

Modélisation et cartographie du risque incendie de forêt dans la partie orientale des Aurès (Algérie)

par Souad RAHMANI et Hassen BENMESSAOUD

Chaque année en Algérie plusieurs centaines d'hectares sont détruits par les incendies de forêt. Les méthodes classiques, généralement utilisées pour la prévention et la lutte contre les incendies, ne sont pas toujours adaptées à la complexité et à la diversité des écosystèmes forestiers. Dans cette étude, la modélisation du risque lié aux feux de forêts a permis d'élaborer une carte de risque d'incendie du massif forestier des Beni Imloul situé dans l'Aurès oriental dans la partie nord-est de l'Algérie, et de fournir aux gestionnaires un outil d'aide dans leurs études d'aménagement, de prévention et de lutte contre les incendies de forêt.

Introduction

Dans la région des Aurès (partie nord-est de l'Algérie), les incendies causent des dégâts importants dans les milieux forestiers, chaque année plusieurs centaines d'hectares sont détruits. Selon la FAO (2007), la pression anthropique est le principal facteur de feux de forêt dans le bassin méditerranéen, au moins 95 % des incendies sont provoqués par l'homme. Les actions d'origine humaine les plus fréquentes provoquant des feux de forêts sont : l'extraction de produits forestiers non ligneux, le défrichement dû aux activités agricoles, les incendies criminels, la négligence, la chasse.

Les pertes économiques dues aux feux de forêts ne sont pas estimées seulement en termes de surfaces brûlées, mais également en termes de perte de production, de dégradation de l'environnement et d'impacts sociaux. Le déclenchement, la propagation et l'intensité des feux de forêts sont liés aux conditions climatiques et topo-morphologiques, au type de formation végétale et aux facteurs anthropiques (FALEH *et al*, 2012). Les feux de forêt méditerranéens touchent essentiellement les pinèdes et les chênaies (BRUNO, 2015). C'est le cas du massif des Beni Imloul dans la région des Aurès qui est une forêt où prédomine le pin d'Alep (*Pinus halepensis*) et le chêne vert (*Quercus ilex*).

Le climat méditerranéen de la zone d'étude est caractérisé par une période estivale sèche conjointe à l'inflammabilité extrême des végétations durant l'été. De plus le caractère accidenté du relief et les activités anthropiques font de ce site d'étude une zone à risque répétitif d'incendies de forêt.

Les méthodes classiques, généralement utilisées dans le secteur d'étude pour la prévention et la lutte contre les incendies, ne sont pas toujours adaptées à cause de la complexité et de la diversité des écosystèmes forestiers. Dans ce contexte, la modélisation du risque de feux de forêts permet d'une part d'orienter et d'optimiser, dans le court et le moyen terme, les moyens d'investissement, notamment les infrastructures, les équipements et les opérations d'aménagement anti-feu en milieu forestier (ASSALI *et al*, 2016), et d'autre part, d'aider les gestionnaires dans leurs actions de prévention, d'intervention et de planification territoriale pour l'identification des zones les plus vulnérables aux risques d'incendie.

Le présent travail, porte sur un modèle empirique intégrant des paramètres objectifs pouvant influencer sur la vulnérabilité et appliqués dans un espace discrétisé dont les unités systématiques sont géoréférencées en faisant appel aux outils de la géomatique en l'occurrence la télédétection et les systèmes d'informations géographiques (SIG).

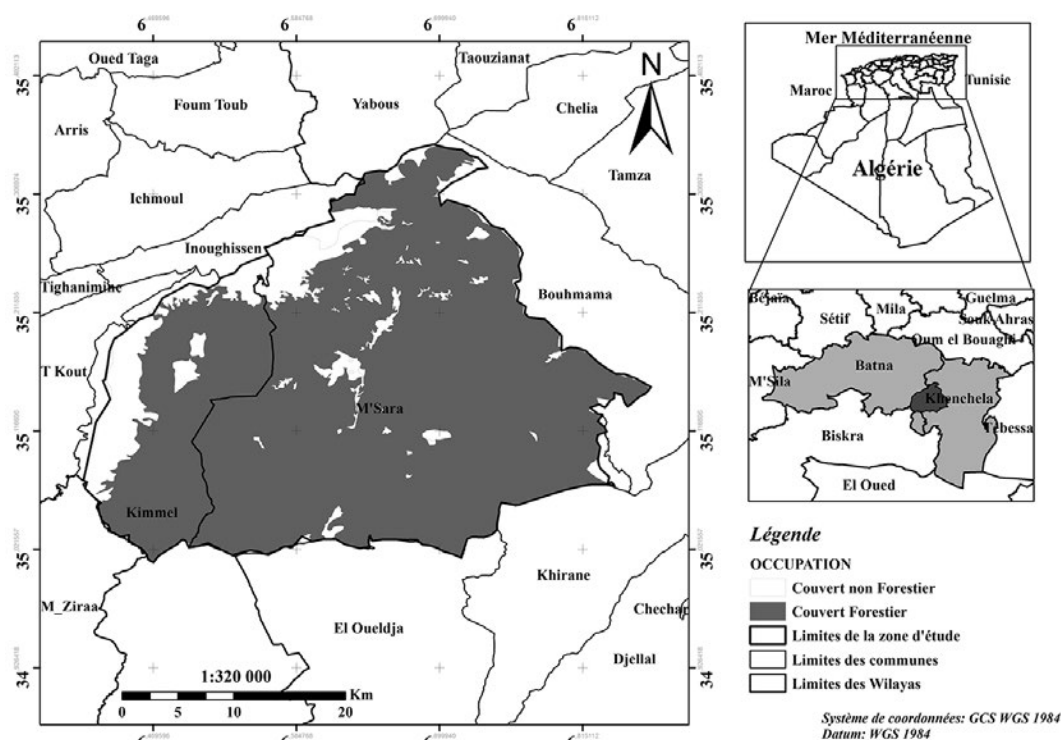
D'après plusieurs chercheurs (DAGORNE et DUCHÉ 1994 ; ERTEN E. *et al*, 2004 ; FALEH *et al*, 2012 ; ADAB H. *et al*, 2013 et ASSALI *et al*, 2016), la modélisation du risque de feux de forêts est basé sur plusieurs paramètres tels que les paramètres écologiques (l'inflammabilité et la combustibilité des formations

végétales), les paramètres stationnels (pente, exposition et topo-morphologie) et les facteurs anthropiques. Notre étude a pour but de cartographier les zones exposées au risque de feux de forêt du massif des Beni Imloul et de fournir aux gestionnaires un outil d'aide dans leurs études d'aménagement, de prévention et de lutte contre les incendies en forêts.

Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude couvre le massif des Beni Imloul, elle est située au niveau de l'Aurès oriental. Elle fait partie de l'Atlas saharien qui se situe géographiquement au nord-est de l'Algérie (Cf. Fig. 1), entre Arris et Khenchela, allant du Mont Chélia au Nord, jusqu'à l'oasis d'El Ouldja (Taghzout) sur les versants sud du massif des Aurès. Cette région d'étude occupe une superficie de 93 241 ha. Elle s'étend entre les parallèles 35° 00' et 35° 18' de latitude Nord et de 6° 22' et 6° 52' de longitude Est.

Ce site présente un écosystème forestier mixte de pins d'Alep (*Pinus halepensis*) et de chêne vert (*Quercus ilex*), il est constitué des plus beaux peuplements de pin d'Alep en



Algérie, ils sont situés entre 1000 et 1400 m d'altitude. La zone d'étude est connue pour sa sensibilité aux incendies qui restent très fréquents en période estivale. On trouve ces grands groupements végétaux dans la partie nord du massif, à partir de la série Bouhmama à une altitude de 1736 m, jusqu'à la première oasis saharienne de Kheirane à une altitude de 500 m (HELAL, 2010).

Le massif des Beni Imloul est constitué d'un ensemble de reliefs accidenté de direction générale sud et nord, dont l'altitude varie de 662 à 2300 m environ, avec une pente moyenne de 30%. Le terrain d'étude est caractérisé par un climat méditerranéen correspondant à l'étage bioclimatique de végétation variant du semi-aride jusqu'au subhumide, et les pluviosités saisonnières sont variées selon l'altitude et l'exposition.

Matériel et méthodes

L'approche méthodologique choisie pour évaluer le risque de feu de forêt dans le massif des Beni Imloul est basée sur l'application du modèle d'indice de risque (IR) qui est proposé par DAGORNE et DUCHÉ (1994) et testé sur les massifs forestiers de la région méditerranéenne, ce modèle intégrant trois sous-indices, on cite l'indice de combustibilité (IC), l'indice humain (IH) et l'indice topo morphologique (IM). Donc dans cette étude l'indice de risque repose sur la formule suivante (Eq. 01):

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

Cette méthodologie a été adoptée par de nombreux chercheurs en Algérie, parmi eux :

(MISSOUMI et TADJEROUNI, 2003) dans la forêt domaniale de Kounteidat province de Sidi Bel Abbès dans le Nord-Ouest Algérien, (BELHADJ-AISSA *et al*, 2003), dans la forêt de Bainem à Alger, (KHADER *et al*, 2009), dans la forêt de Nesmouth située au sud-est de Mascara et au Maroc par (FALEH *et al*, 2012) dans le massif forestier Khezana.

L'indice de combustibilité (IC)

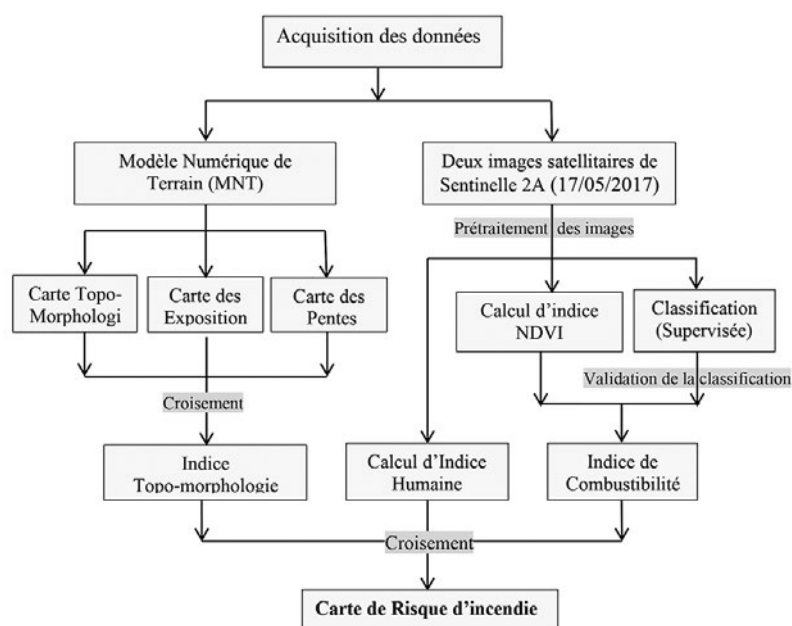
La combustibilité indique l'aptitude de la végétation à propager le feu en se consommant, lors de la combustion, en libérant des quantités de chaleur plus ou moins importantes, selon la structure et les essences végétales dominantes de la forêt (FALEH *et al*, 2012).

L'indice de combustibilité a été calculé donc à partir de la combinaison de la carte des espèces dominantes au niveau de la zone d'étude, et de la quantité de biomasse combustible (BV). Cette quantité de biomasse est estimée à partir de l'indice de végétation par différence normalisé (NDVI), il est construit à partir des canaux rouges (R), et proche infrarouge (PIR). Cette étape a été effectuée à partir de deux images satellitaires récentes prises le 17 juin 2017 issues du nouveau satellite Sentinel2, elles sont acquises en saison sèche, où l'on peut distinguer les différents types d'occupation du sol.

Ce type d'images satellitaires est caractérisé par sa bonne résolution (10 m), sa richesse spectrale (13 bandes spectrales), et sa prise d'image est sur une largeur au sol de 290 km. Le tableau I montre les caractéristiques des images utilisées pour calculer cet indice.

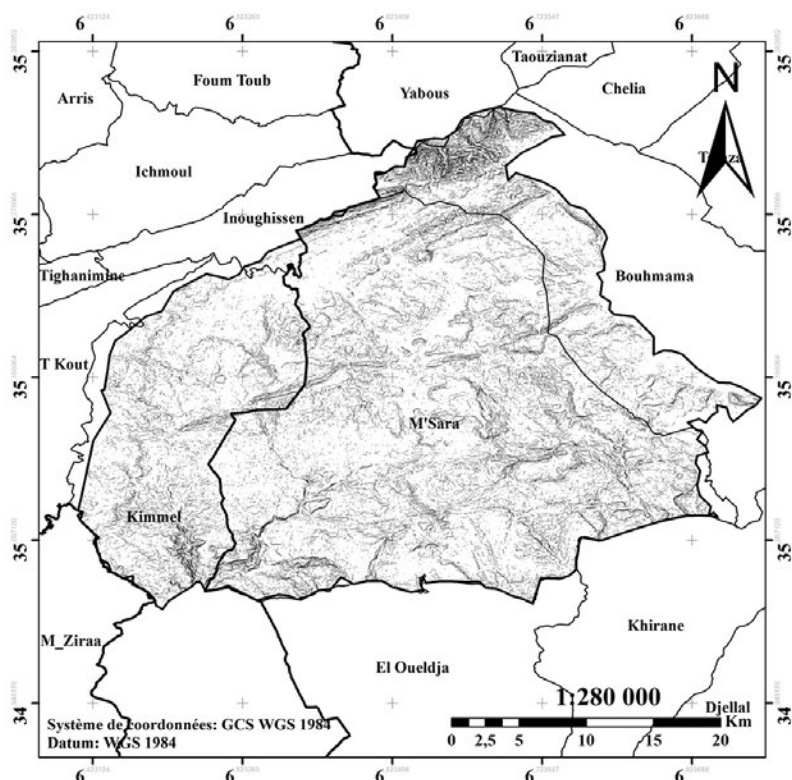
Path	Row	Date d'acquisition	Capteur	Bandes spectrales		
				Bande spectrale	Longueur d'onde	Résolution spatiale
193	35	17-05-2017	Sentinel 2A	2	496.6	10
				3	560.0	
				4	664.5	
				8	836.1	
				5	703.9	
				6	740.2	
193	36	17-05-2017		7	782.5	20
				8a	864.8	
				11	1613.7	
				12	2202.4	60
				1	443.9	
				9	945.0	
				10	1373.5	

Tab. I :
Caractéristiques des images satellitaires de Sentinel 2A utilisées.



Légende

- Limites de la zone d'étude
- Limites des communes
- Limites des Wilayas
- Pentes**
- Pente faible (<15%)
- Pente moyenne (15%<P<30%)
- Pente Forte (30%<P<45%)
- pente très forte (P>45%)



Classe des pentes	Signification	Surface en ha	Pourcentage (%)
P < 15%	Faible	68239	73
15 < P < 30%	Moyenne	23103	25
30 < P < 45%	Forte	1921	2
P > 45%	Très forte	51	0,1

L'indice de combustibilité, ou l'indice d'intensité potentielle du feu, a été exprimé par la relation ci-après (Eq.02) qui est proposée par MARIEL (1995).

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

Où :

BV: Biovolume de la formation végétale.

E1: Note de combustibilité pour les ligneux hauts les plus dominantes.

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

L'indice topo-morphologique (IM)

La topographie est aussi l'un des principaux facteurs qui affecte la propagation d'un incendie de forêt. La pente conditionne l'inclinaison des flammes par rapport au sol et ainsi leur vitesse de propagation (MERDAS, 2007). L'exposition a également un rôle indirect sur la progression du feu, car elle conditionne le type de végétation (BAARA, 2014), l'influence des vents et l'ensoleillement. Donc l'indice topo-morphologique est calculé par la combinaison de trois paramètres physiques : la pente, l'exposition et l'altitude. Ces trois paramètres sont produits à partir du modèle numérique de terrain (MNT) de la zone d'étude. Cet indice a été exprimé par la formule suivante (Eq.03) :

$$IM = 3p + (m. e)$$

avec p : la pente ; m : l'altitude et e : l'exposition

L'indice humain (IH)

Le facteur anthropique est l'un des principaux facteurs qui aggravent la propagation des incendies. L'indice humain, lié à l'occupation et à l'activité humaine, a été établi par le calcul de l'indice de différence normalisée bâtis NDBI définie par ZHA *et al* (2005). Le développement de l'indice NDBI a été basé sur la réponse spectrale unique des terres bâties qui ont une plus forte réflec-

De haut en bas :

Fig. 2 :

Diagramme fonctionnel simplifié de la méthodologie du travail.

Fig. 3 :

Carte des pentes de la zone d'étude.

Tab. II :

Classes des pentes de la zone d'étude.

tance dans la gamme de longueur d'onde MIR (rayonnement moyen infrarouge) que dans la gamme de longueur d'onde NIR (rayonnement proche infrarouge). Cet indice a été exprimé par l'équation suivante (Eq.04) :

$$NDBI = B6-B5/ B6+B5$$

Où : B6 : MIR (rayonnement moyen infrarouge)
et B5 : NIR (rayonnement proche infrarouge)

Les principales étapes méthodologiques réalisées dans cette étude et les types d'indices calculés et les différentes cartes produites ont été résumées sur l'organigramme fonctionnel simplifié dans la Figure 2.

Résultats et discussions

Le modèle adopté dans la méthodologie de travail a pour objectif de classer la zone d'étude en parcelle en fonction du degré de risque de feu. Il est basé sur la combinaison des différents paramètres du risque par l'application de l'équation du modèle utilisé, chaque paramètre a un coefficient de pondération selon son influence sur le risque de feu de forêt. Les différents résultats obtenus de l'analyse des indices liés au risque d'incendie sont cités dans ce qui suit.

Indice topomorphologique (IM)

Indice des pentes

L'analyse de la carte des pentes (Cf. Fig. 3) montre que la zone d'étude s'installe sur des pentes faibles à moyennes, comprises entre 15 et 30 %, traduit par des superficies de 68 239 ha et 23 103 ha respectivement, les pentes fortes et très fortes ont une faible représentation dans les parties nord et sud-ouest du secteur d'étude où elles dépassent les 45%. Ce qui a pour conséquence, un risque moyennement influencé par la pente.

Les classes des pentes divisées en quatre classes : faible, moyenne, forte et très forte sont représentées sur le tableau II.

Indice d'exposition des versants

La figure 4 montre les principales expositions des versants dans notre zone d'étude.

Pour la zone d'étude, cinq classes d'exposition ont été définies (Cf. Tab. III). Il s'agit de la classe présentant un risque fort qui

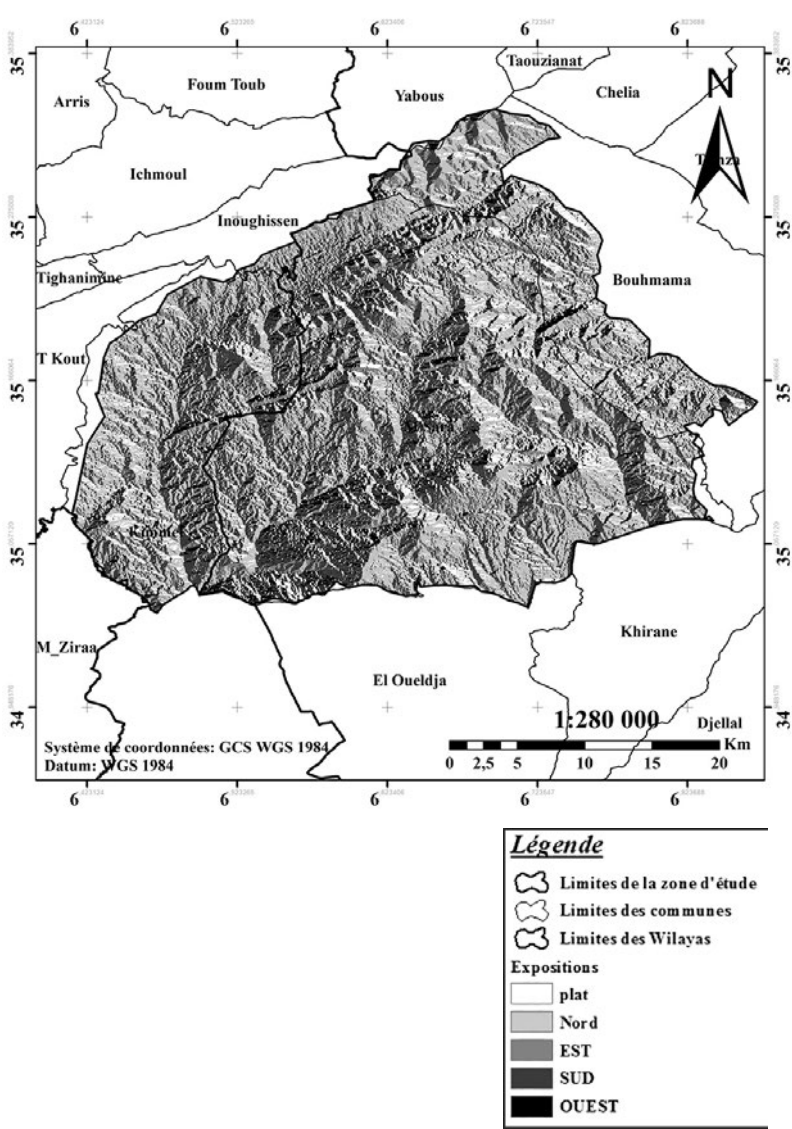


Fig. 4 (ci-dessus) :
Carte des expositions des versants de la zone d'étude.

Tab. III (ci-contre) :
Classes des expositions des versants dans la zone d'étude.

Exposition des versants	Surface en ha	Pourcentage (%)
Plat	25	0,03
Nord	30253	32
Est	12768	14
Sud	40279	43
Ouest	9990	11

regroupe les expositions sud, la plus dominante qui représente 43% de la surface totale de la région d'étude, le classe intermédiaire qui regroupe les expositions nord soit 32%, la classe suscitant un risque faible qui regroupe les expositions de direction est qui occupe 14%, les expositions de la direction ouest qui concerne 11% et les terrains plats qui n'occupent que 0,03% de la surface totale de la zone d'étude.

Indice de topo-morphologie

Les quatre classes obtenues définissent les situations topographiques de plus en plus défavorables pour la lutte (Cf. Fig. 5), la classe haut piémont occupe une superficie importante de 34% de l'espace d'étude, la classe bas piémont occupe la majorité de la surface de la zone d'étude, elle représente 61 % de surface de la zone d'étude, la classe montagne représente 3 % de notre zone

d'étude et la classe plaine ne représente que 2 % de la surface totale de la zone d'étude.

En effet on a pu mettre en évidence les classes de la topo-morphologie dans le tableau ci-dessous (Cf. Tab. IV) qui montre des classes de topographie qui coïncident avec les classes des pentes.

Indice topo-morphologique final (IM)

L'indice topo-morphologique final (Cf. Fig. 6, Tab. V) influence grandement la propagation des feux de forêt et leur puissance. La classification de cet indice a été adoptée par DAGORNE et DUCHÉ (1994).

La base des données de l'indice topo-morphologique montre que le pourcentage le plus élevé égale à 34%, soit 31 368 ha de la surface totale présentent des conditions moyennement favorables à l'accentuation du feu, ce surfaces sont caractérisées par une exposition des versants Nord et des pentes < 30%. Suivi par les conditions peu favorables avec un pourcentage de 30% soit 27 098 ha qui représentent les zones périphériques caractérisées par des terrains plats. La classe favorable présente un pourcentage de 28% équivalent de 27 382 ha de terrain de la zone d'étude, caractérisés par des expositions de versant Sud et des pentes très fortes (<45%). Cependant, les terrains très favorables aux incendies se caractérisent par leur rareté avec un pourcentage de 8% soit 7 462 ha qui sont répartis sur le versant Ouest avec des pentes > 45%. Les résultats de calcul numérique de cet indice sont présentés dans le Tableau V.

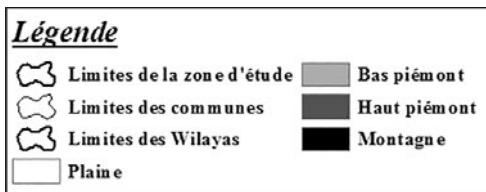
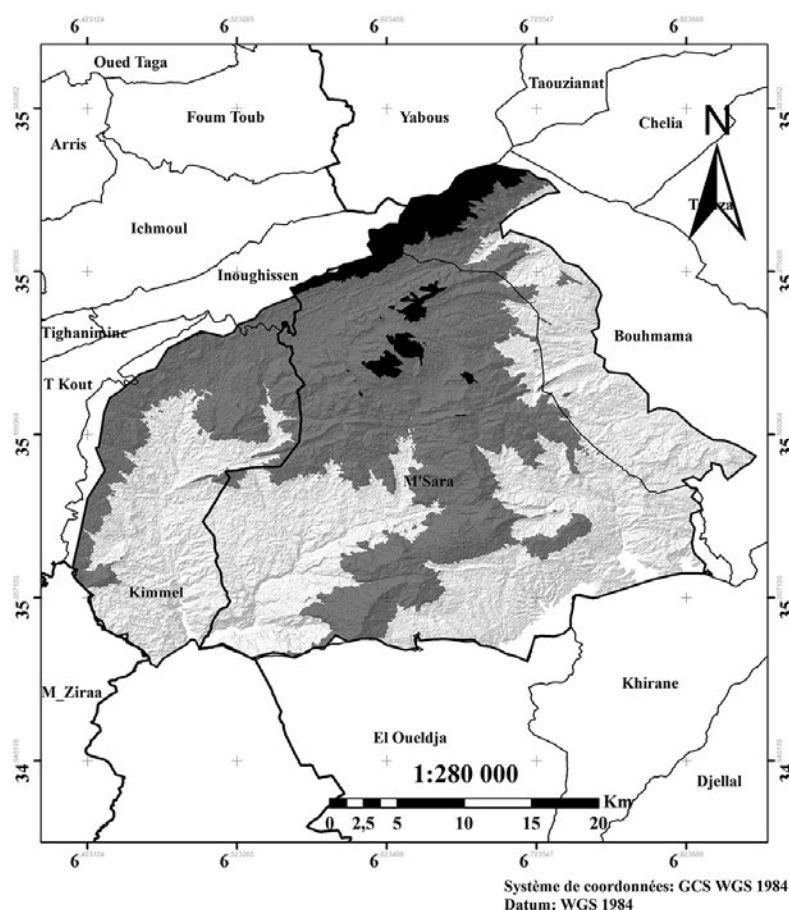


Fig. 5 (ci-dessus et ci-contre) :
Carte de la topomorphologie de la zone d'étude.

Classe des pentes	Topographie	Superficie en ha	Pourcentage (%)
$P < 3\%$	Plaine	1758	2
$3 < P < 12,5\%$	Bas piémont	57156	61
$12,5 < P < 25\%$	Haut piémont	31693	34
$P > 25\%$	Montagne	2722,	3

Tab. IV (ci-contre) :
Classes de la topomorphologie dans la zone d'étude.

L'Indice de combustibilité (IC)

Carte d'occupation du sol de la zone d'étude

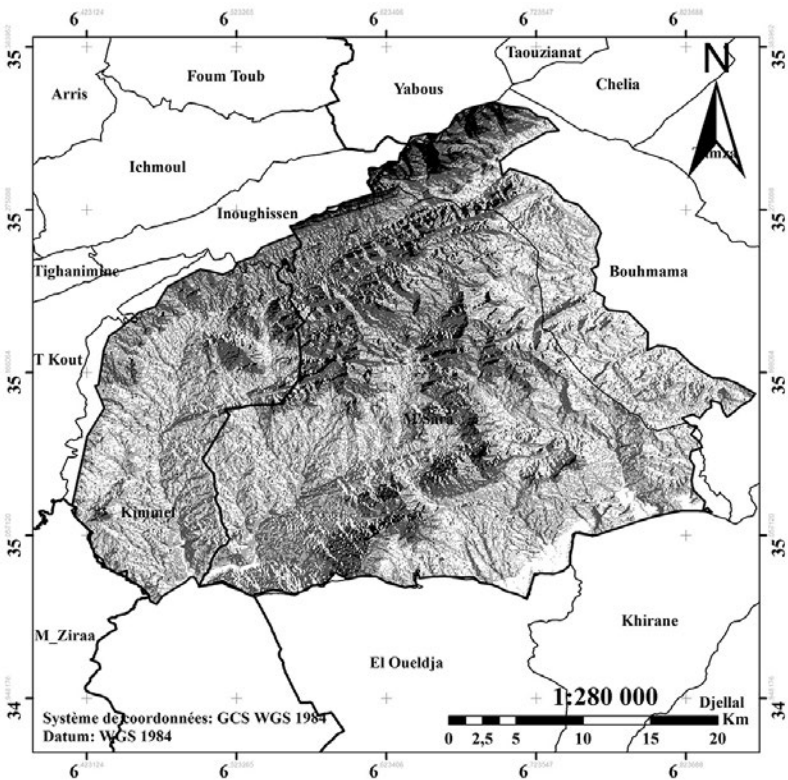
Les essences forestières dominantes dans la forêt des Beni Imloul (Cf. Fig. 7, Tab. VI page suivante) sont représentées essentiellement par : les pinèdes (*Pinus halepensis*) avec un pourcentage de 43% équivalent à une superficie de 40525 ha. Le chêne vert (*Quercus ilex*) qui représente un pourcentage de 30% et une superficie de 28 404 ha. Cette catégorie de forêt occupe surtout la partie Nord-Est et centre des massifs, associés avec une végétation plus ou moins arborée. La végétation herbacée atteint un pourcentage de 12% et couvre une superficie de 11 486 ha. Le sol nu représente un pourcentage faible de 9% soit 8 030 ha en terme de superficie. Et les zones agricoles, elles, sont sur quelques terrains dans le nord et l'ouest de la zone d'étude, avec un très faible pourcentage de 5% représenté par une superficie de 4 936 ha.

Indice de NDVI (Indice de végétation par différence normalisée)

Les résultats de NDVI (Cf. Fig. 8) nous ont permis d'obtenir quatre classes récapitulées dans le tableau VII (page suivante).

Indice de combustibilité (IC)

La combustibilité est estimée d'après la quantité de biomasse combustible, combinée à la structure des peuplements et leur composition (FALEH *et al*, 2012), le résultat de l'indice de combustibilité (Cf. Fig. 9) de notre site d'étude a été divisé en 4 classes (MARIEL, 1995) selon la résistance en feu.



Légende

- Limites de la zone d'étude
- Limites des communes
- Limites des Wilayas
- Peu favorable
- Moyennement favorable
- Favorable
- Très favorable

IM	Signification	Superficie (ha)	Pourcentage (%)
4<IM<16	Peu favorable	27098	29
16<IM<22	Moyenne favorable	31368	34
22<IM<30	Favorable	27382	29
30<IM<52	Très favorable	7462	8



De haut en bas :

Fig. 6 : Carte d'indice topomorphologique de la zone d'étude.

Tab. V : Classes de l'indice topomorphologique dans la zone d'étude.

Photo 1 : Forêt des Beni Imloul (2014)
© Conservation des forêts de Khenchela, Algérie.

D'après les résultats numériques de cet indice, on remarque que plus de 50 % de la superficie de la forêt des Beni Imloul présentent un indice de combustibilité élevé à très élevé. L'indice de combustibilité modéré représente un pourcentage de 25% de la surface totale. Un pourcentage de 14 % uniquement de cette superficie présente un indice de combustibilité faible. Les résultats de cet

indice s'expliquent par la dominance des espèces à combustibilité élevée, tels que le pin d'Alep et le chêne vert, accompagnées d'un sous-bois dominant. Les calculs numériques de cet indice sont présentés dans le tableau VIII (page suivante).

Indice humain (IH)

Les résultats de l'indice humain NDBI (Cf. Fig. 10 page suivante) dans le site des Beni Imloul sont fiables pour la délimitation des terres nues et des terres urbanisées. Ils montrent une influence importante de l'impact des activités humaines sur le site d'étude. Celles-ci sont liées aux activités agricoles qui prennent différentes formes telles que la récolte du miel par fumage, les défrichements en périphérie : feu pastoral, brûlage de végétaux ; mais aussi à la déprise agricole ou encore aux interfaces habitat/forêt qui peuvent être des facteurs aggravants de la propagation des incendies des forêts dans la région d'étude.

Indice de risque de feux de forêt dans le massif de Beni Imloul

L'élaboration de la carte de risque d'incendie de forêt des Beni Imloul consiste donc à croiser les trois couches thématiques (indice de combustibilité, indice de topo-morphologie et indice humain) obtenues par l'application de l'équation du modèle mentionné au niveau de la méthodologie de notre travail. Cette carte (Cf. Fig. 11 page suivante) montre les zones à faible, moyenne, fort et très fort risque.

D'après la première observation de la carte de risque d'incendie et le calcul des superficies de chaque type de risque (Cf. Tab. IX) nous pouvons dire que : un pourcentage de 28 % du secteur d'étude présente un risque fort soit une superficie de 25 045 ha et un taux de 22% soit 21 610 ha présente un risque très fort. Ces deux types de risque se localisent dans la zone Est et sur la zone centre de la région d'étude, constituées par des peuplements de pin d'Alep. La classe de risque moyen occupe un pourcentage de 24 % équivalent à une superficie de 21 856 ha de la surface totale, elle se répartit principalement au sud et à l'ouest du secteur d'étude, constituée principalement par des peuplements de chêne vert. La classe de risque faible occupe un pourcentage de 26% qui représente une superficie de 24 730 ha, le risque faible se localise sur les frontières de la zone

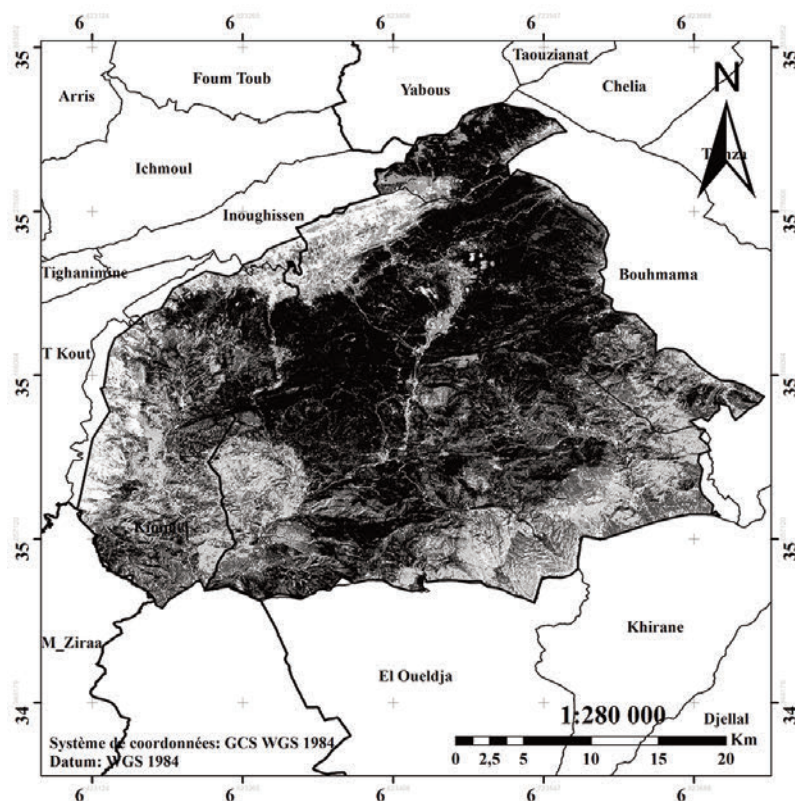


Fig. 7 (ci-dessus) :
Carte d'occupation du sol
de la zone d'étude.



Tab. VI (ci-dessous) :
Classes d'occupation
du sol dans la région
d'étude.

Classe	Surface en ha	Pourcentage (%)
Agriculture	4936	5
Chêne vert	28404	30
Pin d'Alep	40525	43
Végétation herbacée	11486	12
Sol nu	8030	9

d'étude, elle est occupée par des terres agricoles, des sols nus et des zones urbanisées.

D'après l'analyse des indices liés au risque d'incendie, le risque est dû à la végétation inflammable (pin d'Alep et chêne vert) qui sont les peuplements les plus dominants dans le territoire d'étude, la dominance d'exposition Sud qui présente les conditions les plus favorables pour une inflammation rapide et pour la propagation des flammes, et les facteurs anthropiques telles que les interfaces habitat/forêt qui peuvent être distinguées comme vulnérables au feu et ainsi comme sources d'aléa. La carte de risque réalisée dans ce travail aura un intérêt capital pour les services de lutte et d'aménagement, car le modèle adopté dans la méthodologie a donné des résultats importants et convaincants, elle est caractérisée par son adaptabilité aux régions méditerranéennes et sa simplicité d'exécution.

Conclusion

Le couvert forestier dans le massif des Beni Imloul est fortement touché par le phénomène d'incendie de forêt. L'application du modèle utilisé dans la méthodologie de travail sur le massif forestier des Beni Imloul, à l'aide de techniques de télédétection et SIG (systèmes d'informations géographiques) permet d'établir la carte de risque d'incendie de forêt par combinaison de plusieurs couches d'information. Les résultats obtenus par cette approche méthodologique montrent qu'une grande partie de la zone d'étude est exposée au risque moyen à fort d'incendie avec des pourcentages de 24 % et 28 % respectivement. Cependant, la carte du risque d'incendie de forêt réalisée dans ce travail n'est pas un moyen de lutte contre le feu de forêt, elle permet de déterminer les zones vulnérables et de hiérarchiser le risque d'incendie, afin d'aider à intervenir sur le milieu forestier avec une gestion durable, mettre en place une politique raisonnée pour la lutte et la prévention contre les incendies de forêts et établir un plan d'aménagement et un contrôle adapté des terrains exposés au risque d'incendie. Mais il est souhaitable que soient également améliorés d'autres modèles en essayant d'intégrer d'autres paramètres tels que les données climatiques comme la température, l'humidité de l'air, la vitesse et la direction du vent, les précipitations, etc.

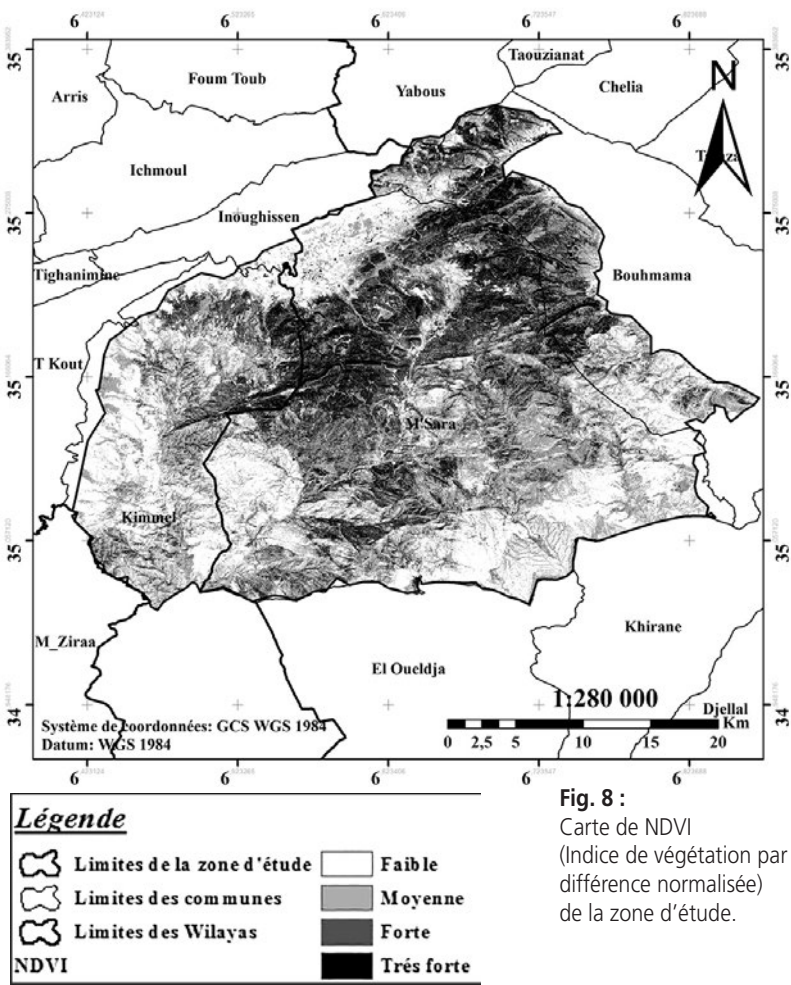


Fig. 8 :
Carte de NDVI
(Indice de végétation par
différence normalisée)
de la zone d'étude.

Classes de NDVI	Surface en ha	Pourcentage (%)
Faible	30 156	32
Moyenne	32 522	35
Forte	19 978	21
Très forte	10 724	11

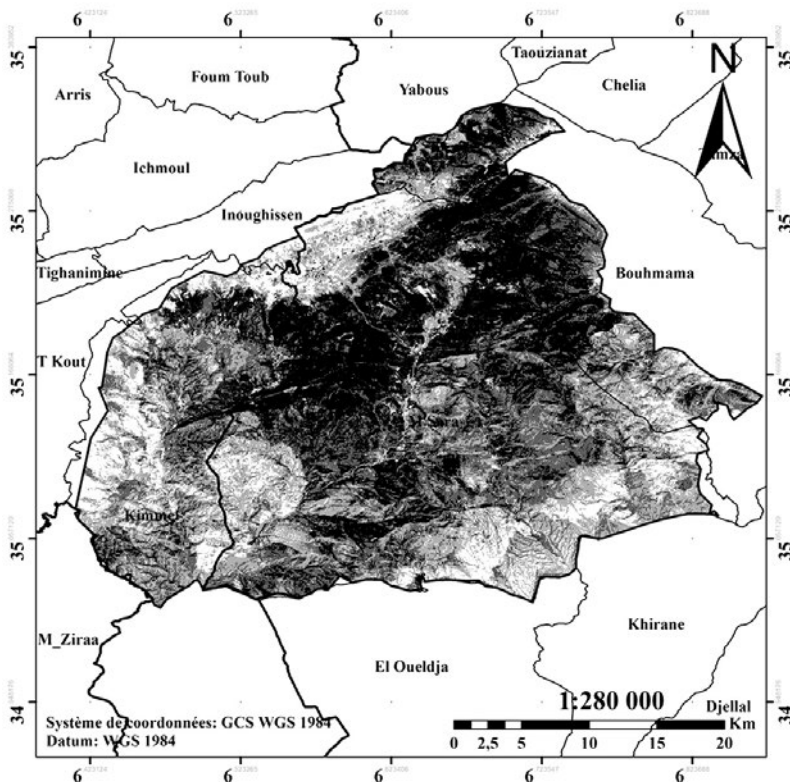
Tab. VII (ci-contre) :
Classes de l'indice NDVI
dans la zone d'étude.

Nous avons proposé de renforcer les équipes d'intervention, la mise en œuvre de pistes d'accès surtout là où le risque est élevé, des postes de surveillance, des points d'eau, la sensibilisation du public, ces actions permettant de réduire le risque d'incendie et d'en limiter les conséquences.

S.R., H.B.

Références bibliographiques

- ADAB, H., KANNIAH K., SOLAIMANI, K. (2013). — Modelling forest fire risk in the northeast of Iran using remote sensing and GIS techniques. *Rev. Natural Hazards*, 65: 1723-1743.
- ASAL. (2013). — Rencontre ASAL-DGF sur la présentation du bilan préliminaire des feux de forêts [En ligne] disponible sur : <http://www.asal.dz/>.
- ASSALI, F., MHARZI-ALAOUI, 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.
- BAARA, Y. (2014). — Caractérisation fractale et multi-fractale du transfert de chaleur Application aux feux. Thèse de doctorat en Sciences des matériaux, Université d'Oran des Sciences et de la Technologie, Algérie.
- BARBERO, M., LOISEL, R., QUEZEL, P. (1988). — Perturbations et incendies en région méditerranéenne française. Homenaje a Pedro Montserrat, Jaca y Huesca, 409-419.
- BELHADJ-AISSA, M., BELHADJ-AISSA, A., SMARA, Y. (2003). — Application du SIG et de la télédétection dans la gestion des feux de forêts en Algérie. 2nd FIG Regional Conference, Marrakech, Morocco.
- BRUNO (C.). — Influence de la végétation et du relief dans les feux de forêt extrêmes : étude de la dégradation, de l'accumulation et des propriétés de combustion des composés organiques volatils issus des feux de forêt. — Université de Poitiers— France, 2015 (Thèse de Doctorat en Sciences Fondamentales et Appliquées).
- CARBONELL, G., MONET, J.P., DUSSERRE, G., SAUVAGNARGUES-LESAGE, S. (2004). — Rapport : Embrasement généralisé éclair en feu de forêt (EGE), Ecole des Mines d'Alès -SDIS 13.
- CHAFAI, C. (2016). — Contribution à l'étude de la dynamique spatiale et de la biomasse du Frêne dimorphe dans la cédraie d'Ouled Yagoub W. de Khenchela. Thèse de Magister en sciences agronomiques. Université de Batna 1, Algérie.
- DAGORNE, A., DUCHE, Y., CASTEX, J.M., OTTAVI, J.Y. (1994). — Protection des forêts contre l'incendie et système d'information géographique : application à la commune d'Auribeau-sur-Siagne (Alpes Maritimes). *Ecol. Mediterr.*, 4: 409-420.
- ERTEN, E., KURGUN, V., MUSA OGLU, N. (2004). — Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS a case study, XXth Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), Istanbul, Turkey.
- FALEH, A., LAKHOUEJA, H., SADIKI, A., CHAAOUAN, J. (2012). — SIG, télédétection et évaluation de risque d'incendie de forêts Exemple du massif forestier Khezana (Province de CHAOUENE) . *rev. Papeles de Geografia*, 56: 37-48.
- FAO. (2006). — Fire management global assessment 2006. A thematic study prepared in the framework of the Global Forest Resources Assessment 2005— FAO *Forestry Paper* n° 151, Rome.
- HELAL, Y. (2010). — Etude de biomasse du romarin (*Rosmarinus officinalis* L.) dans le massif des Beni-Imoul-Aurès-Algérie. *rev. Forest Science*, 3 : 25-42.



Légende

- Limites de la zone d'étude
- Limites des communes
- Limites des Wilayas
- 29-31 (Faible)
- 31-32 (Modéré)
- 32-33 (Elevé)
- >33 (Très Elevé)

Fig. 9 (ci-dessus) :
Indice de combustibilité
(IC) de la zone d'étude.

Tab. VIII :
Classes d'indice
de combustibilité IC.

Classe	Note de risque	Surface en ha	Pourcentage (%)
29<IC<31	Faible	13 218	14
31<IC<32	Modéré	23 462	25
32<IC<33	Elevé	26 173	28
IC>33	Très Elevé	30 529	33

Tab. IX :
Classes de risque
d'incendie.

Classe d'IR	Signification	Superficie en (ha)	Pourcentage en (%)
IR >5	Risque Très fort	21 610	22
4<IR<5	Risque Fort	25 045	28
3<IR<4	Risque Moyen	21 856	24
IR<3	Risque Faible	24 730	26

- KHADER,M., BENABDELI,K., MEDERBALK,Y., FEKIR-GUEDDIM,R., MEKKOUS,B. (2009).— Etude du risque incendie à l'aide de la géomatique (cas de la forêt de Nesmouh, Mascara) — *Rev. Méditerranée*, 20.
- LAMPIN,C., JAPPIOT, M., FERRIER,J.P. (2011).— Modélisation du risque incendie de forêt dans les interfaces habitats-forêts— *rev. Sciences, Eaux & Territoires*, n°3.
- MARIEL, A. (1995).— Cartographie du niveau de risque d'incendie: exemple du massif des Maures, CEMAGREF.
- MEDDOUR-SAHAR, O., DERRIDJ,A. (2012). — Bilan des feux de forêts en Algérie : analyse spatio-temporelle et cartographie du risque (période 1985-2010) - *rev. Sécheresse*, 23 :133-141.
- MERDAS, S. (2007).— Bilan des incendies de forêts dans quelques wilayas de l'Est algérien; cas de Bejaia, Jijel, Sétif et Bordj Bou-Arréridj. (Thèse de Magister en écologie et environnement). Université de Mentouri-Constantine— Algérie.
- MISSOUMI,A., TADJEROUNI,K. (2004).— SIG et imagerie Alsat1 pour la cartographie du risque d'incendie de forêt. 2nd FIG Regional Conference, Marrakech, Morocco.
- ZHA,Y., GAO,J., NI, S. (2005). — Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery— *International Journal of Remote Sensing*, vol.24: 583-594.

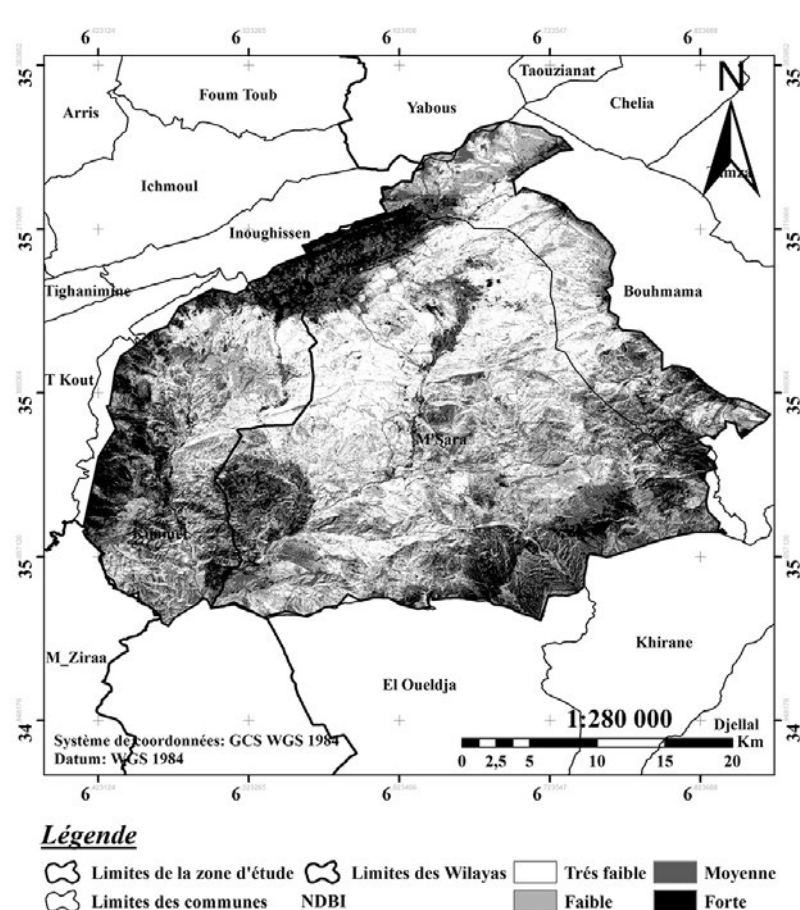


Fig. 10 (ci-dessus) :
Carte de NDBI (indice humain) de la zone d'étude.

Souad RAHMANI

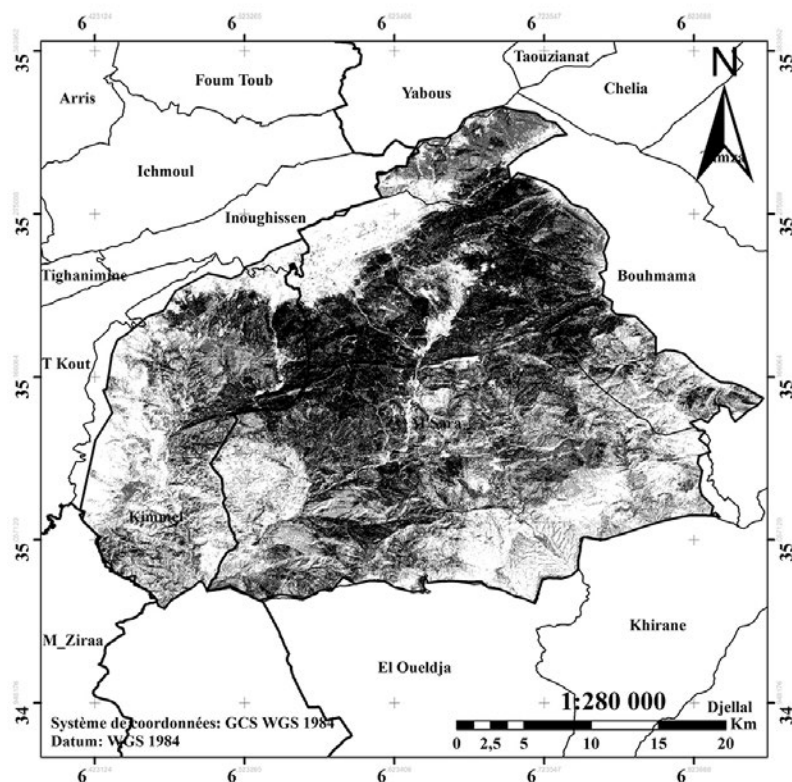
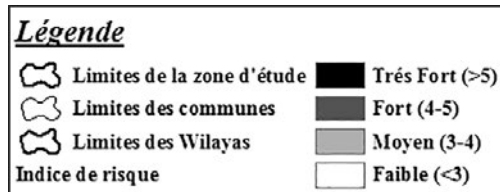
Faculté des sciences de la vie et de la nature,
Département d' Écologie et environnement,
Université Batna 02
53 routes de Constantine Fédés 05078 BATNA
ALGÉRIE
Email : s.rahmani@univ-batna2.dz

Hassen BENMESSAOUD

Institut des Sciences Vétérinaires et des
Sciences Agronomiques, Université Batna 01
Hadj Lakhdar
5 avenue Chahid Boukhrouf 05000 BATNA
ALGÉRIE
Email : ha123_m12@yahoo.fr

Nom de l'auteur correspondant :
Souad RAHMANI

Fig. 11 (ci-contre) :
Carte de risque d'incendie de forêt
de la zone d'étude.



Résumé

Modélisation et cartographie du risque incendie de forêt dans la partie orientale des Aurès (Algérie)

Cette étude est basée sur deux objectifs. Le premier consiste à élaborer une carte de risque d'incendie du massif forestier des Beni Imloul situé au niveau de l'Aurès oriental dans la partie nord-est de l'Algérie. Le deuxième est de fournir aux gestionnaires un outil d'aide dans leurs études d'aménagement, de prévention et de lutte contre les incendies en forêts. L'approche adoptée est un modèle empirique pour cartographier les zones vulnérables aux feux de forêt. Il est basé sur trois paramètres qui influencent la propagation d'un feu de forêt. Cette cartographie est faite en utilisant des logiciels de SIG et de la télédétection. Il s'agit de l'indice de topo-morphologie du terrain, l'indice de combustibilité et l'indice anthropique. L'étude d'aléa de feux de forêts montre que l'ensemble du territoire d'étude est menacé mais avec une intensité variable selon la topo-morphologie des zones et selon la nature d'occupation du sol. Les zones les plus vulnérables sont localisées dans le centre du secteur d'étude avec un pourcentage de 50% de la surface totale du site d'étude, la conjonction des indices de l'aléa et de la vulnérabilité montrent un risque fort à moyennement fort aux feux de forêts dans notre zone d'étude.

Mots-clés : feu, SIG, Télédétection, Beni Imloul, risque, forêt, vulnérable, aléa.

Summary

Modeling and cartography of forest fire risk in the eastern part of the Aurès mountains (Algeria)

This study is based on two objectives. The first is to develop a wildfire risk map of the Beni Imloul forest situated in the eastern Aurès (North-East Algeria). The second is to provide administrators with a tool to help them in their studies of forest management, wildfire prevention and firefighting. The approach adopted is an empirical model for mapping areas vulnerable to forest fires. It is based on three parameters which influence the spread of a forest fire: indices of the topomorphology of the terrain, of the combustibility and of the anthropogenic factor. This mapping is done using GIS and remote sensing software. According to the results obtained, the fire risk study shows that the entire study area is under threat but to a variable degree depending on the topomorphology of the zone and the nature of the land use. The most vulnerable areas are located towards the center of the study area, representing 50% of the total surface area studied. The combination of the hazard and vulnerability indices shows a high to medium risk of forest fires in our study area.

Key words: fire, GIS, Remote sensing, Beni Imloul, risk, forest, vulnerable, hazard.