présentant de bonnes potentialités forestières associées à une forte sensibilité au feu qui a provoqué régulièrement des dégâts très importants (Bou Kheir *et al.*, 2001a ; Masri, 2005).

Les incendies mettent en danger la vie des habitants et peuvent engendrer des perturbations économiques et sociales importantes : endommagement des poteaux électriques et téléphoniques, des clôtures et des panneaux et coupure des réseaux de communication. Les conséquences sur le milieu naturel sont beaucoup plus graves puisqu'elles aboutissent à des pertes forestières immédiates, auxquelles il faut évidemment ajouter la perte de la valeur future, en général bien plus importante et très difficile à évaluer, compte tenu de la longueur des périodes en jeu. En effet, plus de 35 % de la couverture forestière initiale au Liban a été détruite durant les dernières quarante années aboutissant à une réduction de cette couverture variant de 12 % (1973) à moins de 7 % du territoire libanais de nos jours (METAP, 1995 ; Talhouk *et al.*, 2001). Les pertes annuelles sont équivalentes à 6 750 $ par hectare dans les forêts de chênes et peuvent atteindre 17 000 à 20 000 $ dans les forêts de pins (*Pinus pinea* et *Pinus brutia*) (Masri, 2005). Il peut arriver également que les incendies menacent directement certaines espèces rares ou bien des stades d'évolution de la végétation très peu représentés, surtout que la forêt libanaise se caractérise par une grande biodiversité qui permet de dénombrer 2 500 espèces environ, comprenant des ressources génétiques de grande valeur (92 plantes endémiques) et qui constituent de ce fait, une part importante de la flore méditerranéenne et, plus spécialement, de l'est méditerranéen (Zohary, 1973 ; Barghachoun, 1976 ; Quezel et Bonin, 1980 ; Abou Chaar, 1982 ; Khouzami *et al.*, 1996). De même, les zones brûlées peuvent être sujettes à des précipitations intenses, ce qui peut accroître le problème de l'érosion hydrique (Bou Kheir *et al.*, 2001b).

Il en résulte de très lourdes charges pour la société toute entière, pour l'État et les collectivités locales en particulier. La mise en place des moyens de lutte contre les incendies exige l'implantation d'une politique forestière nationale permettant la gestion et la protection du patrimoine forestier. À cet effet, plusieurs modèles ou indices décrivant l'intensité du risque d'incendies, qui peut être défini comme « *le risque d'un départ d'un incendie déterminé par la présence et l'activité de n'importe quel agent causatif* » (Chuvieco et Congalton, 1988), ont été réalisés ailleurs jusqu'à maintenant dans plusieurs pays (Jakubauskas *et al.*, 1990 : Illera *et al.*, 1996 ; Chuvieco *et al.*, 1999 ; Bovia et Camia, 2000 ; San-Miguel-Ayanz *et al.*, 2002 ; Sebastian *et al.*, 2002). Parmi ceux-ci, on cite les modèles BEHAVE (Andrews, 1986 ; Andrews *et al.*, 2003), FARSITE (Finney, 1998), FPI (Burgan *et al.*, 1998), FlamMap (Finney *et al.*, 2003), EFFIS et EFFDAS (EC, 2005). Mais la complexité et la diversité des données relatives à l'environnement exigent une adaptation de ces modèles (ou indices) aux conditions spécifiques de chaque pays et en s'appuyant sur sa propre base de données. En effet, ces indices diffèrent non seulement en ce qui concerne les variables d'entrée utilisées, mais aussi en se référant à l'échelle considérée et à la mise à jour des produits dérivés. Ils peuvent être classifiés en indices statiques définis à long terme et dynamiques (à court terme). Les indices statiques, contrairement aux indices dynamiques, peuvent être calculés avant la période critique d'incendies et peuvent fournir des informations utiles permettant l'amélioration de l'alerte préventive pour combattre les incendies. De plus, les variables intégrées dans les modèles statiques ne changent pas continuellement dans le temps. Les indices statiques résultent de la combinaison de plusieurs facteurs ayant trait d'abord à l'énergie potentielle obtenue à partir des couvertures de sols, de la pente et du régime de la pluie ; ensuite au niveau de la protection prenant en compte la rareté, la fragilité et l'intérêt environnemental et enfin, la proximité des habitations qui met la vie humaine et les propriétés en danger. Tous ces facteurs sont étroitement reliés au processus d'incendies (Kaufman *et al.*, 1998 ; San-Miguel-Ayanz *et al.*, 2002 ; Mitri et Gitas, 2004). Les indices dynamiques visent à déterminer l'état de la végétation, ce qui peut être accompli directement à travers l'analyse des indices de végétation calculés en se référant aux données satellitaires, ou indirectement, en utilisant des variables météorologiques. Ces indices peuvent être reliés au contenu hydrique des combustibles morts ou indiquer la variation journalière du contenu hydrique des combustibles, l'état initial de la propagation des incendies, la quantité des combustibles et l'intensité attendue de la flamme (ICONA, 1992). Dans cette étude, on propose un

modèle intégrant plusieurs facteurs qui sont tenus en compte par les indices statiques et dynamiques. Le modèle consiste donc à estimer le risque potentiel d'incendies au Liban à moyen terme.

Les systèmes d'information géographique (SIG) et la télédétection sont devenus des outils incontournables pour la compréhension et la cartographie des phénomènes dynamiques tels que les incendies et une nécessité pour l'orientation d'investissement et pour disposer d'arguments valables pour la prise de décisions. Dans ce cadre-là, plusieurs études ont été conduites au cours des deux dernières décennies montrant le bénéfice potentiel de la télédétection dans la détection des incendies (Martín *et al.*, 1994 ; Siljeström et Moreno, 1995 ; Caetano *et al.*, 1996 ; Pereira *et al.*, 1997 ; Kaufman *et al.*, 1998 ; Mitri et Gitas, 2004).

La présente étude s'inscrit dans cette perspective en proposant un modèle permettant de découper le Liban en différentes intensités de risque d'incendies à partir de l'intégration d'images satellitaires et des données SIG. La carte produite à l'échelle de 1/200 000 sera validée au moyen de mesures sur le terrain.

2. LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE DU SITE D'ÉTUDE

Situé sur les côtes est de la Méditerranée, le Liban est divisé en six départements ou mouhafazates (Beyrouth, Mont-Liban, Béqaa, Nord, Sud et Nabatieh). Ces mouhafazates sont elles-mêmes subdivisées en 26 casas. Ces casas regroupent 1 580 circonscriptions foncières. Malgré sa superficie limitée (10 452 km^2), sa structure géomorphologique est très diversifiée. On distingue quatre unités géomorphologiques principales en allant de l'ouest vers l'est comme suit : la zone littorale (< 100 m altitude), un bloc montagneux plissé et surélevé « le Mont-Liban » (entre 100 m et plus que 3 000 m), une dépression structurale intermédiaire (la plaine de la Béqaa) et la chaîne montagneuse de l'Anti-Liban (moins élevée que le Mont-Liban) (figure 1). La chaîne du Mont-Liban est la partie la plus diversifiée du pays.

La végétation naturelle occupe la plus grande partie du pays avec 33 % des terrains dédiés aux prairies et 23 % aux zones boisées. Ces dernières comprennent des forêts à base de conifères denses et dispersés (pins, cèdres, cyprès, sapins et genévriers) (3,31 %), des arbres feuillus (chênes et autres types) (5,58 %) et des forêts mixtes (2,25 %) ainsi que des brousses de types variés (11,86 %). Les terres agricoles sont moins dispersées que la végétation naturelle, couvrant 32 % de la superficie totale du pays.

Les précipitations annuelles moyennes varient entre 700 mm sur la plaine côtière et 1 400 mm sur les crêtes du Mont-Liban. La presque totalité des chutes de pluie et de neige se concentre entre novembre et mars (75-80 %). La période de sécheresse relativement longue, qui dure à peu près 4 à 5 mois, constitue un stress hydrique pour la végétation. De même, les températures annuelles moyennes décroissent régulièrement avec l'altitude : 20 à 21 ºC sur la côte ; 15 ºC à 900 m d'altitude ; 12 ºC à 1 800 m et 5 ºC à 2 700 m. Les températures les plus hautes sont enregistrées en août, dépassant 35 ºC le jour dans la vallée de la Béqaa.

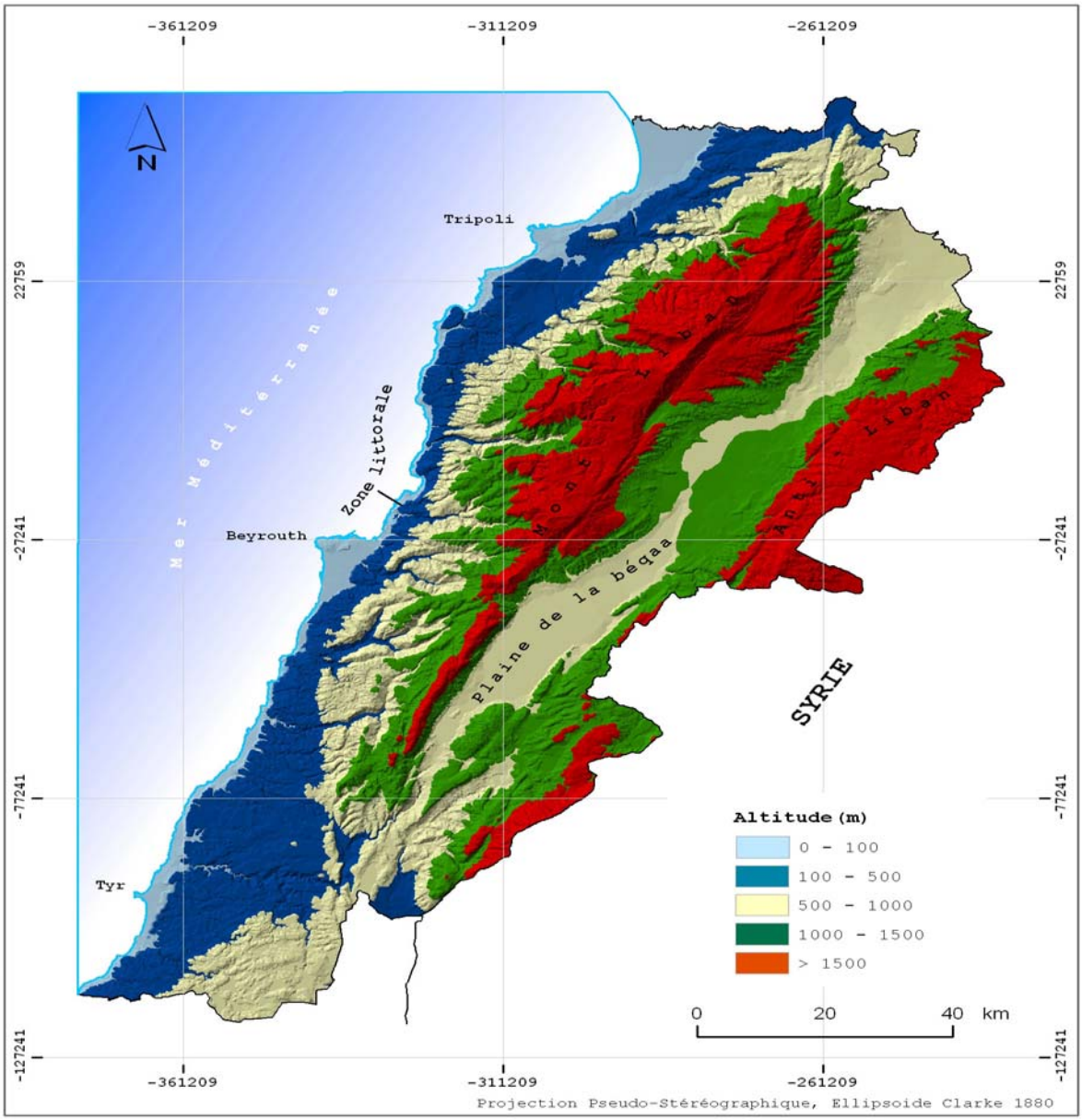


FIGURE 1 : Carte géomorphologique du Liban. *Geomorphological map of Lebanon*.

3. PRÉSENTATION DU MODÈLE

Dans cette étude, on propose un modèle qui résulte de la combinaison de la probabilité d'occurrence des feux passés et de la vulnérabilité des facteurs du milieu naturel au déclenchement et à la propagation des incendies. Les facteurs considérés ont été calibrés au moyen de la carte des zones brûlées extraite à partir de l'interprétation visuelle des images satellitaires et basé sur les données historiques collectées de sources différentes (figure 2).

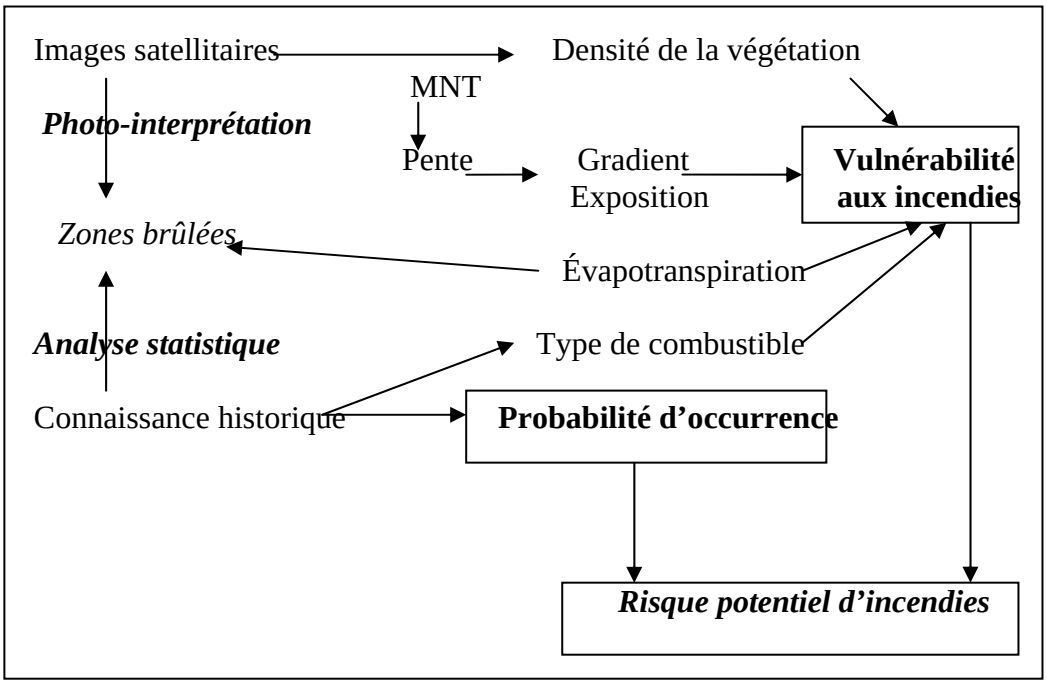


FIGURE 2. Organigramme montrant toutes les étapes de l'étude. *Flow chart showing all the steps of the study.*

3.1. Collecte des informations sur les incendies

La collecte des données concernant le nombre, le moment exact et la localisation des incendies de forêt et d'espaces naturels par année au Liban et les combustibles affectés était une question difficile à résoudre. En effet, les données étaient dispersées entre plusieurs institutions comme les ministères de l'Environnement, de l'Agriculture et de la Défense civile et les stations de protection contre les incendies. Elles n'étaient pas classifiées d'une manière homogène et organisée et ne fournissaient pas les mêmes informations pour un incendie donné. On s'est référé également aux journaux disponibles décrivant les incendies très graves.

L'analyse statistique des données recueillies sur les incendies sur une période de 20 ans (1983-2003) nous a permis de construire certaines relations pertinentes dans le choix des facteurs intégrés dans la propagation des incendies au Liban (Faour *et al.*, 2005). On a trouvé que le nombre de feux avec un accroissement de la température (> 28 °C) conjointe à un vent fort (> 25 km/h) augmente. Tous les incendies se produisent entre juin et octobre, avec une fréquence maximale pour les mois d'août et de septembre (25 à 27 % des incendies). Les forêts de cyprès sont les plus affectées pendant plus longtemps (5 jours). Le moment de départ pendant la journée se produit entre midi et 6 heures du soir.

3.2. Identification des zones brûlées

Cette solide base de données était aussi extrêmement utile dans la détermination des localités touchées par les incendies depuis 20 ans. En effet, une carte des zones brûlées a été produite par photo-interprétation à partir d'une série d'images satellitaires multispectrales.

3.2.1. Choix des images satellitaires

Le choix des images satellitaires s'est basé sur plusieurs critères : la disponibilité, la date d'acquisition (année et saison), le recouvrement des régions les plus affectées et la dépendance sur des satellites avec des résolutions spatiales fines (tableau 1). Ainsi, le Liban entier est couvert par deux scènes TM (30 m) et ETM^+ de Landsat (15 m) acquises en octobre 1986 et 2000, respectivement.

TABLEAU 1 : Images satellitaires utilisées pour la détection des incendies. *Satellite images used for fire detection.*

Satellite et capteur	Date	Résolution spatiale (m)
TM de Landsat	Octobre 1986	30
ETM+ de Landsat	Octobre 2000	15
HRV de SPOT-5	Octobre 2003	5
IKONOS	Octobre 2003	1

De même, une image HRV de SPOT-5 (5 m) a été acquise pour la région du Mont-Liban (la plus affectée par les incendies) et cinq images IKONOS (1 m) pour certaines zones fréquemment l'objet d'incendies depuis 20 ans (Ramlieh, Dmit, Qornayel, Ras El-Matn et Mtein) et faisant partie du Mont-Liban (figure 3) (Faour *et al.*, 2005). Les images SPOT-5 et IKONOS ont été saisies en octobre 2003. La date d'acquisition choisie (octobre) permet de détecter la diminution éventuelle de la biomasse végétale à la fin de la saison des incendies. Durant cette période, les zones incendiées sont plus faciles à détecter à cause de l'absence des zones herbacées suite à la longue sécheresse qui s'étend de juin jusqu'au mois d'octobre.

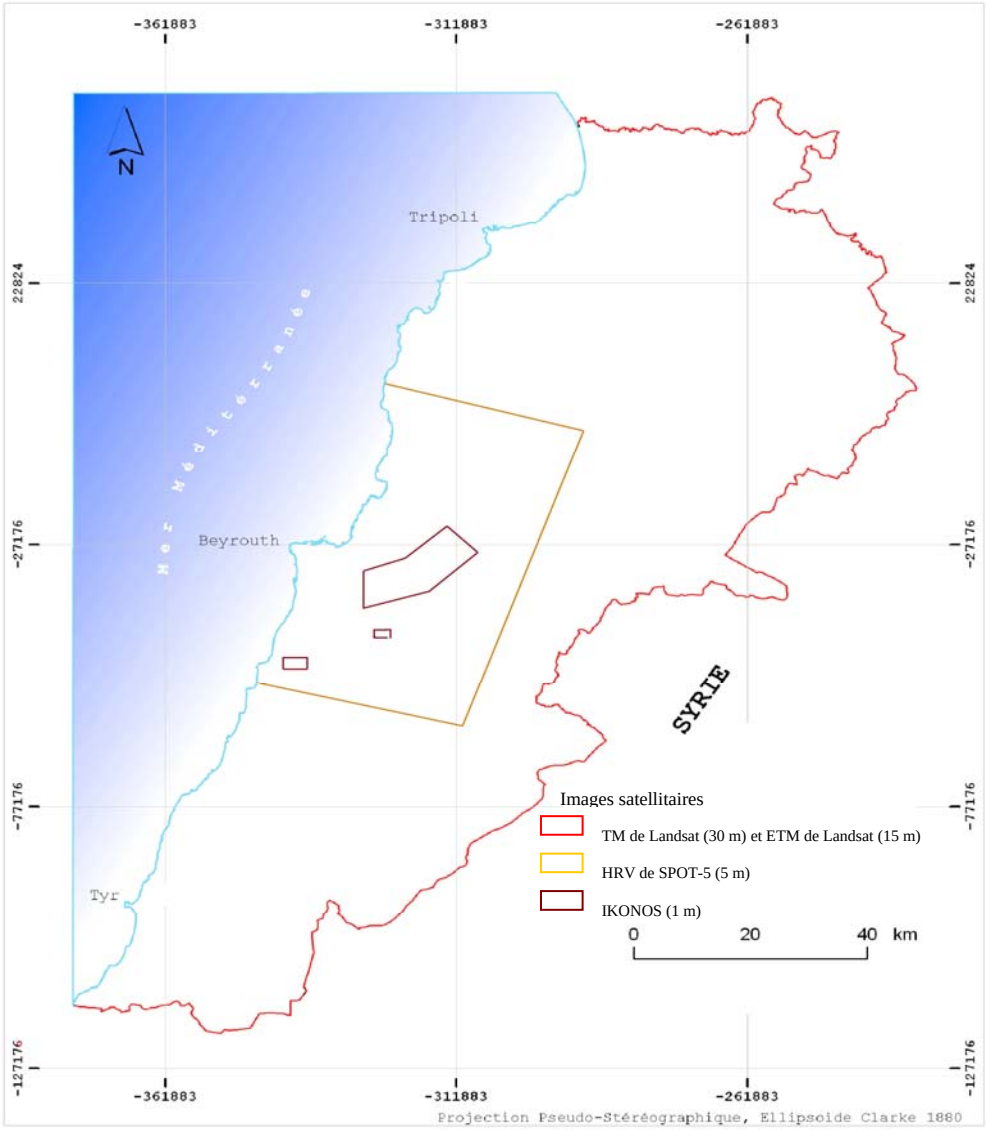


FIGURE 3 : Couverture des différentes images utilisées. *Coverage of the different satellite images used.*

3.2.2. Traitement des images satellitaires

Le traitement a été réalisé en utilisant le logiciel ERDAS Imagine (2001). Les images ont été ortho-rectifiées en utilisant un modèle numérique de terrain (MNT) avec une résolution de 50 m. Ce MNT a été produit par interpolation (krigeage) des courbes de niveau équidistantes de 50 m. La correction géométrique a été suivie par un recalage géométrique en identifiant des points de contrôle (GPS) sur ces images et sur les cartes topographiques de façon à obtenir une concordance optimale avec le système de projection choisi (pseudo-stéréographique). La méthode de recalage utilisée est basée sur le calcul d'une matrice de transformation de type polynomial d'ordre 1. La correction géométrique a été faite avec une erreur quadratique moyenne de l'ordre de 4 m pour les images IKONOS et de 30 m pour les images SPOT et Landsat.

Un mosaïquage a été appliqué ensuite aux deux scènes de l'image TM, d'une part, et à celles de l'image ETM$^+$, d'autre part. Une amélioration a été réalisée en bornant la dynamique du canal aux comptes numériques ayant un effectif supérieur à 1 pour 10 000 pixels de l'image (Girard et Girard, 1999). De même, un accroissement de la résolution spatiale a été réalisé en fusionnant chacune des images ETM$^+$, SPOT-5 et IKONOS avec la bande panchromatique de chaque satellite. Cette fusion permet aussi d'améliorer la clarté et la détection par la suite des incendies de forêt.

La photo-interprétation visuelle des images résultantes assistée par la base de données collectées sur les incendies de forêt durant 20 ans a permis de détecter certaines plages incendiées. Ces plages ont été tracées manuellement sur l'écran. Plusieurs confusions spectrales ont été rapportées dans plusieurs études utilisant les images TM de Landsat entre les zones brûlées et les zones non couvertes, spécifiquement les cours d'eau, les régions urbaines et les sols nus, d'une part (Tanaka *et al.*, 1983 ; Huete *et al.*, 1985 ; Pereira et Setzer, 1993 ; Siljestrom et Moreno, 1995 ; Caetano *et al.*, 1996), et les zones obscures, d'autre part (Caetano *et al.*, 1994 ; Pereira *et al.*, 1997). Pour cela, on s'est servi en plus des données historiques des cartes d'occupation du sol existantes afin de minimiser ces confusions. La première (échelle 1/50 000) a été dressée par la FAO (1990) à partir des images satellitaires HRV de SPOT (20 m) acquises en octobre 1987, et la deuxième (échelle 1/20 000) est issue de l'interprétation visuelle des images panchromatiques à très haute résolution du satellite indien IRS (5,8 m) acquises en 1998 (CNRS-MA, 2002). La carte des plages incendiées obtenue a été croisée ensuite sous un SIG avec certains des facteurs influençant la propagation des incendies, ce qui permet de calculer leurs poids relatifs.

3.3. Probabilité d'occurrence des feux passés

Le cumul des feux passés recensés sur une période de 20 ans par circonscription foncière (CF) et divisé par le nombre total d'incendies enregistrés au Liban a permis de produire la carte de probabilité d'occurrence des feux passés. Cette carte permet de détecter les zones fortement affectées par les incendies et celles qui ne présentent aucun risque de propagation des incendies. Elle a été intégrée dans le modèle afin d'avoir une évaluation meilleure de l'occurrence des incendies futurs.

3.4. Vulnérabilité aux incendies

Plusieurs facteurs peuvent affecter la conduite des incendies de forêt. Cinq ont été considérés dans cette étude : densité de la végétation, types de combustible, gradient et exposition des pentes et évapotranspiration.

3.4.1. Densité de la végétation

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 TM de Landsat (30 m) acquises en octobre 2 000. Une augmentation du NDVI est supposée être en relation avec une augmentation du danger de feu. Cet indice varie entre 0 (absence de végétation) et 1 (densité maximale). Ainsi, sur l'image NDVI résultante, cinq classes de couverture végétale, équidistantes de 0,2, soit 0-0,2 (sensibilité très faible aux incendies), 0,2-0,4 (sensibilité faible), 0,4-0,6 (moyenne), 0,6-0,8 (forte) et 0,8-1 (très forte) ont été choisies.

3.4.2. Combustibilité

La végétation est caractérisée par sa combustibilité en libérant des quantités de chaleur plus ou moins importantes. La combustibilité est corrélée à la quantité de biomasse combustible et à sa composition. Elle permet d'évaluer la part du risque liée à la puissance atteinte par le feu. Elle a été calculée en classifiant les modes d'occupation du sol couvrant le Liban en fonction de leur sensibilité au feu. Ces modes ont été extraits à partir de la carte d'occupation/utilisation du sol à l'échelle de 1/20 000 (CNRS-MA, 2002). Les contours des plages de la plupart de ces modes ont été mis à jour et corrigés en se référant aux images panchromatiques à très haute résolution

SPOT-5 (5 m) et IKONOS (1 m). La classification des modes d'occupation du sol en fonction de leur sensibilité au feu a été établie en comptant le nombre de feux par combustible durant 20 ans (1983-2003). Ce nombre a été converti en pourcentages ou poids (tableau 2).

TABLEAU 2: Poids relatifs des modes d'occupation du sol en fonction de leur sensibilité aux feux durant 20 ans. *Relative weights of land cover modes in relation to their sensitivity to fires during 20 years.*

Occupation/utilisation du sol			Poids
Végétation naturelle	Conifères	Pins	0,08
		Cèdres	0,07
		Sapins	0,06
		Cyprès	0,14
		Genévriers	0,01
	Feuillus	Chênes	0,06
		Autres types	0,01
	Forêts mixtes		0,12
	Végétation arbustive		0,05
	Végétation herbacée		0,03
Terres agricoles	Cultures de plein champ		0,04
	Vergers	Arbres fruitiers	0,06
		Citrus	0,06
		Bananiers	0,05
		Oliviers	0,08
		Vignobles	0,06
	Cultures sous serres		0,02
Terres nues, cours d'eau, zones urbaines			0

En effet, les feux sont nuls dans les zones urbaines, sur les cours d'eau et les terres nues. Les terres agricoles sont aussi vulnérables aux incendies que la végétation naturelle. Parmi les vergers, les oliviers sont plus touchés par le feu que d'autres plantations (arbres fruitiers, bananiers, citrus et vignobles). Certaines formations végétales comme les cyprès et les forêts mixtes sont plus vulnérables que les autres zones forestières (pins, chênes, sapins et cèdres). Cette situation s'explique assez facilement par la différence de composition de ces formations et par les différentes strates de hauteur. De même, la continuité entre les strates verticales conditionne le type de feu et par conséquent sa vitesse, sa puissance et son intensité. Les coupures dans la continuité horizontale de la végétation peuvent ralentir le feu et permettre aux moyens de lutte de se positionner pour préparer une attaque du front de feu.

3.4.3. Gradient de pente

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. La pente a été extraite à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) avec une résolution de 50 m. Cinq classes de pente ont été retenues en fonction de leur fréquence d'apparition et de leur distribution spatiale. Ces classes sont les suivantes : < 11 % ; 11-30 % ; 30-50 % ; 50-75 % et > 75 %. Le croisement de la carte des pentes avec la carte des zones brûlées a permis de calculer le pourcentage de feux dans chaque classe de pentes. Ainsi, les poids suivants correspondent aux classes de pente retenues : 0,215 (pente < 11 %), 0,37 (11-30 %), 0,24 (30-50 %), 0,145 (50-75 %) et 0,03 (> 75 %).

3.4.4. Exposition de pente

L'exposition joue également un rôle indirect sur la progression d'un feu. La végétation est différente sur les versants chauds et frais. Un feu se propage plus facilement sur un versant exposé au vent que sur un versant sous le vent. En général, les versants sud et sud-ouest présentent les conditions les plus favorables pour une inflammation rapide et pour la propagation des feux. L'exposition a été également extraite à partir du MNT (50 m) et quatre classes ont été distinguées : N-E (0-90 °), E-O (90-180 °), S-O (180-270 °) et O-N (270-360°). Nous avons ensuite suivi la même méthodologie adoptée dans la distinction des classes de sensibilité aux feux en fonction du gradient de pente. Ainsi, nous avons d'abord croisé la carte des zones brûlées avec la carte d'exposition des pentes et ensuite calculé le pourcentage des feux dans chaque classe d'exposition : N-E (0,06), E-S (0,34), S-O (0,45) et O-N (0,15).

3.4.5. Évapotranspiration

La prédisposition des formations végétales aux incendies est, en effet, très liée à leur teneur en eau. Puisqu'il est difficile et coûteux d'estimer directement le contenu hydrique des végétaux dans la région d'étude, on a procédé en trouvant une variable substituant ce contenu. Les conditions climatiques et, plus spécifiquement, l'évapotranspiration auxquelles les végétaux sont soumises donnent une indication précieuse de leur contenu en eau. L'évapotranspiration étant en étroite relation avec la température, si celle-ci

s'accroît, le contenu hydrique des végétaux s'abaisse. Cinq classes d'évapotranspiration équidistantes de 200 mm/an ont été distinguées, en divisant la carte disponible d'évapotranspiration à l'échelle de 1/200 000 (ACL, 1966), et variant entre 785 mm/an et 1 836 mm/an. Le nombre de feux a été calculé et pondéré par la suite dans chaque classe à la suite d'un croisement avec la carte des zones brûlées (tableau 3).

TABLEAU 3 : Classes de sensibilité des végétaux aux feux en fonction de l'évapotranspiration. *Classes of vegetation sensitivity to fires with reference to evapotranspiration.*

Évapotranspiration (mm/an)	Poids	Sensibilité au feu
785-1000	0,05	Très faible
1000-1200	0,11	Faible
1200-1400	0,22	Moyenne
1400-1600	0,29	Forte
1600-1836	0,33	Très forte

3.5. Le modèle utilisé

La méthode suivie afin d'élaborer le risque potentiel d'incendies repose sur la combinaison de la carte de probabilité d'occurrence des feux passés et de la carte de vulnérabilité aux incendies. Celle-ci résulte de la combinaison des cartes des facteurs favorisant le déclenchement ou la propagation des feux. Pour ce faire, et étant donné que les cartes factorielles établies sont d'échelles différentes, celles-ci ont été converties en mode matriciel (raster) avec un pixel de la taille 50 m. Cette taille est compatible avec l'échelle nationale standard de 1/200 000 choisie (Girard et Girard, 1999). La valeur finale de chaque pixel dans la carte résultante de vulnérabilité a été calculée en additionnant les poids des facteurs correspondants. Les valeurs normalisées obtenues (variant entre 1 et 2) indiquent la vulnérabilité très forte aux incendies de forêt. Ensuite, la carte du risque potentiel a été obtenue en attribuant à chaque pixel un degré de risque. Ce degré résulte de l'addition des valeurs de vulnérabilité et de probabilité d'occurrence.

4. RÉSULTATS

Les images satellitaires ont permis de détecter la distribution des zones brûlées. Celles-ci étaient utiles pour calibrer le gradient et l'exposition des pentes ainsi que l'évapotranspiration. La combustibilité a été définie en se basant sur les feux passés. L'intégration des feux passés dans un SIG a permis de produire la carte de probabilité d'occurrence et la combinaison des facteurs naturels a abouti à la construction de la carte de vulnérabilité aux incendies.

4.1. Carte des zones brûlées

La carte des zones brûlées regroupe 136 plages avec une superficie variant de 0,004 à 2,4 km^2 (figure 4). Vu la superficie très petite qui caractérise les incendies au Liban, la plupart de celles-ci (~ 65 %) ont été extraites à partir de l'image SPOT-5. Sur cette image, les incendies apparaissent en gris clair et foncé (figure 5). Les autres plages ont été définies en se référant aux images Landsat, mais en s'appuyant souvent sur les cartes d'occupation du sol déjà existantes. Nous avons testé plusieurs combinaisons, mais celle qui semble la plus fiable dans la détection des incendies est la combinaison RVB 432 fusionnée à la bande panchromatique du capteur ETM+ de Landsat. L'utilisation de la bande infrarouge et l'accroissement de la résolution spatiale ont montré un certain succès dans l'observation des incendies. Les autres combinaisons montrent des confusions entre les incendies et les sols nus ou les zones urbaines. Dans la combinaison 432, les sols nus varient entre le vert clair et foncé selon le contenu hydrique, tandis que les forêts apparaissent en rouge foncé (figure 5). Les incendies ont été différenciés grâce au contraste spectral faible entre ceux-ci et les autres zones nues. Mais il s'avère nécessaire de noter que tous les incendies qui avaient une superficie inférieure à 0,3 km^2 ne sont pas visibles sur les images Landsat. L'image SPOT-5 montre une plus grande précision que les images Landsat, mais elle ne couvre que seulement 18 % du Liban. Néanmoins, sur l'image SPOT-5, la plus petite plage qui peut être observée à l'aide de cet instrument est égale à 0,05 km^2. Malheureusement, certains incendies sont plus petits que cette superficie, ce qui empêche ainsi leur délimitation sur les images Landsat et SPOT. Ces derniers ont été extraits par la suite des cartes existantes d'occupation du sol ou des données collectées historiquement.

Les images IKONOS ont été acquises pour 1 % du pays à cause de leur coût très élevé. Elles ont été utilisées pour un examen direct des incendies dans les zones sélectionnées.

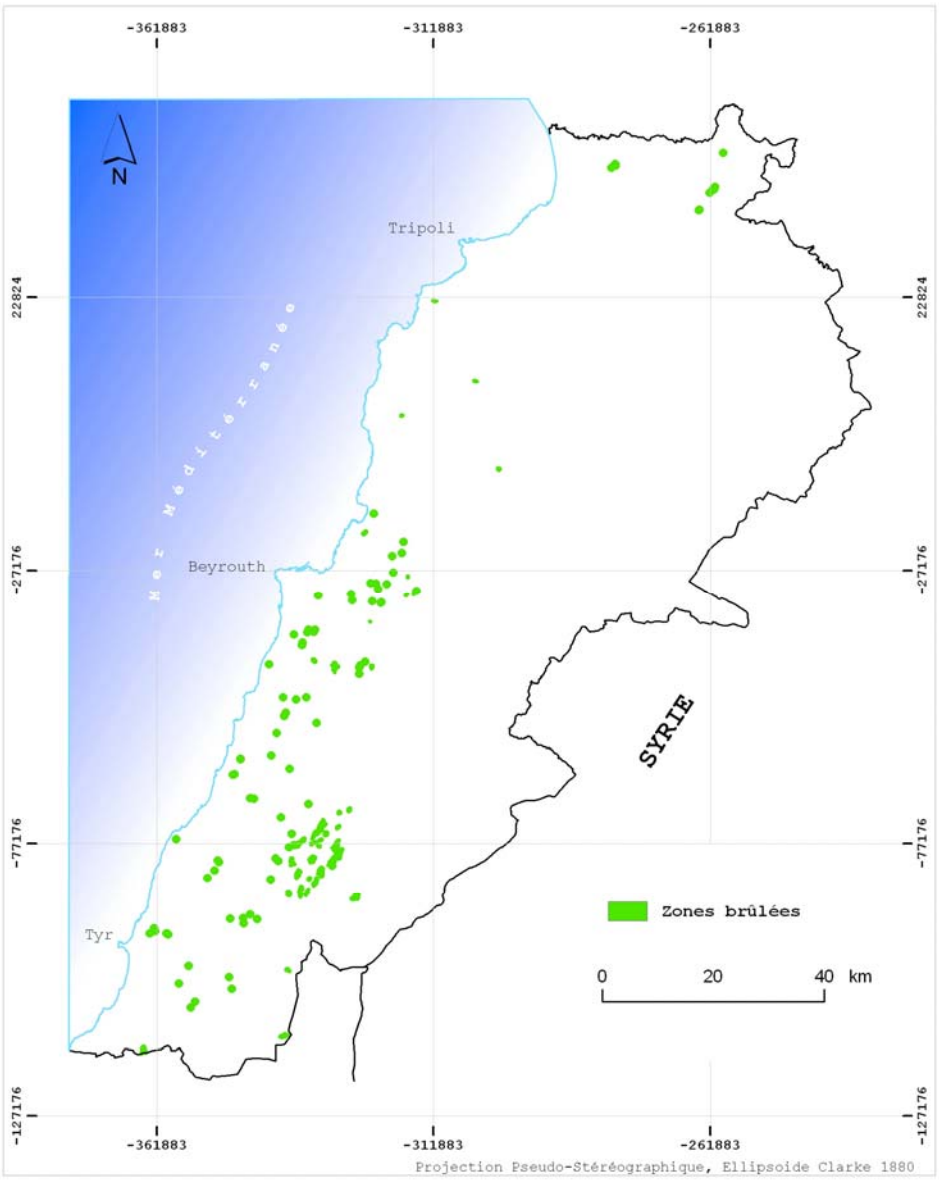


FIGURE 4 : Carte des zones brûlées détectées à partir des images satellitaires. *Map of burnt areas detected from satellite imagery.*

Région de Ramlieh – Mont-Liban
INCENDIE DE FORÊT, surface brûlée 144 000 m²



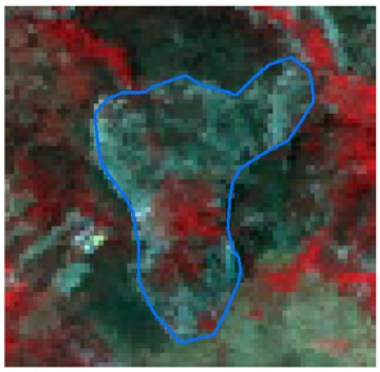
AVANT



APRÈS



SPOT-5 (5 m)



ETM+ DE LANDSAT (15 m)



IKONOS (1m)

FIGURE 5 :. Comparaison entre différents types d'images satellitaires pour la détection d'incendies de forêt.
Comparison between different types of satellite imagery for the detection of forest fires.

4.2. Carte de probabilité d'occurrence

La carte de probabilité d'occurrence des incendies (figure 6) montre une prédominance d'occurrence très faible – un poids de 0,0006 (48 % de la superficie totale du pays). Les autres classes sont distribuées comme suit : absence d'incendies – poids de 0 (28 %), faible occurrence – 0,0019 (12 %), moyenne – 0,0039 (8 %), forte – 0,0069 (3 %) et très forte – 0,0123 (1 %). Cette dernière classe a été observée à l'extrême nord du pays dans le village de « Qbaiyat Akkar », qui a été affecté par le nombre maximal d'incendies (95) durant 20 ans. Ce village se trouve un peu délaissé par les responsables, ce qui permet aux habitants d'agir en contravention en allumant des feux dans les zones de forêt et les espaces naturels pour pouvoir construire des bâtiments, faute de lois interdisant les constructions dans ces zones.

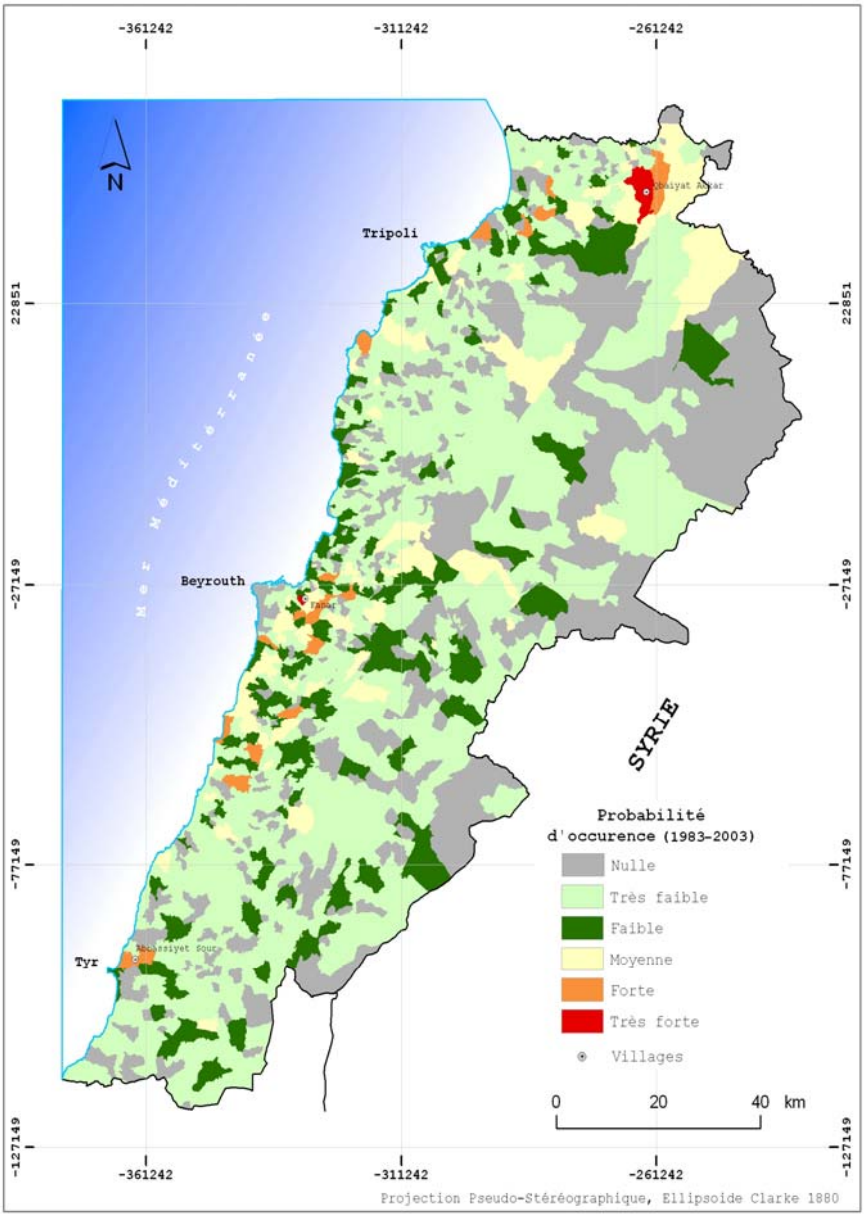


FIGURE 6 : Carte de probabilité d'occurrence des incendies. *Map of occurrence probability of fires.*

4.3. Analyse des cartes factorielles

La carte de la couverture végétale produite (figure 7a) indique que la plus grande partie du Liban (95 %) est caractérisée par une très faible densité de couverture végétale avec des valeurs d'indice de végétation très faibles.

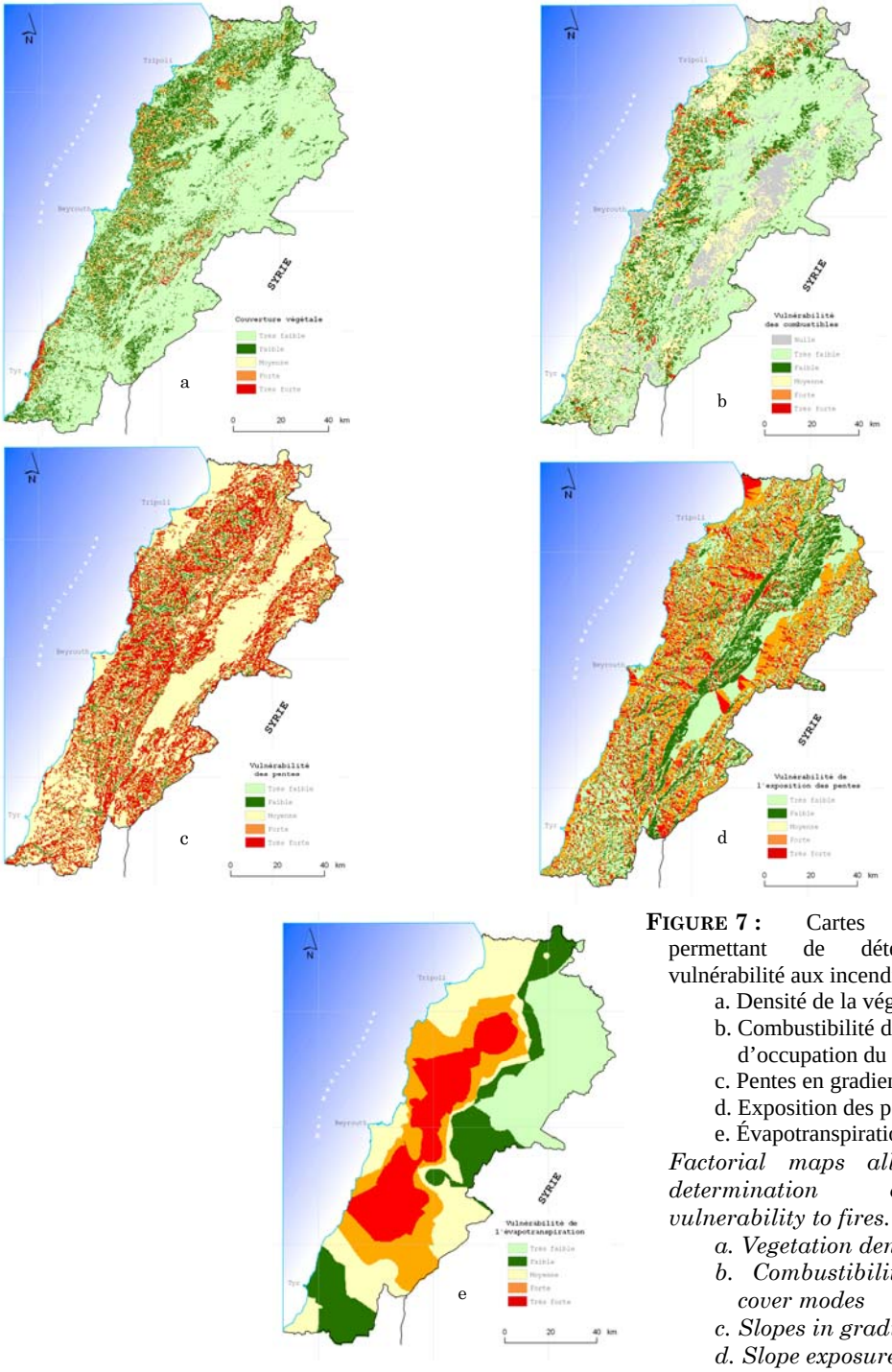


FIGURE 7 : Cartes factorielles permettant de déterminer la vulnérabilité aux incendies.
a. Densité de la végétation
b. Combustibilité des modes d'occupation du sol
c. Pentes en gradient
d. Exposition des pentes
e. Évapotranspiration

Factorial maps allowing the determination of the vulnerability to fires.
a. Vegetation density
b. Combustibility of land cover modes
c. Slopes in gradient
d. Slope exposure
e. Evapotranspiration

La carte des types de combustible (figure 7b) montre six classes choisies en regroupant les poids correspondant aux différents modes d'occupation/utilisation du sol. Celles-ci ont été regroupées suivant la méthode des seuils naturels. Ainsi et selon la combustibilité, 43 % du pays présente une très faible vulnérabilité aux feux, suivie par une vulnérabilité moyenne (15 %). Seulement 3 % du Liban est affecté par une sensibilité forte à très forte.

Si l'on prend en considération le gradient des pentes (figure 7c), cinq classes de sensibilité aux feux ont été choisies en considérant les bornes minimales et maximales des poids relatifs calculés selon les feux passés et en utilisant la méthode des seuils naturels. La carte obtenue indique qu'une forte (59 %) à très forte (33 %) sensibilité caractérise la majorité du pays.

De même, en suivant la même méthodologie, la carte d'exposition des pentes (figure 7d) indique que les classes très faible et forte occupent des superficies quasi-similaires (35 % chacune), ainsi que les classes faible et très forte (14 % chacune).

19 % du pays est caractérisé par une sensibilité très faible en fonction de l'évapotranspiration (figure 7e), 15 % (sensibilité faible), 30 % (moyenne), 21 % (forte) et 15 % (très forte).

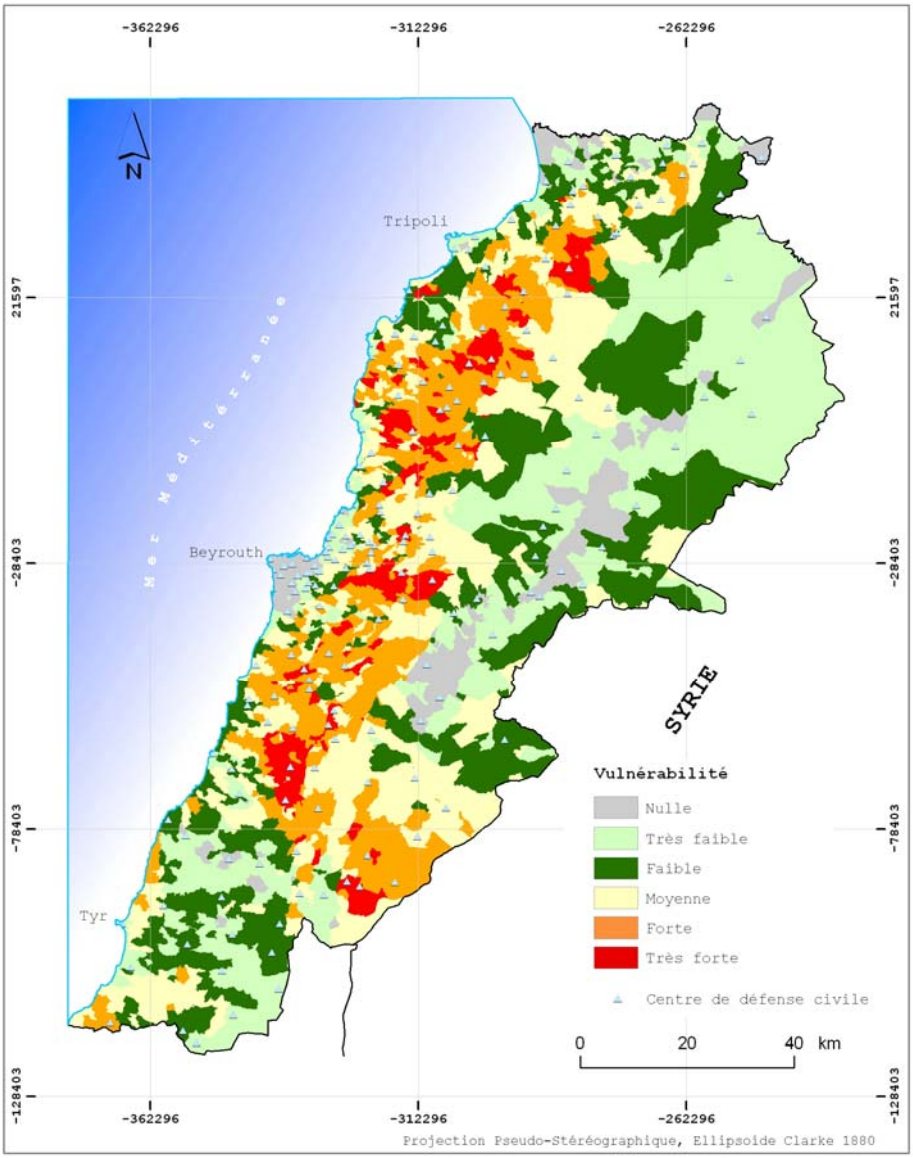


FIGURE 8 : Carte de la vulnérabilité aux incendies. *Map of vulnerability to fires.*

4.4. Carte de vulnérabilité aux incendies

La combinaison des facteurs décrits précédemment (paragraphe 4.3) a permis de produire une carte dérivée, c'est-à-dire la « carte de vulnérabilité aux incendies » (figure 8). Six classes ont été distinguées. Les classes très faible, faible et moyenne occupent des superficies quasi-similaires, soit 75 % du Liban et se trouvent localisées principalement au sud du Liban et dans l'Anti-Liban. Les classes forte et très forte apparaissent au Mont-Liban et au nord desservis par un plus grand nombre de centres de la Défense civile chargée d'éteindre les incendies, mais où les forêts sont plus denses et les pentes plus raides.

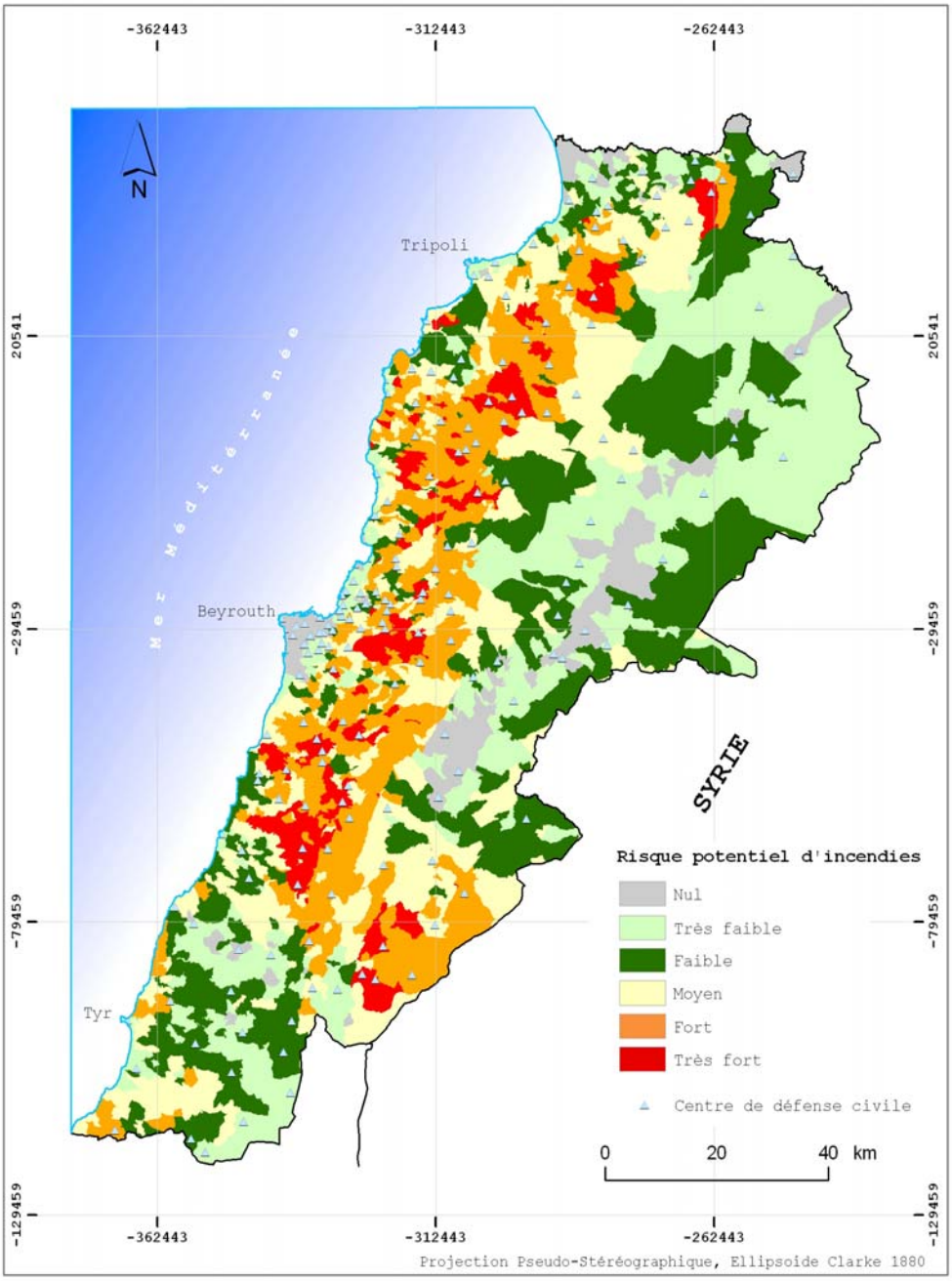


FIGURE 9 : Carte du risque potentiel d'incendies. *Map of potential fire risk.*

4.5. Carte du risque potentiel d'incendies

La combinaison des facteurs décrits précédemment a permis la production d'une autre carte dérivée, la « carte du risque potentiel d'incendies » (figure 9). Une bonne partie du Liban est affectée par un risque moyen (28 %), qui peut s'aggraver si une gestion non appropriée des ressources n'est pas mise en place. Les classes de risques fort et très fort occupent une superficie de 575 km^2, ce qui représente 5,5 % de la superficie totale du pays. Elles sont principalement localisées sur les pentes sud de la chaîne du Mont-Liban, couverte de forêts de conifères et de feuillus. Elles sont aussi observées au nord dans le village de « Qbayait Akkar ». Les bandes côtières (principalement Beyrouth), les terrains rocheux spécifiquement dans l'Anti-Liban et les terrains non couverts de la vallée de la Béqaa ne montrent aucun risque d'incendie. Les prairies fortement réparties dans le sud du pays ainsi que les régions horticoles et les champs agricoles ouverts des principales régions productives (plaines Béqaa et Akkar) appartiennent à la classe de risque faible (31 %).

Si l'on prend la distribution administrative du pays, on peut conclure que le mouhafazate de Beyrouth n'est pas affecté par les feux, étant donné l'absence de zones vertes. Le nord est principalement classé comme ayant un risque moyen à fort, le sud appartient au risque faible, les mouhafazates de Nabatieh et de la Béqaa sont considérés comme peu sensibles aux feux tandis que le Mont-Liban est fortement affecté par les incendies.

5. VALIDATION

La validation de la carte des risques d'incendies obtenue est faite à partir de 200 sites observés sur le terrain, définis par un échantillonnage stratifié. Sur le terrain, le repérage des sites s'est effectué à l'aide de cartes topographiques et d'un système de positionnement par satellite (GPS) avec une précision de l'ordre de 10 m. La validation s'est portée sur l'estimation visuelle du rayon des feux, à chaque fois qu'un incendie apparaît. Cinq classes de risque d'incendies ont été distinguées en fonction des rayons : très faible (< 100 m^2), faible (100-1 000 m^2), moyenne (1 000-10 000 m^2), forte (10 000-30 000 m^2) et très forte (> 30 000 m^2). La comparaison entre la carte des risques obtenue et les observations de terrain indique une précision totale de 79 % (tableau 4). Celle-ci est obtenue en divisant le nombre d'individus bien classés (69) situés sur la diagonale du tableau divisé par le nombre total d'individus (87). La valeur obtenue indique que la carte produite reflète bien la réalité car un classement est jugé statistiquement tout à fait bon lorsque les accords correspondent à 80 % des superficies (Lillesand et Kiefer, 1994) ou 75 % (Girard et Girard, 1999).

TABLEAU 4 : Matrice de confusion des sites observés sur la carte des risques d'incendies. *Error matrix of observed sites on the fire risk map.*

TERRAIN	CLASSIFICATION					TOTAL	Précision utilisateur (%)	Précision utilisateur (%)
	Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très forte			
Très faible	7	2	0	0	0	9	**78**	**22**
Faible	0	16	3	1	0	20	**80**	**20**
Moyenne	0	0	18	3	2	23	**78**	**22**
Forte	0	0	0	13	4	17	**76**	**24**
Très forte	0	0	0	3	15	18	**83**	**17**
TOTAL	7	18	21	20	21	**87**	**Précision totale 79 %**	
Précision utilisateur (%)	**100**	**89**	**86**	**65**	**71**			
Erreur d'excédent (%)	**0**	**11**	**14**	**36**	**29**			

Les confusions correspondent à des points affectés à une classe, tandis qu'elles appartiennent sur le terrain à une autre : 21 % des unités au total sont modifiées spatialement. On distingue les erreurs de déficit, calculées selon les lignes de la matrice et représentant la répartition d'une unité de référence (terrain) parmi les diverses unités de risques (classification), des erreurs d'excédents, calculées selon les colonnes et correspondant à la répartition des superficies d'une unité issue du modèle dans les diverses unités de référence (terrain). Les précisions pour le réalisateur et l'utilisateur sont relativement fortes, avec des erreurs de déficit variant entre 17 et 24 % et des erreurs d'excédent oscillant entre 11 et 29 %.

6. DISCUSSION

Le modèle proposé ne constitue qu'une première approche et plusieurs questions se posent à l'issue de ce travail.

1) Comment a-t-on défini le nombre de classes des cartes factorielles ?

Les classes du facteur « densité de la couverture végétale » ont été choisies suivant la méthode par classes d'étendue (ou amplitude) égales. Cette méthode est facile à réaliser et a l'intérêt d'être très vite repérée. Elle convient bien à la distribution de l'indice de végétation normalisé dans notre cas car elle reflète la réalité, étant donné la faible couverture végétale dans les crêtes du Mont-Liban et l'Anti-Liban ainsi que dans la ville de Beyrouth. Mais cette méthode ne peut pas être utilisée pour des distributions dissymétriques. En revanche, les classes des autres facteurs considérés ont été mesurées en suivant la méthode dite des « seuils naturels » ou des discontinuités. Contrairement à ce qu'évoque l'expression par laquelle on la désigne, cette méthode n'est pas la plus « naturelle » ni celle qui est recommandée dans tous les cas. En effet, elle se réfère à une logique bien précise, qui considère que les intervalles non occupés entre les valeurs de la série représentent des subdivisions significatives du continuum des valeurs quantitatives : de part et d'autre d'un tel seuil, les observations n'ont pas les mêmes propriétés qualitatives, elles appartiennent à des classes d'objets différents. Dans la pratique et dans la plupart des cas, il est rare de devoir discrétiser des distributions où cette référence théorique à des discontinuités significatives est pertinente. Cependant, cette méthode montre son utilité dans notre cas surtout que la distribution observée est plurimodale.

2) Comment pourra-t-on estimer la robustesse du modèle ?

Le modèle établi s'avère très intéressant étant basé sur des pondérations calculées suivant des valeurs quantitatives réelles et non pas sur des jugements d'experts. Cependant, on pourra changer les méthodes de discrétisation utilisées et étudier par la suite la robustesse du modèle. De même, il faudrait produire une carte des risques basée sur les surfaces incendiées qui constitueraient évidemment un indicateur plus pertinent que le nombre d'incendies, hélas impossible à obtenir pour l'instant au Liban. De plus, le nombre de feux enregistrés au cours de 20 ans (1983-2003) n'est pas très fidèle car, durant la guerre (1975-1990), une grande partie des incendies n'ont pas été recensés. Cela pourra constituer un trou dans la méthodologie, qu'on n'a pas pu traiter, si l'on veut considérer l'occurrence des incendies durant une période plus longue.
De même, le modèle établi pourrait être facilement appliqué à d'autres régions de la zone méditerranéenne étant donné la similitude des paysages environnementaux et la ressemblance du climat entre le Liban et les pays de cette zone. La cartographie au 1/200 000 s'avère pertinente à l'échelle nationale et elle a été utilisée dans le schéma d'aménagement du territoire libanais (SDATL, 2004). Cette carte est nécessaire afin de répartir les centres de la Défense civile et l'équipement de lutte contre les incendies ainsi que pour la planification des zones de reforestation. De plus, si on considère les facteurs de vulnérabilité sans tenir en compte des archives historiques des événements passés, la carte des risques représentera les zones potentielles à être brûlées naturellement. Donc, l'intégration de la carte de probabilité d'occurrence des feux passés permet d'ajouter l'effet humain.

3) Comment pourra-t-on améliorer le modèle ?

Il serait peut-être nécessaire d'intégrer d'autres facteurs dans le modèle qui peuvent jouer un rôle majeur dans la propagation du feu et qui peuvent agir à plusieurs niveaux. Il faudrait de même différencier entre les facteurs de déclenchement, de propagation et d'ignition. Parmi ces facteurs, on mentionne le vent, la hauteur des arbres, la densité de la végétation, la forme et la longueur des pentes, les facteurs socio-économiques, la proximité aux centres de la Défense civile chargés d'éteindre les incendies, etc
A titre d'exemple, le vent agit en renouvelant l'oxygène de l'air, en réduisant l'angle entre les flammes et le sol et en favorisant le transport de particules incandescentes en avant du front de flammes. La vitesse de propagation d'un incendie est étroitement corrélée à la vitesse du vent. Celle-ci conditionne donc l'ampleur de l'incendie. La direction du vent joue également un rôle important ; elle

conditionne la forme finale du feu par rapport au point d'éclosion. De même, les activités humaines peuvent être à l'origine de nombreux cas d'éclosion et de propagation de feux : loisirs, production, certaines infrastructures de transport. L'évolution de l'occupation du sol a une influence notamment sur le risque d'incendies de forêt en raison du développement de l'interface forêt/habitat et de l'absence de zone tampon que constituent les espaces cultivés. Cette situation est liée, d'une part, à l'abandon des espaces ruraux qui a pour conséquence la constitution de massifs entiers sans coupures pour les incendies et, d'autre part, à l'extension des villes et villages jusqu'aux abords des zones boisées. C'est dans ce cadre-là que la télédétection prend toute son importance. En effet, les données de télédétection présentent une image à un instant donné d'une vaste étendue. Les divers facteurs d'incendie n'y sont pas identifiables individuellement, mais l'occupation du sol exprime d'une manière synthétique la réaction du milieu à un incendie. Il faut donc lire à travers l'image et, grâce à la vision verticale, les divers milieux peuvent être exprimés en terme de risque d'incendie. C'est ce qui a été tenté en retenant les 6 classes proposées. Il semble que l'étude diachronique d'images satellitaires a pu améliorer sensiblement cette approche. La télédétection peut contribuer à l'estimation des dégâts et par la suite, elle peut être utilisée pour dresser une carte de la nouvelle situation et pour mettre à jour la base de données.

Le MNT (50 m) utilisé suffira pour traiter de vastes étendues. Mais si l'on veut créer des modèles à court terme et à des échelles plus détaillées, il faudra affiner la résolution du MNT choisie. De même, il faudrait mettre à jour la carte d'évapotranspiration utilisée, surtout avec les changements climatiques globaux qui annoncent plus d'aridité.

Les départs de feux au Liban sont étroitement liés à l'urbanisation et à la présence de certains équipements tels que les routes et les dépôts d'ordures, qui augmentent significativement le danger de mise à feu (Faour *et al.*, 2005). Ainsi, pour cartographier le risque d'incendies, il faut connaître les zones privilégiées de concentration de la population.

6. CONCLUSION

La carte du risque potentiel d'incendies produite constitue un outil important permettant de définir les mesures de prévention, de protection et de sauvegarde nécessaires. Cependant, cette carte ne sera utile que si les mesures de prévention des incendies de forêt sont beaucoup plus efficaces que la suppression ou la conservation contre leurs impacts négatifs. L'évaluation du risque potentiel est particulièrement critique au Liban dans :

(1) les zones naturelles de grande valeur à cause de leur intérêt environnemental,
(2) les zones sujettes à l'altération au plan du bilan hydrique,
(3) les zones susceptibles à l'érosion hydrique ainsi que
(4) les zones proches des zones d'urbanisation.

Mais cette carte ne peut pas être utilisée pour répondre à des questions quantitatives spécifiques comme, par exemple, le niveau de protection demandé pour faire face aux contraintes budgétaires et aux pertes des ressources naturelles. Pour cela, il sera intéressant de connecter directement le SIG avec les réseaux de surveillance complexes représentés par les stations météorologiques et de l'alimenter par des images satellitaires récentes, ce qui permettra une amélioration et une mise à jour de la carte du risque d'incendies établie. Ceci pourra être suivi par le développement d'un serveur Internet afin de disséminer et de délivrer l'information sur les incendies de forêt aux gestionnaires et aux communautés locales.

La carte des risques produite pourra être améliorée en prenant en compte surtout des dispositifs de surveillance et de lutte contre les incendies, mais en soi, elle constituera la clé de n'importe quel programme de formation ou projet environnemental permettant aux municipalités des régions fortement touchées par les incendies de prendre les mesures préventives nécessaires afin de préserver les forêts et de surveiller le déclenchement des incendies.

Références

Abou Chaar, C. (1982). Un aperçu médical sur sept plantes qui poussent au Liban (en arabe). Majallat Ach-Chajarat, vol. 1, n° 19, p. 1-10.

ACL (1966). Carte d'évapotranspiration du Liban à l'échelle de 1/200 000. Atlas Climatique du Liban, République Libanaise, Ministère des Travaux publics.

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. and Seli, R. (2003). BehavePlus fire modelling system. Version 2.0. Systems for Environmental Management, PO Box 8868, Missoula, MT 59807 (www.fire.org).

Barghachoun, A. (1976). Études écologiques phytogéographiques des forêts de chênes à feuilles caduques du Liban. Thèse 3ème cycle, Univ. Droit Econ. Sciences, Aix-Marseille, III, p. 1-72.

Bovia, G. and Camia, A. (2000). Computation of meteorological fire danger indices for Southern Europe. Contract N. 14526-1998-11 SF1P1 ISP IT, Final Report.

Bou Kheir, R., Shaban, A., Girard, M-C. et Khawlie, M. (2001a). Impact des activités humaines sur l'érosion hydrique des sols

dans la région côtière montagneuse du Liban. Sécheresse, vol. 12, n° 3, p. 157-165.

Bou Kheir, R., Girard, M-C., Shaban, A., Khawlie, M., Faour, G. et Darwich, T. (2001b). Apport de la télédétection pour la modélisation de l'érosion hydrique des sols dans la région côtière du Liban. Télédétection, vol. 2, n° 2, p. 91-102.

Burgan, R.E., Klaver, R.W., Klaver, J.M. (1998). Fuel models and fire potential from satellite and observations. International Journal of Wildland Fire, n° 8, p. 159-170.

Caetano, M.S., Mertes, A.K. and Pereira, M.C. (1994). Using spectral mixture analysis for fire severity mapping. In 2nd International Conference on Forest Fire Research, Coimbra, p. 667-677.

Caetano, M.S., Mertes, L., Cadete, L. and Pereira, J.M.C. (1996). Assessment of AVHRR data for characterising burned area and post-fire vegetation recovery. EARSeL Advances in Remote Sensing, vol. 4, n° 4, p. 124-134.

Chuvieco, E. and Congalton, R.G. (1988). Mapping and inventory of forest fires from digital processing of TM data. Geocarto International, vol. 4, p. 41-53.

Chuvieco, E., Salas, F.J., Carvacho, L. and Rodriguez-Silva, F. (1999). Integrated fire risk mapping. In E. Chuvieco (ed.), Remote Sensing of Large Wildfires. New York : Springer-Verlag.

CNRS-MA (2002). Carte d'occupation/utilisation du sol du Liban à l'échelle de 1/20 000. Conseil National de la Recherche Scientifique et Ministère de l'Agriculture (Liban).

EC (2005). European Forest Fire Research. European Commission.

Erdas (2001). User Guide. Erdas Inc. : Atlanta, Georgia (USA). http//www.erdas.com

FAO (1990). Carte d'occupation/utilisation du sol du Liban à l'échelle de 1/50 000. FAO.

Faour, G., Bou Kheir, R. et Verdeil, E. (2005). Caractérisation sous SIG des incendies de forêts dans la région méditerranéenne, cas d'étude Liban. Soumis à la revue « Forêts Méditerranéennes ».

Finney, M. (1998). FARSITE users guide and technical documentation. USDA Forest Service General Technical Report RMRS-RP-4, 88p.

Finney, M., Brittain, S. and Seli, R. (2003). FlamMap 2 Beta Version 3.0.1. Joint Fire Sciences Program, Rocky Mountain Res. Sta., US BLM, Systems for Environmental Management.

Girard, M.-C. et Girard, C.-M. (1999). Traitement des données de télédétection. Dunod, Paris, 529 p.

Huete, A.R., Jackson, R.D. and Post, D.F. (1985). Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. Remote Sensing of Environment, vol. 17, p. 37-53.

ICONA (1992). Los incendios forestales en Espana durante 1991. Instituto Nacional para la Conversacion de la Naturaleza, MAPA : Madrid.

Illera, P., Fernandez, A., Calle, A., Casanova, J.L., 1996. Temporal evolution of the NDVI as an indicator of forest fire danger. International Journal of Remote Sensing, vol. 17, n° 6, p. 1093-1105.

Jakubauskas, M.E., Lulla, K.P. and Mausel, P.W. (1990). Assessment of vegetation change in a fire-altered forest landscape. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 56, p. 371-377.

Kaufman, Y.J., Justice, C.O. and Setzer, A.W. (1998). Potential global fire monitoring from EOS-MODIS. Journal of Geophysical Research, 103, p. 3221-3225.

Khouzami, H., Bassil, M., Fortunat, L. and Hayek, A. (1996). Lebanon country study on biological diversity. List of species. Republic of Lebanon. Ministry of Agriculture and United Nations Development Programme, Lebanon.

Lillesand, T.-M. and Kiefer, R.-W. (1994). Remote sensing and image interpretation. 3e éd. John Wiley & Sons Inc. 750 p.

Martín, M.P., Viedma, O. and Chuvieco, E. (1994). High versus low resolution satellite images to estimate burned areas in large forest fires. Second International Conference on Forest Fire Research, Coimbra, Portugal, vol. 2, p. 653-663.

Masri, T. (2005). Forest fire impact assessment, Lebanon. Final report, EC Life Project 00TCY/RL/022 "Towards a sustainable mechanism for forest fire fighting in Lebanon". National Council for Scientific Research (Lebanon), 51 p.

METAP (1995). Lebanon: assessment of the status of the environment. Final report Med. Envi. Tech. Ass. Program, 90p.

Mitri, G.H. and Gitas, I.Z. (2004). A semi-automated object oriented model for burned area mapping in the Mediterranean region using Landsat-TM imagery. International Journal of Wildland Fire, 13, p. 367-376.

Pausas, J.G. and Vallejo, V.R. (1999). The role of fire in European Mediterranean ecosystems. In: Chuvieco Salinero (ed.), Remote sensing of large wildfires, Springer-Verlag, Berlin, p. 3-16.

Pereira, J.M.C. and Setzer, A.W. (1993). Spectral characteristics of fire scars in Landsat-5 TM images of Amazonia. International Journal of Remote Sensing, vol. 14, p. 2061-2078.

Pereira, M.C., Chuvieco, E., Beudoin, A. and Desbois, N. (1997). Remote sensing of burned areas: a review. In: Chuvieco, E. "A review of remote sensing methods for the study of large wildland fires". Departamento de Geografia, Universidad de Alcala, p. 127-184.

Quezel, P. et Bonin, G. (1980). Les forêts feuillues du pourtour méditerranéen, constitution, écologie, situation actuelle, perspectives. Rev. For. Française, vol. 3, n° 33, p. 253-268.

SDATL (2004). Schéma directeur d'aménagement du territoire libanais. Rapport final, DAR El Handassa (Liban) et IAURIF (France), 239 p.

Siljeström, P. and Moreno, A. (1995). Monitoring burnt area by principal component analysis of multitemporal data. International Journal of Remote Sensing, vol. 1, n° 9, p. 1577-1587.

San-Miguel-Ayanz, J., Annoni, A., and Schmuck, G. (2002). Towards a coherent forest fire information system in Europe: The European Forest Fire Information System (EFFIS). In Viegas X. (ed.). Forest Fire Research and Wildland Fire safety. Millpress, Rotterdam, ISBN 90-77017-72-0.

Sebastian, L., San-Miguel-Ayanz, J., and 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. International Journal of Remote Sensing, vol. 23, n°13, 2713-2719.

Talhouk, S.N., Zurayk, R. and Khuri, S. (2001). Conservation of the coniferous forests of Lebanon : past, present and future prospects. Oryx, vol. 35, n° 3, p. 206-215.

Tanaka, S., Kimura, H. and Suga, Y. (1983). Preparation of a 1.25 000 Landsat map for assessment of burnt area on Etajima Island. International Journal of Remote Sensing, vol. 4, p. 17-31.

Varela, J., Arias, J.E., Sordo, I. and Tarela, A. (2003). Multicriteria decision analysis for forest fire risk assessment in Galicia, Spain. 4th International Workshop on Remote Sensing and GIS applications to forest fire management: Innovative concepts and methods in fire danger estimation, 5-7/6/2003, Ghent University, Belgium.

Zohary, M. (1973). The geobotanical foundation of the Middle East. Vol. 1. Gustave Fisher Verlag, Amsterdam.