Télédétection, 2005, Vol. 5, n°(1-2-3), p. 197-212

© 2005 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions Scientifiques GB*

APPORT DE LA TÉLÉDÉTECTION DANS LA GESTION DES GÉORISQUES : CAS DES INCENDIES DE FORÊT EN MILIEU SEMI-ARIDE TUNISIEN

NOUHA MEZNED[1,a*], HEDIA CHAKROUN[2,b] et MOHAMMED RACHED BOUSSEMA[3,c]

[a] *Laboratoire de Télédétection et Systèmes d'Information à Référence Spatiale, École Nationale d'Ingénieurs de Tunis, B.P. 37, 1002 Tunis Belvédère, Tunisie ; téléphone : +216 71 874 700 ; télécopieur : +216 71 872 729.*

[b] *Institut National de Recherches du Génie Rural et des Eaux et Forêts, Ministère de l'Agriculture de Tunis, B.P. 10, 2080 Ariana, Tunisie ; téléphone : +216 71 709 033 ; télécopieur : +216 71 717 951.*

[c] *Laboratoire de Télédétection et Systèmes d'Information à Référence Spatiale, École Nationale d'Ingénieurs de Tunis, B.P. 37, 1002 Tunis Belvédère, Tunisie ; téléphone : +216 71 874 700 ; télécopieur : +216 71 872 729.*

Courriel [1,2,3] : mezned_nouha@yahoo.fr ; hedia.chakroun@iresa.agrinet.tn ; Rached.boussema@enit.rnu.tn

(soumis : 10 décembre 2004 ; révisé : 28 février 2005 ; accepté 18 mars 2005)

Dans cette étude, on vise à explorer l'apport de l'imagerie spatiale pour le suivi de la dynamique de la végétation avant et après incendie ainsi que l'estimation de l'inflammabilité des formations forestières. La réalisation de cet objectif permet d'améliorer l'aménagement des zones les plus à risque et de cibler les ouvrages de protection pour être en mesure de lutter convenablement contre les incendies de forêt. On présente les résultats obtenus à partir de l'analyse et du traitement des données de télédétection optique multidates et multicapteurs HRV (SPOT-XS de 1988 et de 1996 et ASTER de 2001) de moyenne résolution spatiale (20 m et 15 m) sur le site incendié de Oum Laboueb (Djebel Fkirin) situé au Nord de la Tunisie. Ce site a été ravagé par le feu pendant l'été de 1988. Une nouvelle méthode a été développée, reposant sur des techniques d'interprétation visuelle, de classification dirigée, de combinaison arithmétique appliquée aux images disponibles et d'analyses statistiques des informations spectrales.

L'étude de la dynamique de la végétation a été réalisée à partir de traitement d'images multidates : l'image HRV (1988) prise quelques jours avant l'incendie, l'image HRV (1996) prise à un stade où la végétation s'est régénérée en grande partie et l'image ASTER (2001) qui représente la situation actuelle de la forêt d'Oum Laboueb. Le travail sur le terrain a été préparé à l'aide d'un système d'information géographique (SIG) utilisé pour la délimitation des zones homogènes à partir des ortho-photographies. Nous avons effectué des relevés de végétation sur des placettes couvrant le site d'étude; ces relevés ont constitué la réalité de terrain utilisée dans le processus de classification d'images multidates. Les connaissances de terrain et l'analyse spectrale d'images ont montré le potentiel des images pour définir les classes d'occupation du sol à l'aide de classifications dirigées des images acquises avant et après l'incendie. Cela a permis d'obtenir une cartographie des états de la forêt pour les trois dates retenues. Enfin, le recours aux analyses statistiques par la méthode d'analyse en composantes principales (ACP) a permis de diagnostiquer les relations existantes entre l'information structurale liée à la végétation, la topographie du milieu (issue d'un modèle numérique d'altitude numérisé à partir des courbes de niveau d'une carte au 1 : 25 000), l'information spectrale et le degré d'inflammabilité. Les résultats trouvés par le calcul de l'indice de végétation NDVI à partir de l'image ASTER sont également pertinents.

Mots-clefs : imagerie spatiale ; incendie de forêt ; cartographie multidate et multicapteur ; impact d'incendie ; régénération ; inflammabilité ; analyse en composantes principales ; NDVI.

THE CONTRIBUTION OF REMOTE SENSING TO GEORISK MANAGEMENT: THE CASE OF FOREST FIRES IN A TUNISIAN SEMIARID ENVIRONMENT

This study exploits the contribution of spatial data to the monitoring of vegetation dynamics before and after a fire and inflammability estimations of forest formations to improve risk area planning and to the struggle against forest fire. This article presents the results obtained from multidate and multisensor optical remote sensing data analysis and processing (mean spatial resolution : 20 m and 15 m) at the Oum Laboueb fire site (Djebel Fkirin) located in Northern Tunisia. The site was ravaged by fire in the summer of 1988. A new approach based on the contribution of visual interpretation techniques, supervised classification, arithmetic combination applied on the available images and statistical analyses of spectral information, was developed.

The vegetation dynamics study was carried out using multidate image processing : a SPOT-XS image of 1988 acquired a few days before the fire, a SPOT HRV-XS image of 1996 acquired during a phase when most of the vegetation had regenerated and an ASTER image of 2001, which presents the current situation of the Oum Laboueb forest. Field work was prepared using a geographical information system (GIS) used for homogeneous area delimitation from airborne photos. We carried out a vegetation survey over a series of plots distributed over the study area. This survey constitutes the ground truth used in the multitemporal image classification. Field knowledge and image spectral analysis have shown the potential of the images acquired before and after the fire in defining land

cover classes using the technique of supervised classification. This procedure permitted the establishment of a map forest states for each of the three dates. Finally, the statistical analyses based on the use of the principal components analysis (PCA) allowed the identification of existing relations between structural information of the vegetation, site topography (derived from a DEM), spectral information and the degree of inflammability. The results derived through the calculation of the vegetation index (NDVI) extracted from the ASTER image are also pertinent.

Keywords : satellite imagery ; forest fire ; multitemporal and multisensor cartography ; fire impact ; regeneration ; inflammability ; principal components analysis ; NDVI.

1. INTRODUCTION

Les inondations, les avalanches, les éruptions volcaniques et les incendies de forêt constituent tous des géorisques susceptibles de causer des dommages multiples (Blanchi, 2001). Bien que les incendies de forêt fassent partie des risques naturels majeurs leur déclenchement et leur arrêt sont très dépendants de l'action de l'humain. De nombreuses études en relation avec les incendies de forêt et leur impact sur l'environnement ont été réalisées (Fourcade, 2001). Les incendies de forêt peuvent causer des dommages multiples : c'est le cas, par exemple, de l'incendie qui a éclaté dans les forêts de Californie, le 21 octobre 2003, et qui a causé la mort de 14 personnes et ravagé près de 5 000 ha de forêt (Giraud, 2003). Il est donc devenu nécessaire de mieux connaître le phénomène feu de forêt, ses aléas et ses enjeux. Ainsi, il existe à l'heure actuelle une forte demande en matière de cartographie du risque d'incendie de forêt (Missoumi *et al*, 2003) pour être en mesure de lutter convenablement contre ce fléau.

Dans ce contexte, pour aider à la cartographie du risque d'incendie, on s'est intéressé à l'étude d'un incendie qui a éclaté au site d'Oum Laboueb (Nord de la Tunisie), le 20 juillet 1988, et qui a ravagé 2 038 ha de forêt. Le contexte écologique, les pressions humaines et surtout le contexte semi-aride exposent la forêt tunisienne aux incendies.
Cette recherche a été menée dans le cadre d'un projet de recherche partagée sur le Djebel Mansour (Nord du pays) intitulé «Télédétection et gestion des géorisques : cas des incendies de forêt ». Les partenaires de ce projet sont : l'Institut National de Recherches du Génie Rural et des Eaux et Forêts (INRGREF), l'Institut National Agronomique de Tunis (INAT), l'École Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT) et les partenaires suisses (École Polytechnique Fédérale de Lausanne) et français (Institut National de Recherche Agronomique d'Avignon).

Autrefois, la gestion des incendies s'est toujours appuyée sur des campagnes de terrain régulières qui, certes, présentent des difficultés majeures liées à la lenteur, à la complexité, à la lourdeur et au coût élevé. Toutes ces difficultés obligent à chercher d'autres voies pour satisfaire ce besoin. Ainsi, dans cette étude, on s'est proposé d'utiliser la télédétection, en particulier l'imagerie satellitaire, peu coûteuse et présentant une meilleure couverture spatiale.

Nous décrivons tout d'abord le site d'étude et les données qui ont été utilisées, notamment, des photographies aériennes, des images multidates (avant et après incendie) et des images multi-capteurs (ASTER et HRV-XS de SPOT). Nous présentons par la suite une nouvelle méthodologie pour étudier la dynamique de la végétation avant et après incendie, et l'un des facteurs de risque qui est l'inflammabilité des espèces végétales. Nous proposons enfin une méthode de détection de l'impact de l'incendie par estimation des zones brûlées et suivi de la régénération après incendie. Nous cherchons également à confronter l'information structurale des formations végétales, l'information topographique et l'information spectrale issue de l'image ASTER avec des observations de terrain ayant permis d'estimer l'inflammabilité des formations forestières.

2. INCENDIE DE LA FORÊT D'OUM LABOUEB (TUNISIE DU NORD)

2.1 Choix et description du site d'étude

Le site d'Oum Laboueb fait partie de la série forestière de Djebel Fkirin et est situé dans le gouvernorat de Zagouan, à 10 km de Djebel Mansour. Ces deux sites présentent un écosystème forestier de pins d'Alep (*Pinus halepensis*). Il s'agit d'une espèce résineuse qui constitue la plus grande partie des formations forestières en Tunisie. Les espèces ligneuses accompagnatrices sont : *Rosmarinus officinalis* (le Romarin), *Pistacia lentiscus* (le Lentisque) et *Erica multiflora*. L'hypothèse est que les espèces trouvées sur le site ont un comportement analogue aux mêmes espèces étudiées dans le Djebel Mansour. Autrement dit, on a considéré que les comportements des espèces du point de vue inflammabilité sont les mêmes, puisque les deux sites ne sont pas éloignés et se trouvent dans la même région. Dans notre recherche, on s'est intéressé à l'étude de l'incendie qui a éclaté au site d'Oum Laboueb en 1988 pour aider à la cartographie du risque d'incendie au Djebel Mansour. Ce choix a été essentiellement motivé par la similarité des deux sites du point de vue

des paysages et de la disponibilité des informations. Donc le site présente un intérêt majeur pour le présent projet de recherche.

Le site d'Oum Laboueb (figure 1) s'étend sur 2 038 ha et est compris entre les méridiens 9°50' à 9°53'est et les parallèles 36°11'75" à 36° 07'57"nord. Sur le plan topographique, le site est constitué par une série de crêtes de direction générale nord-sud, avec un relief fortement accusé et dont les hauteurs culminent à 736 m au nord. Au sud, les hauteurs ne dépassent pas 691 m. Les sols sont de type calcaire et marno-calcaire et l'étage bioclimatique est semi-aride supérieur à hiver tempéré avec une pluviométrie annuelle variant entre 500 à 600 mm. La forêt de Djebel Fkirin paraît moins dégradée que celle de Djebel Mansour. Ce qui est important à remarquer c'est que, même à l'étage dense, les pins d'Alep prennent très rapidement un aspect en boule et restent courts. Cet aspect tient essentiellement à la qualité généralement médiocre du sol qui reste le plus souvent superficiel (peu profond). Si toute la partie nord et une partie du centre de la forêt présentent des peuplements denses, tout le versant est et une partie du sud par contre, est pratiquement clair, dégradé ou même parfois vide d'arbres. Cet état de fait provient essentiellement des incendies particulièrement nombreux et importants d'origine criminelle ou accidentelle. D'autres facteurs peuvent être à l'origine de cet état tels que le surpâturage, l'action de l'humain, etc.

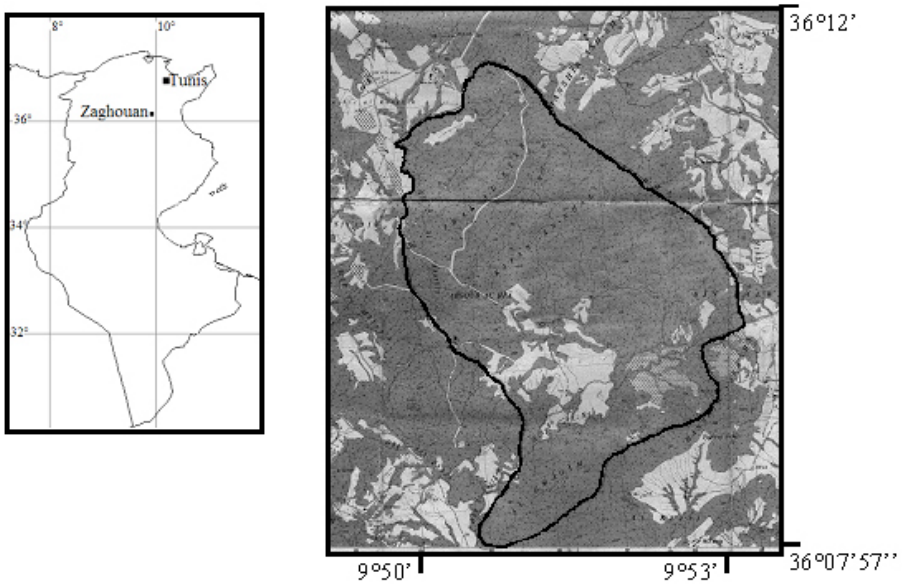


FIGURE 1 Représentation de la zone d'étude d'Oum Laboueb, située au nord de la Tunisie, entre 9°50' et 9°53' Est et 36°07'57" et 36°11'75" Nord. *The Oum Laboueb study area, situated in northern Tunisia, between 9°50' and 9°53' East and 36°07'57" and 36°11'75" North.*

2.2 Données utilisées

Nous disposons d'un Plan d'aménagement forestier de la forêt domaniale de Chenannfa-Faroua (Subdivision El Fahs, 1994) et d'une carte topographique de Djebel Fkirin Sud-Ouest au 1/25 000 (1982). Cette carte a été scannée et géoréférencée pour réaliser le modèle numérique d'altitude (MNA) à partir des courbes de niveau équidistantes de 10 m.

Nous disposons également de deux images HRV-XS de SPOT, en format IMG, d'une résolution de 20 m qui ont été acquises, l'une, juste avant l'incendie du 20 juillet 1988, soit le 26 juin 1988 (figure 2a), et l'autre, après l'incendie, soit le 20 août 1996 (figure 2b). Cette dernière, acquise juste après l'incendie sur le site d'étude, est la seule image qui soit disponible au CNT (Centre National de Télédétection de Tunisie). Ces images ont été acquises dans trois bandes spectrales, le vert (0,50-0,59 µm), le rouge (0,61-0,68 µm) et le proche infrarouge (0,79-0,89 µm). Ces deux images vont servir pour évaluer l'ampleur de ce phénomène sur le site d'étude et pour détecter les changements survenus après l'incendie. L'image ASTER en format HDF-EOS, d'une résolution de 15 m, a été acquise le 19 juin 2001 (figure 2c). Cette image acquise treize ans après l'incendie est

la plus récente disponible. Elle a également été acquise dans trois bandes spectrales, le vert (0,52-0,60 µm), le rouge (0,63-0,69 µm) et le proche infrarouge (0,76-0,86 µm). Elle permet de donner une idée de l'état actuel de la forêt et sur l'évolution récente de la régénération de la végétation sur le site. Les informations spectrales tirées de cette image seront également utilisées dans l'étude de l'inflammabilité.

On a utilisé des photographies aériennes infrarouge de 2000 (figure 2d). Ces orthophotographies de la Tunisie, disponibles en projection UTM32, sont utilisées pour établir une description préliminaire et sommaire de la zone d'étude afin de faciliter le travail sur le terrain. Elles ont servi également comme système de référence pour réaliser la correction géométrique des images satellitaires.

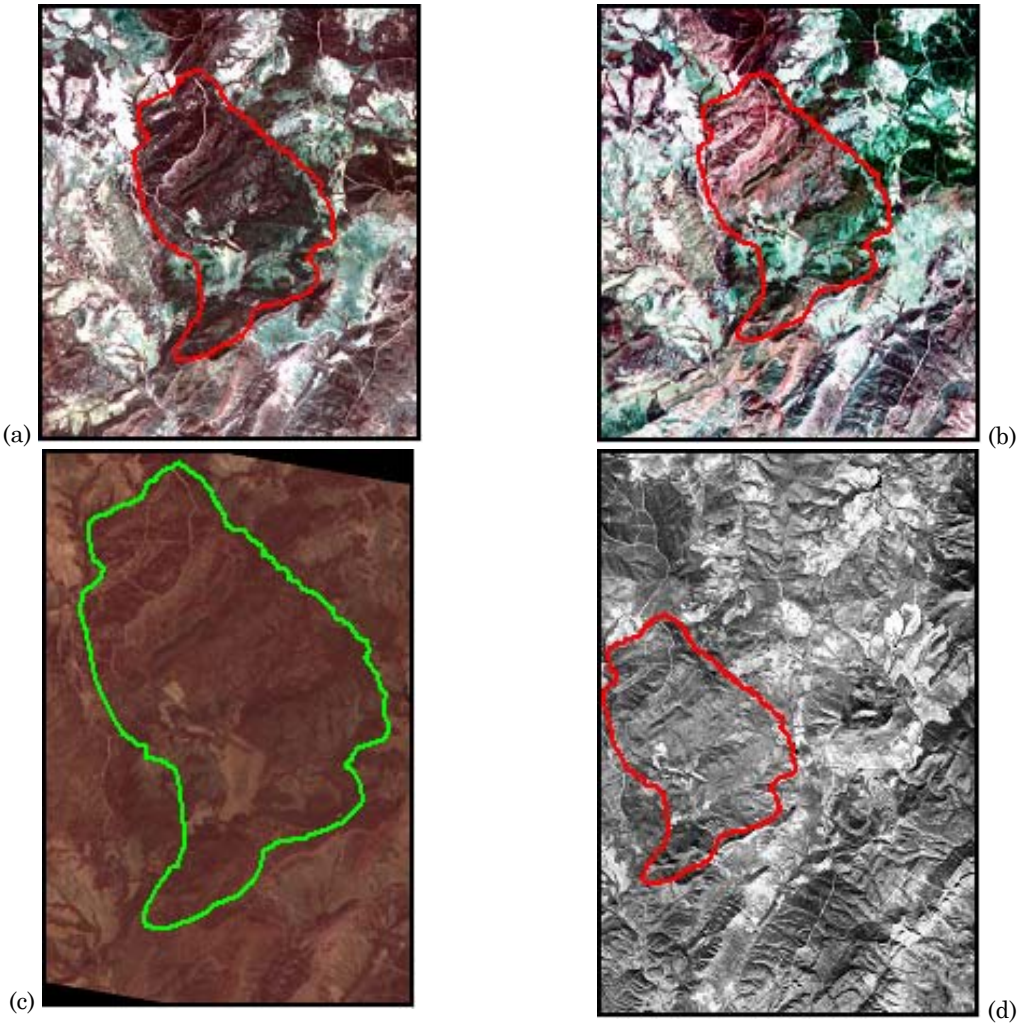


FIGURE 2 Données utilisées pour l'étude du site d'Oum Laboueb ; figure 2a : image SPOT-XS de 1988 (277 x 373 pixels) acquise juste avant l'incendie ; figure 2b : image SPOT-XS de 1996 (277 x 373 pixels) acquise huit ans après l'incendie ; figure 2c : image ASTER de 2001 (369 x 504 pixels) acquise treize ans après l'incendie, et figure 2d : photographies aériennes prises sur le site d'Oum Laboueb, mission de 2000. Le site d'Oum Laboueb est délimité sur les quatre images. *Data used for the study of the Oum Laboueb site ; figure 2a : SPOT-XS image of 1988 (277 x 373 pixels) acquired before the fire ; figure 2b : SPOT-XS image of 1996 (277 x 373 pixels) acquired eight years after the fire ; figure 2c : ASTER image of 2001 (369 x 504 pixels) acquired thirteen years after the fire and, figure 2d : Aerial photograph acquired in 2000. The Oum Laboueb site is delineated on the four images.*

3. MÉTHODOLOGIE ET TRAITEMENTS

3.1 Méthodologie adoptée

La démarche suivie est expliquée par l'organigramme méthodologique (figure 3).

Les relevés de végétation ont été effectués selon deux méthodes. Tout d'abord, l'interprétation des photographies aériennes infrarouge, à l'aide du logiciel SIG Arcview (Guide de l'utilisateur, 1998), a permis de générer une carte des divers peuplements végétaux. En effet, lors des premières visites sur le terrain, on a remarqué que la zone forestière d'Oum Laboueb est hétérogène et le relief est fortement accusé. Il s'est avéré que l'interprétation des photographies aériennes et le zonage du site d'étude constituent une étape essentielle pour la reconnaissance de la zone avant d'accomplir les missions de terrain. Cette étape permet de détecter les zones homo-gènes qui représentent les aires d'occupation des divers peuplements forestiers et facilite le travail sur le terrain et l'échantillonnage.

L'observation des photographies aériennes permet donc d'établir une carte de peuplements homogènes (figure 3) qui va servir de base pour la définition de placettes tests. Cette observation est basée essentiellement sur la couleur et la texture (nuances de gris) sans prendre en compte l'effet du relief et de l'exposition des versants.

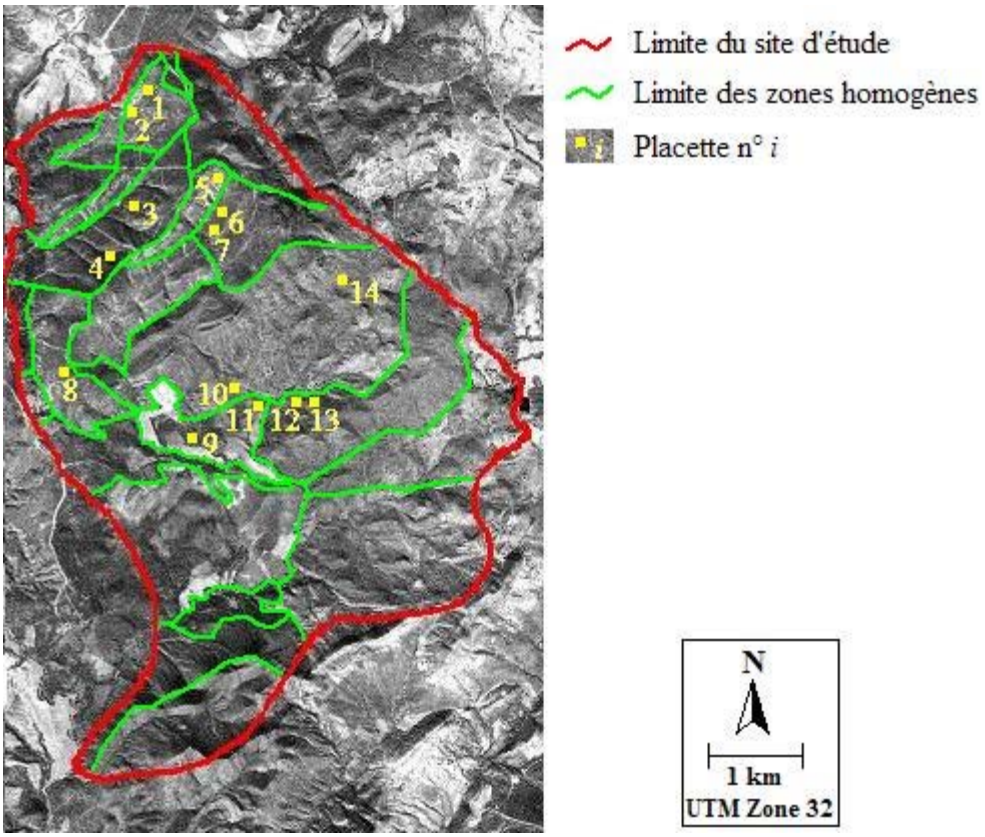


FIGURE 3 Zonage du site d'étude et délimitation des différents types de peuplements forestiers existants dans la forêt d'Oum Laboueb. Les petits carrés numérotés représentent les placettes et leur emplacement sur le site. Zoning of the study site and delineation of the different forest stand types present in the Oum Laboueb forest. The small squares represent the sampling plots and their location within the site.

Par la suite, on a installé des placettes de forme carrée de 4×4 m dans des zones homogènes régénérées. Ces placettes ont permis de faire l'inventaire des espèces forestières qui consiste en des mesures du continu et des caractéristiques de la forêt telles que la hauteur, le diamètre, le nombre d'espèces, etc. Comme c'est essentiellement la partie nord et une partie du centre qui sont concernées par l'incendie, ainsi on s'est focalisé surtout sur ces zones pour mettre des

placettes. Cinq placettes ont été choisies comme sites d'entraînement pour réaliser les classifications dirigées des images et générer des cartes d'occupation du sol pour les différentes dates, avant et après incendie. Ces placettes sont prises sur des zones les plus représentatives parmi les zones régénérées et ce sont les zones qui nous intéressent dans cette étude. Pour les cinq autres classes, celles qui correspondent aux différentes classes de sols (calcaire, marneux et marneux + végétation) et la classe correspondant à la zone non incendiée (forêt de pins matures de forte densité), nous avons choisi des sites d'entraînement dans les zones les plus significatives en terme de superficie. D'autre part, cinq autres placettes et cinq autres sites d'entraînement ont permis d'établir la réalité de terrain qui allait valider par la suite les résultats tirés des images satellitaires par traitement numérique. Nous avons utilisé les mêmes sites d'entraînement sur les trois images satellitaires acquise avant et après incendie pour réaliser les classifications dirigées.

L'impact de l'incendie a été identifié par la détection des zones brûlées et l'étude de la régénération après l'incendie en superposant les différentes cartes. Les deux images HRV de 1996 et ASTER de 2001 ne présentant pas la même résolution spatiale, nous avons adapté les résolutions des deux images classifiées par duplication des pixels de manière à ajuster la haute résolution à la plus basse.

D'autre part, un modèle numérique d'altitude a permis de déterminer les facteurs topographiques suivants : l'altitude, la pente et l'exposition.

À partir des données topographiques, des données de terrain et des informations spectrales (comptes numériques) tirées de l'image ASTER qui représente l'état actuel, on a pu réaliser une analyse statistique par la méthode de l'analyse en composantes principales. Cette méthode vise l'étude de la corrélation entre ces facteurs et la possibilité de décider sur les formations végétales inflammables à partir d'un simple traitement numérique d'image satellite.

3.2 Classification des images optiques

Les classifications dirigées des images par la méthode de maximum de vraisemblance consistent en deux étapes. La première phase, l'apprentissage concerne la détermination des sites d'entraînement en se basant sur la connaissance à priori du terrain. La deuxième est la phase de classification proprement dite. En effet, il s'agit d'un algorithme de classification basé sur le théorème de Bayes qui permet de décrire les classes contenues dans l'image par la notion de densité de probabilité. L'évaluation de la qualité des classifications se fait par le calcul de la matrice de confusion (Minvielle *et al*, 2003) et l'indice Kappa K proposé par Cohen (1960). L'indice Kappa s'exprime en probabilité de classification correcte sur une échelle de 0 à 1. Le Kappa calculé pour les trois classifications est respectivement égal à ; K = 0,72 pour la classification de l'image ASTER, K = 0,88 pour la classification de l'image SPOT de 1988 et K = 0,78 pour la classification de l'image SPOT de 1996 (Mezned, 2003). Pour ces valeurs de K, les résultats de classification sont performants.

Les cartes de végétation issues de la classification des images satellitaires sont à l'origine de la connaissance de l'état de la végétation forestière lors des trois dates. Elles donnent une indication précieuse de la répartition de la végétation. Une fois les images corrigées, les informations peuvent être tirées et utilisées pour générer des classifications mettant particulièrement en valeur les caractéristiques des végétaux ou leur croissance.

La classification dirigée de l'image ASTER par la méthode du maximum de vraisemblance fait apparaître dix classes (figure 4). D'après la carte de l'occupation du sol, on remarque qu'il existe des classes de végétation régénérée à différents stades de développement. La forêt est encore en phase de développement et n'a pas encore atteint le stade de forêt de pins d'Alep matures. La période de treize ans écoulée depuis l'incendie et la date de la prise de l'image, n'était pas suffisante pour que cet écosystème forestier ait pu se régénérer complètement et reprendre son état normal. Ceci montre bien la fragilité des écosystèmes forestiers qui nécessitent plus de vingt ans pour atteindre le stade de maturité.

Sur la figure 5, on montre le résultat de la classification dirigée de l'image HRV de 1988 acquise juste avant l'incendie. La classification montre uniquement sept classes. On note bien l'hétérogénéité du site d'Oum Laboueb avant l'incendie.

La classification dirigée de l'image HRV de 1996 acquise huit ans après l'incendie (figure 6) fait apparaître les mêmes classes que celles de l'image ASTER de 2001. Les quelques différences qui sont apparues peuvent être liées à la date de l'image (l'image HRV fut acquise le 20 août 1996), aux conditions bioclimatiques présentes et à la différence relative de la résolution spatiale du capteur HRV par rapport au capteur ASTER.

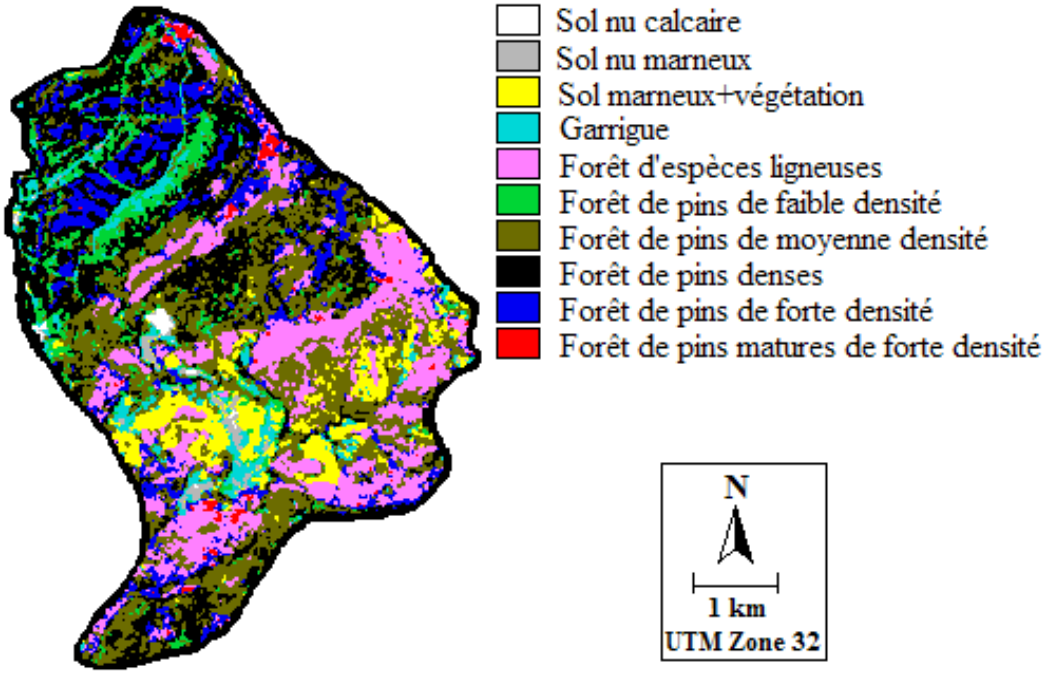


FIGURE 4 Classification dirigée de l'image ASTER de 2001 utilisant la méthode du maximum de vraisemblance. Cette image classifiée est filtrée par un filtre de 3 x 3 uniquement pour la lisibilité de l'affichage. Supervised classification of the 2001 ASTER image using the maximum likelihood method. The classified image is filtered with 3 x 3 filter for better legibility.

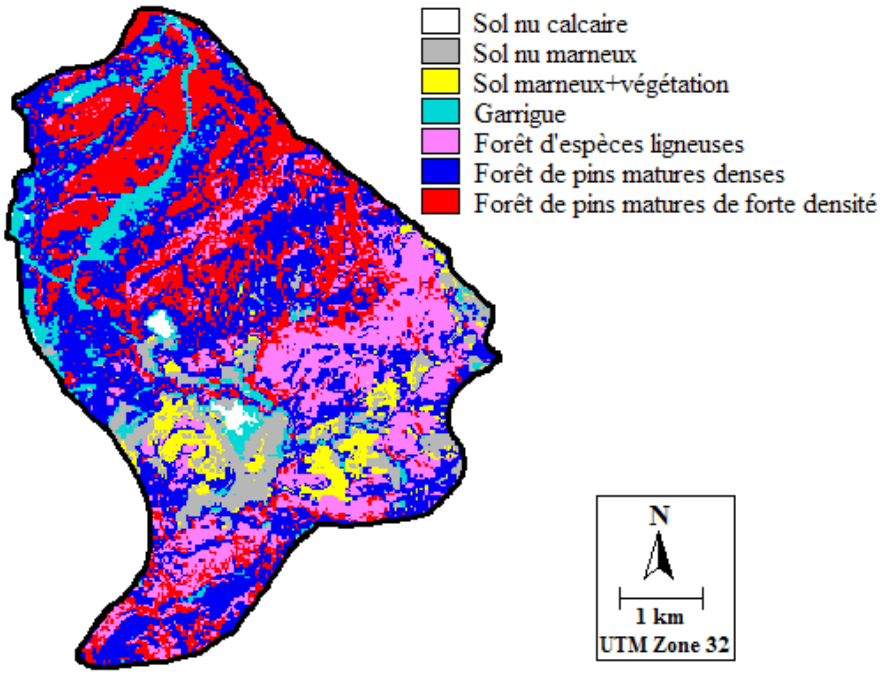


FIGURE 5 Classification dirigée de l'image SPOT-XS de 1988 utilisant la méthode du maximum de vraisemblance. Cette image classifiée est filtrée par un filtre de 3 x 3 uniquement pour la lisibilité de l'affichage. Les tranchées pare-feux (couleur bleu cyan) sont bien visibles au nord du site. Supervised classification of the 1988 SPOT-XS image using the maximum likelihood method. The classified image is filtered with 3 x 3 filter for better legibility. The firewall trenches (cyan blue) can be seen north of the site.

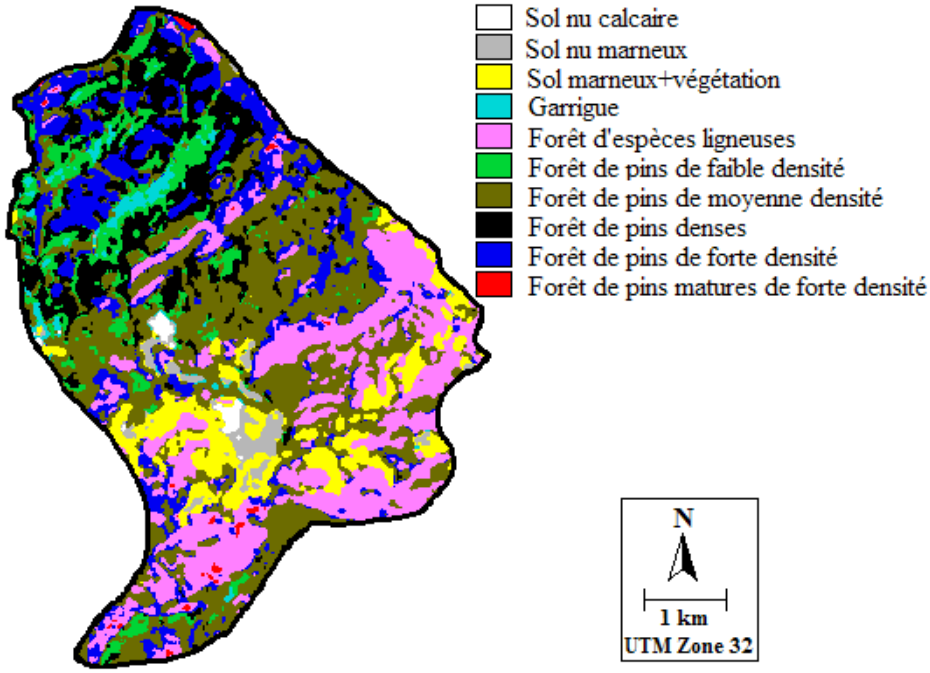


FIGURE 6 Classification dirigée de l'image SPOT-XS de 1996 utilisant la méthode du maximum de vraisemblance. Cette image classifiée est filtrée par un filtre de 3 x 3 uniquement pour la lisibilité de l'affichage. Supervised classification of the 1996 SPOT-XS image using the maximum likelihood method. The classified image is filtered with 3 x 3 filter for better legibility.

3.3 Analyses statistiques par ACP pour l'étude de l'inflammabilité

Tous les espaces végétalisés peuvent brûler un jour ou l'autre. Toutefois, la probabilité qu'un feu se développe est plus grande dans un peuplement qui présente une inflammabilité élevée que dans un autre à espèces moins inflammables. En effet, « l'inflammabilité qualifie la facilité avec laquelle les éléments fins d'une espèce végétale donnée prennent feu » (Trabaud, 1976). L'inflammabilité dépend de plusieurs paramètres extrinsèques des espèces comme la structure du couvert végétal, la biomasse, le phytovolume, etc. Elle dépend aussi des paramètres intrinsèques comme la teneur en eau, la composition chimique, etc. Dans notre recherche, on s'est intéressé au seul paramètre qu'est la structure physique du combustible pour déterminer l'inflammabilité des espèces et des formations végétales.

Nous avons opté pour l'application de la méthode statistique de l'analyse en composantes principales (ACP), qui vise l'exploration des relations existantes entre les variables étudiées. Il s'agit donc d'analyser les corrélations existantes entre les facteurs topographiques, les données structurales et les informations spectrales tirées de l'image ASTER.

3.3.1 Facteurs topographiques

Les facteurs topographiques, qui sont la pente et l'exposition, ont été déterminés à partir du MNA.

3.3.2 Données structurales de la végétation

Les données structurales de la végétation considérés ici sont le nombre de plants de pin d'Alep (l'espèce dominante), l'accroissement en hauteur de l'espèce dominante, l'accroissement en diamètre de l'espèce dominante, le recouvrement et l'indice d'inflammabilité « global ». En effet, cet indice est une variable qui a été estimée et déterminée par pondération en se basant sur les travaux antérieurs de Trabaud (1976) qui ont porté sur les espèces méditerranéennes (France) et le travail de Abdelmoula (2001) qui a porté sur les espèces du massif de Djebel Mansour, en Tunisie. En effet, d'après Abdelmoula, sur les trois espèces (*Erica multiflora, Rosmarinus officinalis et Pistachia Lentiscus*) et, selon leur composition en éléments fins, l'espèce *Erica multiflora* s'est avérée l'arbuste le plus dangereux sur le plan de l'inflammabilité. Viennent ensuite par ordre décroissant d'inflammabilité, le *Rosmarinus officinalis* et enfin, le *Pistachia lentiscus*. Ces trois espèces présentent un risque élevé d'éclosion d'incendie et donc toutes les trois sont dangereuses. Le travail de ce dernier s'est

limité à identifier au laboratoire la composition en éléments fins des espèces. L'indice d'inflammabilité spécifique n'a pas été déterminé pour chaque espèce. Nous nous sommes donc basés sur ses résultats pour traduire l'inflammabilité des espèces observées dans chaque placette en une valeur établie sur échelle cardinale. Par analogie aux travaux de Trabaud, qui a déterminé des indices d'inflammabilité variant entre 1 et 5, nous avons établi une échelle d'indice d'inflammabilité des espèces rencontrées sur notre site (figure 7). Les indices d'inflammabilité de l'Erica et celui du Ciste, espèce rencontrée également sur notre site et qui influence grandement l'inflammabilité des formations végétales, sont déjà définis. Les autres valeurs ont été affectées en se basant sur le classement relatif des espèces du point de vue de leur inflammabilité (tableau1).

D'autre part, on a tenu compte de la densité de l'espèce dominante au sein de chaque placette vu qu'elle influe également sur l'inflammabilité. Sur le tableau 2, on récapitule les informations prélevées pour chaque placette.

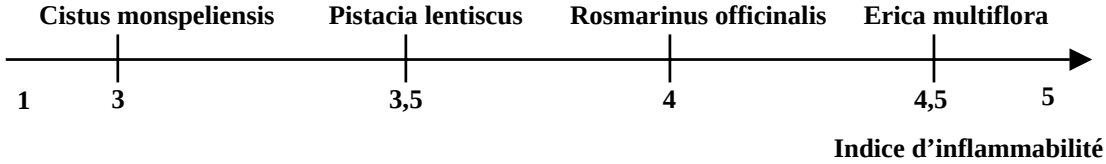


FIGURE 7 L'échelle des indices d'inflammabilité des espèces rencontrées sur le site d'Oum Laboueb ; *Pistacia lentiscus*, *Rosmarinus officinalis et Erica multiflora* sont les espèces arbustives accompagnatrices de l'espèce arborée dominante, le pin d'Alep, et le *Cistus monspeliensis*, espèce herbacée rencontrée sur le site. Cette échelle, variant entre 1 et 5, est établie sur la base des travaux antérieurs sur les espèces méditerranéennes. Les indices d'inflammabilité du Ciste et de l'Erica sont déjà définis et équivalent à I_{ciste} : 3 et I_{Erica} : 4,5. Les autres indices ont été affectés en tenant compte de l'ordre relatif des espèces du point de vue de l'inflammabilité. *Inflammability index scale of the species found on the Oum Laboueb site ; Pistacia lentiscus, Rosmarinus officinalis and Erica multiflora are the accompanying shrub spices of the dominant tree species, the Aleppo pine, and Cistus monspeliensis, grass species found on the site. The scale, varying between 1 and 5, was established on the basis of past work concerning Mediterranean species. The inflammability index of Ciste and Erica have already been defined and are equal to* I_{ciste}*: 3 and* I_{Erica}*: 4.5. The other indices were affected according to the order of inflammability of the various species.*

TABLEAU 1 Indices d'inflammabilité affectés aux espèces rencontrées sur le site d'étude. *Inflammability index according to the different species found in the study site.*

Espèces	*E. Multiflora*	*R. Officinalis*	*P. Lentiscus*	*C. Monspelliencis*
Indice d'inflammabilité *Ii*	**4,5**	**4**	**3,5**	**3**

L'indice d'inflammabilité « global », noté *Ig*, a donc été déterminé par combinaison des indices d'inflammabilité de chaque espèce végétale tout en tenant compte de leur densité, et d'un nombre n qui reflète la fréquence de l'espèce dominante selon la formule donnée par l'expression suivante :

$$Ig = n + \mathrm{S}\ PE \times Ii \quad (1)$$

Ig : indice d'inflammabilité globale
n : nombre de points ajoutés selon la densité de pin d'Alep
PE : poids de l'espèce
Ii : indice d'inflammabilité de chaque espèce

Il s'agit de faire une pondération, notée (PE), qui représente le poids de l'espèce, suivant son abondance.

1) pour le pin d'Alep (espèce dominante) : si le nombre de plants de pin d'Alep est inférieur à 25, on ajoute **n = 0 point** à l'*Ig* ; si 25 < nombre de plants de pin d'Alep < 50, on ajoute **n = 4 points** à l'Ig ; si 50 < nombre de plants de pin d'Alep < 75, on ajoute **n = 8 points** à l'*Ig* ; si le nombre de plants de pin d'Alep est supérieur à 75, on ajoute **n = 12 points** à l'*Ig* ;

2) pour les autres espèces : si le nombre d'individus est abondant (**), **PE = x 2** ; si le nombre d'individus n'est pas abondant (*), **PE = × 1**.

L'indice d'inflammabilité global Ig a été calculé pour chaque placette ; par exemple, l'Ig de la placette 1 a été calculé ainsi ;

Placette 1 : **0** + 4.5 **× 1**+ 4 **× 1** + 3.5 **× 1** = **12**

TABLEAU 2 Caractéristiques des placettes. *Plot characteristics.*

Placette	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Nombre d'individus de *P. Halepensis*	4	19	38	101	-	82	60	47	6	22	Quelq ues	Quelq ues	-	25
Accroissement en hauteur moyenne (cm)	95,4	187,7	142,3	185,7	-	205,5	152,5	136,6	129,2	144,5	-	-	-	157
Accroissement en diamètre moyen (cm)	5,35	7,85	7,14	6,59	-	8,41	7,7	5	9	8,5	-	-	-	8,05
Espèces accompagnatrices :														
E. Multiflora	*	*	*	**	*	**	**	**	*	*	**	**	*	*
R. Officinalis	*	**	**	**	*	**	**	**	**	**	**	**	**	*
P. Lentiscus	*	*	*	**	*	**	*	**	*	*	**	**	*	*
Diss	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Alfa Alfa	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Quercus Occifera	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Autres espèces:														
C. Monspeliensis	-	-	-	*	-	-	-	-	-	-	*	**	*	-
A. Hortensis	-	-	*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Arbutus Unedo	-	-	*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Callicotum	*	*	-	*	-	-	-	*	*	*	-	*	*	*
Olea	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	*	*	-	-
Phyllaria	-	-	-	-	*	*	*	-	-	-	-	-	-	-
Litière	-	-	Très mince	mince	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Très mince
Recouvrement (%)	25-50	50-75	50-75	>75	25-75	>75	50-75	50-75	50-75	50-75	50-75	>75	25-50	50-75

- : espèce absente | * : espèce présente et non abondante | ** : espèce présente et abondante

3.3.3. Informations spectrales

Il s'agit de déterminer les comptes numériques pour chaque placette dans les trois bandes spectrales de l'image ASTER de 2001.

4. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

4.1 Détection des zones brûlées

L'impact de l'incendie a été déterminé, en premier lieu, par le repérage des zones brûlées et l'estimation de leur surface à partir de données de télédétection. Ceci peut nous informer sur l'ampleur de l'incendie qui a ravagé le site. Pour cela, nous avons combiné et comparé l'information des deux images multidates HRV XS de 1988 (image acquise avant incendie) et HRV-XS de 1996 (image acquise huit ans après l'incendie). À cette date, on est sûr que la reprise végétale a eu lieu.

La superposition des deux classifications a généré une carte qui montre deux zones différentes (figure 8). La zone qui a brûlé et où les formations forestières qui existaient avant incendie se sont régénérées à différents stades de développement couvre 1 391 ha de superficie. Quant à la deuxième zone, celle qui n'a pas brûlé, à savoir les fermes privées, les zones réduites non incendiées au nord, nord-est et au sud du site et les clairières, ou qui a brûlé et qui s'est bien régénérée, couvre une superficie de 621 ha.

Le passage des feux a induit une transformation brutale qui a bouleversé le milieu et engendré un impact visuel sur le paysage. En effet, après l'incendie, il y a eu régénération des espèces et apparition de formations végétales qui ne présentent pas les mêmes stades de développe-ment.

Pour démontrer l'impact en termes de peuplements forestiers, nous avons combiné et comparé les classifications en présence. Le résultat est représenté sur la figure 9. Nous avons remarqué qu'il y a eu apparition de nouvelles classes de végétation dont la densité est variable selon les conditions du milieu après l'incendie, soit les conditions météorologiques, pédologiques et topographiques (essentiellement la pente et l'exposition du versant). Ces classes présentent les mêmes essences existantes avant le passage des feux, mais à différents stades de développement.
La reprise naturelle de la végétation est donc variable selon les espèces concernées et selon leur nature, essentiellement leur mode de reproduction, leur densité, leur recouvrement et l'intensité du feu (Cabaret-Lampin *et al*, 2000). Ainsi, l'impact du feu est variable selon son intensité et selon la richesse biologique de l'écosystème forestier.

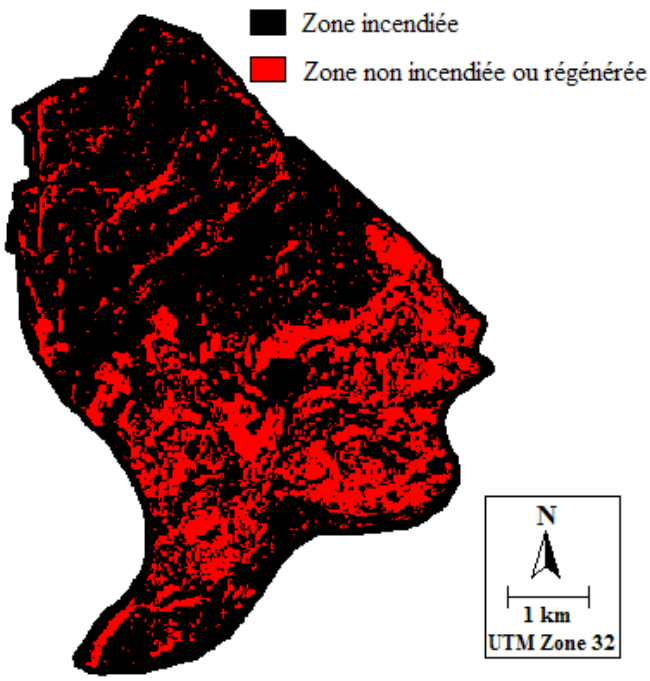


FIGURE 8 Cartographie des zones brûlées mettant en évidence l'ampleur de l'incendie. Il est bien clair que c'est essentiellement la partie nord et une partie du centre qui sont concernées par l'incendie. *Map of the burnt areas showing the extent of the fire. It is clear that essentially the northern part and a part of the centre area that are concerned by the fire.*

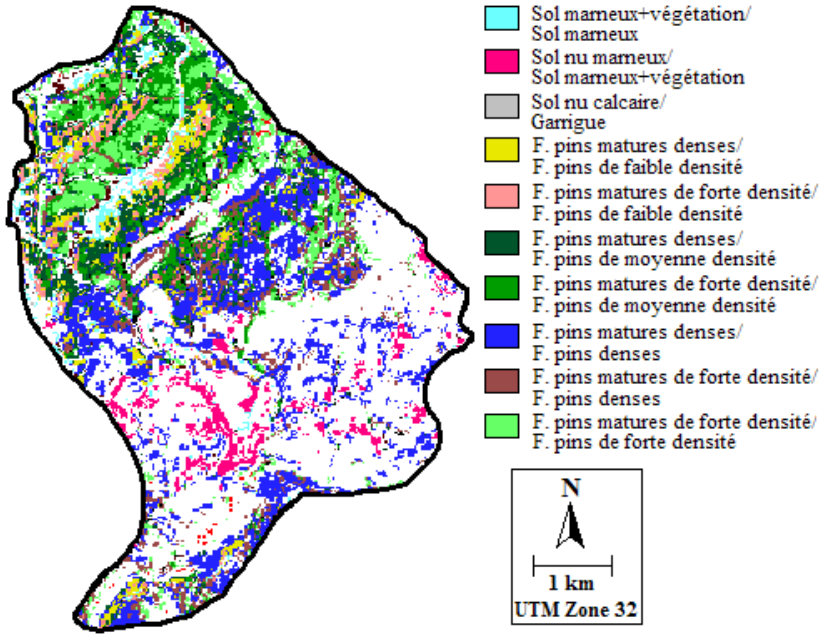


FIGURE 9 Cartographie de l'occupation du sol avant et après incendie. Cette carte montre uniquement les classes qui ont changé et qui ont été substituées. Les endroits où les classes n'ont subi aucun changement sont représentés en blanc pour que la carte soit plus représentative. *Map of the land use before and after the fire. The map shows only the classes that changed and that were substituted. Areas where classes did not incur changes are represented in white to make the map more legible.*

4.2 Étude de la régénération

Pour faire ressortir l'évolution de l'occupation du sol et suivre la régénération et la dynamique des communautés végétales après incendie, nous avons superposé en une combinaison multidate les classifications des deux images, l'image HRV-XS de 1996 et l'image ASTER de 2001. Le résultat est présenté sur la figure 10 et montre deux classes différentes. La première correspond aux zones qui ont subi d'importants changements, alors que la deuxième correspond aux zones à faible changement.

Pour faire ressortir le mieux possible l'évolution de la dynamique de la végétation, nous avons combiné et comparé les classifications réalisées et présentées auparavant (figure 11). Les deux états de surface déterminés auparavant ont montré une diversification de l'occupation du sol qui s'est produite après incendie. Cette diversification est en relation avec les essences présentes dès le départ sur le site et leurs caractéristiques comme la densité, le recouvrement, le mode de reproduction, d'une part, et les conditions topographiques, météorologiques et pédologiques du milieu, d'autre part. Nous avons remarqué que les changements ont affecté presque toutes les classes et qu'à certains endroits, il y a eu augmentation du nombre de classes de végétation, ce qui témoigne d'un développement important des essences, alors qu'à d'autres endroits, il y a eu diminution du nombre de classes ce qui peut être lié essentiellement au surpâturage ou à l'effet de concurrence entre les espèces. En effet, certains individus peuvent ne pas continuer leur développement sous l'effet de la concurrence, surtout lorsque le milieu n'offre pas de bonnes conditions.

Pour les sols, les changements ont affecté essentiellement les zones de sol marneux, où il y a eu un développement de la végétation. Ceci est normal compte tenu de la saison pendant laquelle l'image ASTER a été acquise (le mois de juin). Il y a donc eu un changement des sols nus marneux « 2 » en sols marneux + végétation « 3 ».

Sur le tableau 3, on met en lumière l'évolution de l'occupation du sol avant et après incendie. On y montre qu'il y a eu apparition de nouvelles classes de végétation et que les conditions du milieu ont favorisé l'augmentation de certaines classes et la diminution d'autres. Jusqu'à maintenant, 15 ans après l'incendie, les parcelles de pins d'Alep n'ont pas pu atteindre le stade de maturité. Ainsi, on démontre que l'écosystème forestier du pin d'Alep mérite une attention prioritaire parce qu'il est fragile et sensible aux conditions du milieu et aux conditions pédoclimatiques, surtout celles qui suivent l'incendie (Cemagref, 2003), et parce qu'il ne se régénère complètement qu'après une longue période.

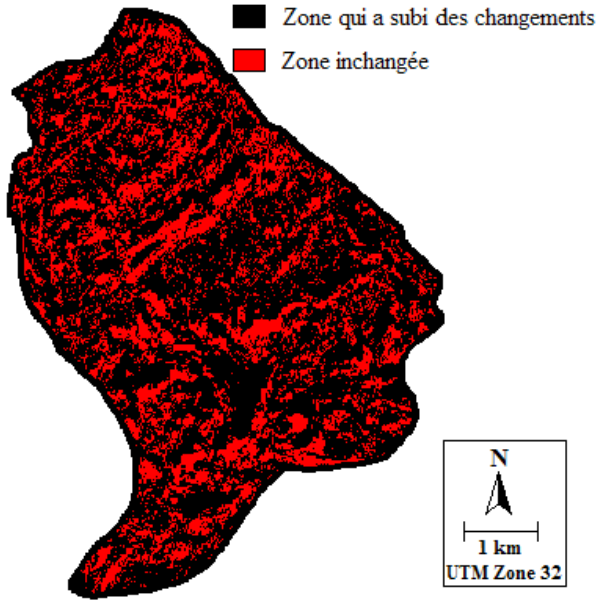


FIGURE 10 Cartographie de la régénération après incendie mettant en évidence la reprise naturelle de la végétation. *Map of the regeneration after the fire showing the natural regrowth of the vegetation.*

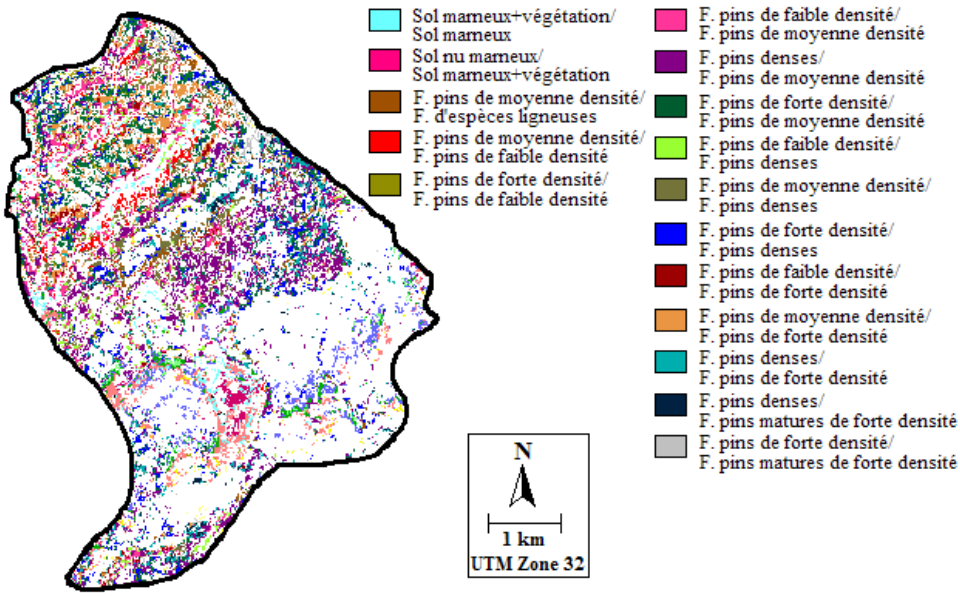


FIGURE 11 Cartographie détaillée de la régénération après incendie. Cette carte montre uniquement les classes qui ont changé et qui ont été substituées. Les endroits où les classes n'ont pas subi de changement sont représentés en blanc pour la lisibilité de la carte. *Detailed map of the regeneration after the fire. The map shows only the classes that changed and that were substituted. Areas where the classes did not incur changes are represented in white to make the map more legible.*

4.3 Étude de l'inflammabilité

Pour obtenir les résultats les plus discriminants et déterminer la relation entre l'indice d'inflammabilité global et les caractéristiques spectrales des différentes formations végétales, on s'est proposé de limiter les variables. Autrement dit, on utilise uniquement les données structurales et topographiques qui sont fortement liées et corrélées avec l'indice d'inflammabilité. Ces données sont l'accroissement en hauteur, le nombre de plants de pin d'Alep, le recouvrement et la pente. Sur le tableau 4, on récapitule toutes les données utilisées pour l'analyse statistique. D'après la matrice de corrélation (tableau 5), on constate que l'indice d'inflammabilité Ig est fortement corrélé négativement avec les caractéristiques spectrales dans les bandes B1 et B2 d'ASTER. La bande B3 (le proche infrarouge) présente une corrélation négative moins importante que celle des bandes B1 et B2. En général, c'est le rouge et le proche infrarouge qui caractérisent la végétation. Dans notre étude, la faible valeur de corrélation (Ig – proche infrarouge) est due principalement au nombre ainsi qu'à la taille des placettes qui n'est pas assez grand.

Deux composantes principales ont été mises en évidence avec un pourcentage d'informations qui est égal à 83,12 % (tableau 6).

Sur la figure 12, on présente la répartition des placettes contenant l'espèce dominante dans l'espace bidimentionnel formé par les deux composantes principales ACP 1 et ACP 2. L'ACP 1 caractérise les données structurales et topographiques du milieu, mais essentiellement l'indice d'inflammabilité « global », alors que l'ACP 2, elle, caractérise les données spectrales de l'image ASTER. En général, un alignement visible à l'œil nu indique déjà un niveau de corrélation assez important (Dion, 2000). Au niveau de l'image 12, le nuage formé par les placettes montre une droite qui n'est pas bien distincte, mais qui indique l'existence d'une corrélation négative assez importante. En effet, en regardant la droite qui passe par les deux placettes clefs de notre étude sur le terrain, la placette 1, la moins inflammable, et la placette 4, la plus inflammable, on remarque que la plupart (70 %) des placettes se répartissent autour de cette droite. Notre étude reste tout de même qualitative étant donné qu'on ne considère pas la droite de régression qui n'apporte pas d'information significative au niveau de l'inflammabilité.

La répartition obtenue autour de la droite choisie montre qu'il est possible de distinguer les placettes suivant leur inflammabilité. En effet, la placette 4, qui est très liée à l'ACP 1, représente la formation végétale la plus inflammable, alors que la placette 1, celle indépendante de l'ACP 1 et

fortement liée à l'ACP 2, représente la formation végétale la moins inflammable. Donc, au niveau de l'image, les pixels de faibles valeurs correspondent aux endroits de forte inflammabilité. D'autre part, on a pensé adopter une autre méthode qui fait intervenir l'information spectrale dans les deux canaux rouge et proche infrarouge. Il s'agit d'analyser la corrélation entre l'indice d'inflammabilité global et l'indice de végétation NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) dont la formule est la suivante :

$$NDVI = PIR - R / PIR + R \quad (2)$$

NDVI : (Normalized Difference Vegetation Index) indice de végétation
PIR : réflectance dans le proche infrarouge
R : réflectance dans le rouge

Cet indice est toujours compris entre – 1 et + 1 (Mooketsi, 2001).

Le choix des canaux rouge et proche infrarouge a pour but de mieux différencier la végétation des sols. Le NDVI a été calculé pour chaque placette (tableau 7).

On a remarqué qu'il existe une corrélation positive entre l'indice d'inflammabilité global et l'indice de végétation NDVI (figure 13). Cette corrélation positive présente un coefficient de corrélation important qui est égal à 0,86. Ceci valide les hypothèses émises au départ et qui concernent le nombre de plants de pin d'Alep et l'abondance des espèces accompagnatrices pour le calcul de l'indice de végétation. Le NDVI montre son intérêt et permet d'avoir une idée de l'inflammabilité des formations végétales.

En se référant aux développements théoriques et aux observations empiriques publiés dans la littérature (Carrière et Toutain, 1995), le NDVI est corrélé linéairement au pourcentage de recouvrement. L'étude menée dans cet article montre bien une forte corrélation entre l'indice d'inflammabilité global Ig et l'indice de végétation NDVI. Ceci ne nous permet pas cependant d'affirmer la forte corrélation entre le recouvrement et l'inflammabilité. En effet, en se posant une condition nécessaire qui n'est pas suffisante étant donné que l'Ig dépend de plusieurs facteurs tels que le nombre et la nature des espèces végétales, l'accroissement en hauteur des espèces etc., on observe le cas des placettes 2 et 4 qui présentent un important recouvrement (> 75%), mais dont les indices d'inflammabilité Ig dans ce cas sont différents avec un Ig faible égal à 16 pour la placette 2 et un Ig important égal à 39 pour la placette 4.

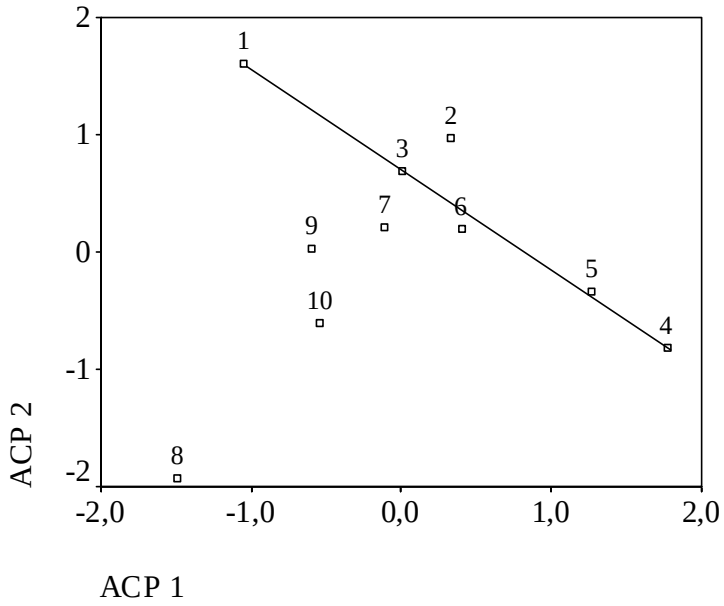


FIGURE 12 Représentation graphique des placettes dans l'espace bidimensionnel formé par les deux composantes principales (Composante 1, Composante 2). Les petits carrés représentent les différentes placettes contenant l'espèce dominante ; le pin d'Alep. *Graphic representation of the plots in 2D space formed by the two principal components (Component 1, Component 2). The small squares represent the different plots containing the dominant species ; the Aleppo pine.*

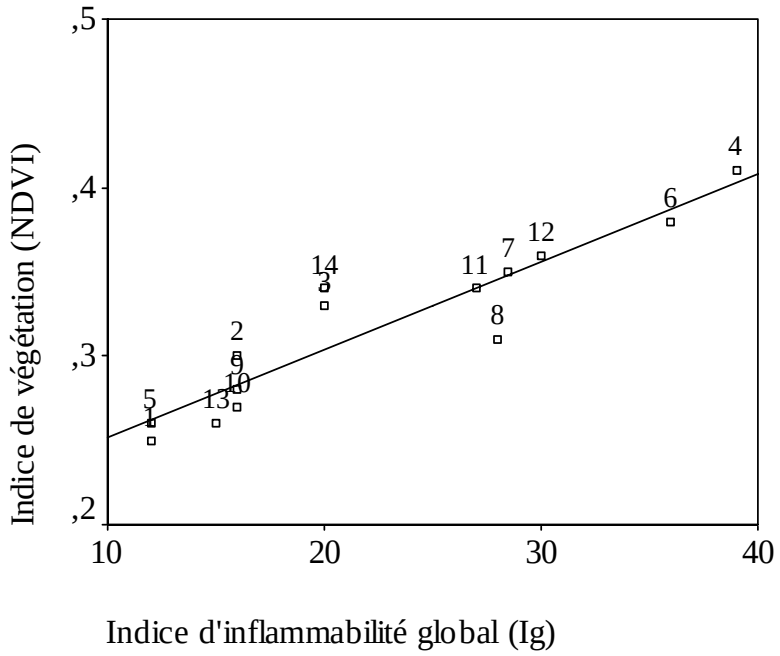


FIGURE 13 Corrélation entre l'indice d'inflammabilité global (Ig) et l'indice de végétation NDVI. Il est clair qu'il existe une forte corrélation positive avec un coefficient égal à 0,86. *Correlation between the global inflammability index (Ig) and the vegetation index NDVI. It is clear that there is a strong positive correlation with a coefficient equal to 0.86.*

5. CONCLUSION

Notre étude avait pour objectif d'étudier l'impact d'un incendie qui a éclaté dans les forêts tunisiennes en 1988 et d'aider à la cartographie du risque d'incendie au Djebel Mansour, sujet d'un projet de recherche commun sur les incendies de forêt, en étudiant l'inflammabilité des formations végétales. Il s'agissait donc de montrer la possibilité de déterminer les espèces inflammables à partir de l'imagerie spatiale.

La méthodologie proposée dans cet article a permis de caractériser l'état de l'occupation du sol avant et après incendie dans la forêt d'Oum Laboueb (Djebel Fkirin), en Tunisie. Cette méthodologie se base sur des classifications dirigées utilisant la méthode du maximum de vraisemblance sur des images multicapteurs selon une connaissance à priori du site d'étude. Cette information thématique sera utile pour toute étude d'aménagement du site et améliorera la base de données sur la région.

D'autre part, on a pu mettre en évidence qualitativement l'impact et l'ampleur de l'incendie par application des techniques de combinaison arithmétique et par comparaison des classifications unidates avant et après incendie.

L'originalité de ce travail réside dans l'évaluation de l'inflammabilité globale au sein de chaque formation végétale en se basant uniquement sur des indices d'inflammabilité déterminés dans cette étude, par simple affectation de valeurs en se basant sur des travaux antérieurs sur les espèces méditerranéennes. Ce résultat a été par la suite confronté avec les informations tirées des images de télédétection en vue d'explorer une relation permettant de déterminer les formations inflammables par simple traitement d'image satellite sans avoir recours aux techniques traditionnelles lourdes et coûteuses. La résolution des images utilisées était suffisante pour caractériser certaines formations végétales selon leur sensibilité aux feux ; par contre, les résultats pourraient peut-être encore être améliorés avec une résolution spatiale plus fine. De plus, l'indice de végétation NDVI s'est montré d'un grand intérêt dans l'étude et la cartographie de l'inflammabilité des formations végétales. Cette étude sera consolidée par l'utilisation d'images de haute résolution, par des campagnes de terrain plus poussées et des études biologiques visant la détermination des indices d'inflammabilité spécifiques pour chaque espèce en Tunisie.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier :

– l'AUF : cette recherche a été menée grâce aux appuis financiers de l'action de recherche n°2012 RR 306 du réseau Télédétection. Les partenaires de ce projet sont : l'Institut National Agronomique de Tunisie (INAT), l'Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts (INRGREF, Tunisie), l'École Nationale des Ingénieurs de Tunis (ENIT), l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL, Suisse) et l'Institut National de Recherche Agronomique d'Avignon (INRA Avignon)

– et la Direction Générale des Forêts et la Subdivision Forestière El Fahs de Tunisie pour tout le soutien qu'elles nous ont apporté.

Références

Abdelmoula, K. (2001) Caractérisation du combustible, dynamique d'embrousaillement et impacts écologiques du débroussaillement sur les coupures de combustible du massif de Djebel Mansour (Tunisie). Mémoire de DEA, Faculté des Sciences et Techniques de Saint-Jérôme, 44 p.

Blanchi, R. (2001) Contribution méthodologique à la conception d'une politique publique en matière de prévention des risques naturels. Application au plan de prévention des risques incendie de forêt. Thèse de doctorat, École des Mines de Paris, 200 p.

Cabaret-Lampin, C., Jappiot, M., Alibert, N., Manlay R. et Guillande, R. (2000) Prototype d'une échelle d'intensité pour phénomène incendie de forêt. Revue Ingénierie, Eau, Agriculture, Territoires n° 31/sept 02. Cemagref Éditions.

Carrière, M. et Toutain, B. (1995) Utilisation des terres de parcours par l'élevage et interaction avec l'environnement. Outils d'évaluation et indicateurs. CIRAD-EMVT, Montpellier, France.

Cemagref d'Aix en Provence (2003) La régénération naturelle du pin d'Alep après

incendie. Bulletin du Centre de documentation « forêt méditerranéenne et incendie », Info DFCI, juin 2003, n° 50.

Cohen, J. A. (1960) A coefficient of agreement for nominal scales. Educational and Psychological Measurement, 20, 27 - 46.

Dion, E. (2000) Introduction à l'analyse des données. Support de cours. AUDENCIA, 10 p.

Fourcade, J. (2001) Caractérisation de l'impact de l'incendie de forêt sur le cycle hydrologique et les processus associés. Cas du bassin versant du Rimbaud – Réal Collobrier. Rapport de thèse, École doctorale Terre, Eau et Espace de Montpellier, France.

Giraud, J. (2003) Les incendies de forêt. Journal de la FNSPF, 30 juillet, France, 1 p.

Mathsoft Inc. (1998) "S- Plus for ArcView GIS. Users Guide Version 1.0" and "S-plus Spatial Stat.", Data Analysis Products Division, Seattle, Washington, April 1998.

Mezned, N., Chakroun, H. et Boussema, M.R. (2003) Apport de la télédétection dans la gestion des géorisques: cartographie des incendies de forêt. Mémoire de DEA, Faculté des sciences de Tunis, 67 p.

Minvielle, E. et Souiah, S.-A. (2003) L'analyse statistique et spatiale, Éditions du temps, Boncamp-Lès-Laval, France, 284 p.

Missoumi, A. et Tadjerouni, K. (2003) SIG et imagerie Alsat 1 pour la cartographie du risque d'incendie de forêt. 2nd FIG Regional Conference, Marrakech, Morocco, December 2 – 5, 14 p.

Mooketsi, T. (2001) Application of SPOT 4 Vegetation imagery to predict the risks of winter bush fires and their impact on power lines. Disruptions in the eastern part of South Africa. Mémoire de DESS en Télédétection. Édition Toulouse, GDTA , 28 p.

Trabaud, L. (1976) L'inflammabilité et la combustibilité des principales espèces méditerranéennes. Oecologia plantarium, vol. 11, n° 2, p. 117-136.