Télédétection, 2005, vol. 5, n°(1-2-3), p. 161–181

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

TÉLÉDÉTECTION ET ANALYSE SPATIALE DE LA RÉGÉNÉRATION FORESTIÈRE POST-INCENDIE DANS LE MASSIF DE BOUKORNINE AU SUD DE TUNIS

ZOHRA LILI CHABAANE[a,1], HOUCINE BOUAFIF[a], ABDELHAMID KHALDI[b], HÉDIA CHAKROUN[b] et RÉGIS CALOZ[c]

[a] *Département génie rural des eaux et forêts (D/GREF), Institut national agronomique de Tunisie (INAT), 43, avenue Charles-Nicolle, 1082 Tunis Mahrajène, Tunisie. Téléphone : 216 98 526 744 ; télécopieur 216 71 799 391 Courriel (1) : chaabane.zohra@inat.agrinet.tn ou chebaane.faycal@planet.tn*

[b] *Unité de gestion et de valorisation des ressources forestières, Institut national de recherche en génie rural des eaux et forêts (INRGREF), B.P. 10, 2080 Ariana, Tunisie.*

[c] *LaSIG, Faculté environnement naturel, architectural et construit (ENAC), École polytechnique fédérale de Lausanne, CH-1015, Lausanne. Suisse.*

(soumis : 15 avril 2004 ; révisé : 26 mai 2004 ; accepté 31 août 2004)

Face à un espace forestier incendié, en plus de questions qu'un simple citoyen ou qu'un ingénieur forestier se posent, d'autres questions de type scientifiques surgissent, notamment : Comment se réalise la reconstitution du paysage forestier et à quel rythme ? Faut-il intervenir pour remodeler le paysage ainsi affecté ? Quelles interventions apparaissent prioritaires ? Faut-il prévoir des mesures de sécurité supplémentaires dans les zones incendiées pour éviter d'éventuels nouveaux événements ? Les réponses à ces questions sont étroitement liées entre elles ; elles nécessitent avant tout de disposer d'outils d'analyse et de suivi fiables permettant d'étudier et de quantifier la régénération forestière post-incendie. Ceci permettrait de mieux décider s'il faut intervenir pour remodeler le paysage affecté ou pour prévoir des mesures de sécurité supplémentaires. L'utilisation de données de télédétection multidates (images HRV XS de SPOT et Aster de Terra) combinées avec d'autres types de données concernant le milieu et la forêt incendiée paraît être prometteuse dans l'évaluation et la quantification spatiale et temporelle de la régénération post-incendie. Une analyse spatiale prenant en compte les caractéristiques du site de Boukornine (au sud de Tunis) incendié le 3 et 4 juin 1998, montre, qu'en plus de l'état de la végétation pré-incendie, les altitudes élevées défavorisent fortement la forte régénération, les régénérations moyenne et forte ont tendance à baisser quand la pente augmente, les zones qui ont mal régénéré prennent plus d'importance en proportion sur les terrains à pentes fortes et très fortes, les orientations est et sud-est semblent avantager les classes de forte et moyenne régénérations alors que la très faible régénération semble être en partie due aux orientations nord et nord-est.

Mots-clefs : télédétection ; régénération forestière post-incendie ; analyse spatiale.

REMOTE SENSING AND SPATIAL ANALYSIS OF POST FIRE REGENERATION IN BOUKORNINE FOREST IN THE SOUTH OF TUNISIA

When it comes to a burned forest area, besides the simple questions that a simple citizen or a forest-engineer may ask, several scientific questions are of current interest. The most importants are: How could the forest landscape be reconstituted and what is the pace ? Should we interfere to reshape the burned down landscape and where are the priority points ? Should we look ahead for supplementary safety-measures in the burned zones to avoid eventual future fire ? The answers to these questions are strongly inter-depended ; they require specific analysis tools and a reliable monitoring system in order to study and quantify the post fire forest regeneration. This would help decision makers to take the appropriate measures either by reshaping the burned landscape or by considering supplementary safety measures against forest-fire. The use of multitemporal remote sensing image (SPOT HRV XS and Terra Aster) combined with other types of data concerning both background and burned down forest appears to be promising in evaluating and spatial and temporal effects of post fire regeneration. A spatial analysis taking into consideration the characteristics of the burned down site of Boukornine in the South of Tunisia, allowed to better account new factors to explain the regeneration and its temporal and spatial variation : steep altitudes strongly disadvantage good regeneration ; average and high regenerations tend to drop when the slopes increases ; the zones which badly regenerated take more importance in proportion with strong and very strong slopes ; the Eastern and Southeastern aspects seem to favour the classes of strong and average regenerations whereas very weak regeneration seems to be partly due to the orientations North and the Northeast.

Keywords : Remote sensing ; post fire regeneration forest ; spatial analysis.

1. INTRODUCTION

Cette étude a pour but de montrer le potentiel d'utilisation des données de télédétection telles que des images HRV (XS) de SPOT, de résolution spatiale de 20 m, et des images Aster (B1, 2 et 3), de résolution spatiale de 15 m, dans l'évaluation et la quantification de la régénération post-incendie dans un contexte tunisien où la forêt, outre les conditions climatiques et écologiques propices aux incendies, subit une très forte pression humaine. En effet, 10 % de la population du pays vit en milieu forestier ou péri-forestier et en tire une bonne partie de ses ressources (Gader, 1999). D'autre part, le taux de boisement actuel de la Tunisie est l'un des plus faibles du bassin méditerranéen (8 % d'après DGF, 1995). Le contexte semi-aride de la Tunisie expose la forêt aux incendies causant des pertes de production, des dommages sur le milieu naturel et des impacts sociaux déplorables.

Par ailleurs, l'évolution d'un espace forestier incendié n'est pas unique. En effet, après un tel événement, plusieurs questions de type scientifique se posent, notamment :

– Faut-il intervenir pour remodeler le paysage ainsi affecté ? Quelles sont les interventions prioritaires ?

– Si, on laissait faire la nature, comment se déroulerait la reconstitution du paysage forestier et à quel rythme ?

– Faut-il prévoir des mesures de sécurité supplémentaires dans les zones incendiées pour éviter d'éventuels nouveaux événements ?

Pour répondre à ces questions, une analyse spatio-temporelle du paysage incendié est souhaitable, intégrant plusieurs facteurs du milieu, notamment le climat, l'orientation du terrain, la pente, la concavité/convexité de la pente, l'espèce forestière concernée, *etc*.).

L'utilisation de données de télédétection multidates, combinées avec d'autres types de données de diverses natures concernant le milieu et la forêt incendiée, ouvre des perspectives intéressantes pour la gestion de la régénération post-incendie. En effet, le développement de la télédétection et des systèmes d'information géographique (SIG) survenu au cours de ces dernières années a offert, aussi bien aux écologistes qu'aux gestionnaires, une opportunité pour l'évaluation, le suivi et l'analyse de la végétation. Les indices de végétation dérivés des données radiométriques de télédétection sont largement utilisés dans les programmes de surveillance de la dynamique de la végétation à l'échelle du globe. Le milieu forestier a grandement bénéficié de cette approche, tout particulièrement pour le problème traité dans cet article : la régénération des milieux forestiers après incendie. À ce propos, la plupart des études réalisées ont exploité des capteurs à haute et à très hautes résolutions spatiales, grâce à la qualité des images TM de Landsat-5, à partir de 1986. D'autres études ont utilisé également les données HRV (XS) de SPOT (Henry and Hope, 1998). Peu d'analyses ont été produites sur la base d'images hyperspectrales (Riâno *et al*, 2001).

Le NDVI (équation 1) (*Normal Difference Vegetation Index*), développé par Rouse *et al*., (1974) est, sans conteste, l'indice le plus utilisé dans diverses applications de la télédétection, y compris pour l'évaluation du processus de régénération post-incendie (Henry and Hope, 1998 ; Viedma *et al*., 1997) :

$$\mathrm{NDVI} = \frac{\mathrm{PIR} - \mathrm{R}}{\mathrm{PIR} + \mathrm{R}} \qquad (1)$$

D'autres indices, généralement dérivés du NDVI, ont également été exploités dans le même but. Ce sont notamment la différence normalisée entre les bandes TM4 et TM5 de Landsat (Marchetti *et al*., 1995) et le SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index)* (Huete, 1988).

Marchetti *et al*. (1995) ont analysé la régénération de la végétation post-incendie au moyen d'une simple comparaison en termes de structure des différences repérées visuellement sur une série chronologique d'images. D'autres auteurs ont utilisé non seulement les changements des indices de végétation post-incendie mais aussi la différence entre les indices pré- et post-incendie (Kushla and Ripple, 1998 ; Viedma *et al*., 1997 ; White *et al*. 1996).

Plusieurs relations ont été établies entre les indices établis à partir du traitement numérique des données images et le temps écoulé depuis le jour de l'incendie afin d'estimer la période nécessaire pour atteindre le stade de recolonisation de référence (pré-incendie). À cet effet, un autre indice a été dérivé de l'image de NDVI. Cet indice est appelé indice de régénération (RI : *regeneration index*) (Riano *et al*., 2001) ou indice de régénération normalisée (NRI : *normalized regeneration index*) (équations 2 et 3) :

– indice de régénération :

$$\mathrm{RI} = \frac{\mathrm{NDVI}_{\text{post-incendie}}}{\mathrm{NDVI}_{\text{pré-incendie}}} \qquad (2)$$

– indice de régénération normalisé :

$$\mathrm{NRI} = 1 + \frac{\mathrm{NDVI}_{\text{post-incendie}} - \mathrm{NDVI}_{\text{pré-incendie}}}{\mathrm{NDVI}_{\text{post-incendie}} + \mathrm{NDVI}_{\text{pré-incendie}}}$$

$$\text{Soit } \mathrm{NRI} = \frac{2\mathrm{NDVI}_{\text{post-incendie}}}{\mathrm{NDVI}_{\text{post-incendie}} + \mathrm{NDVI}_{\text{pré-incendie}}} \qquad (3)$$

où $NDVI_{pré\text{-}incendie}$ et $NDVI_{post\text{-}incendie}$ sont, respectivement, les indices de végétation normalisés pré- et post-incendie. Théoriquement, l'indice NRI devrait varier entre 0 et 1 ; la valeur 1 indique que le taux de recouvrement de l'état pré-incendie est égal au taux de recouvrement de l'état post-incendie. Nous proposons donc d'utiliser les indices NDVI et NRI pour étudier la variation spatio-temporelle de la régénération post-incendie sur le site incendié de Boukornine, en banlieue sud de Tunis et d'identifier les principaux paramètres explicatifs.

2. SITE D'ÉTUDE

Le 3 juin 1998, un incendie a ravagé plus de 2 000 ha de la plus belle tetraclinaie de Tunisie, qui occupe le massif forestier du djebel Boukornine, au sud de Tunis. La cause est probablement d'origine accidentelle survenue dans un champ de blé situé à proximité du massif forestier. Poussé par un vent chaud et sec du sud-est, le feu s'est propagé dans tout le champ puis a gagné rapidement la tetraclinaie avoisinante.

2.1. Localisation et limites géographiques

Située au sud-ouest du golfe de Tunis et à 18 km au sud de Tunis, la région étudiée est appelée en Tunisie le djebel Boukornine (figure 1). Se prolongeant dans la direction sud-nord, le djebel Boukornine constitue la terminaison nord de la Dorsale Tunisienne. Il se distingue facilement des zones avoisinantes grâce à son relief. En effet, ses limites géomorphologiques sont marquées par des contacts brusques avec la plaine côtière de Hammam Lif au nord. Le djebel Boukornine proprement dit, constitue l'élément caractéristique de la zone. C'est une montagne de forme ovale qui occupe le centre-nord de la région. Le point culminant (576 m) se trouve dans la partie méridionale.

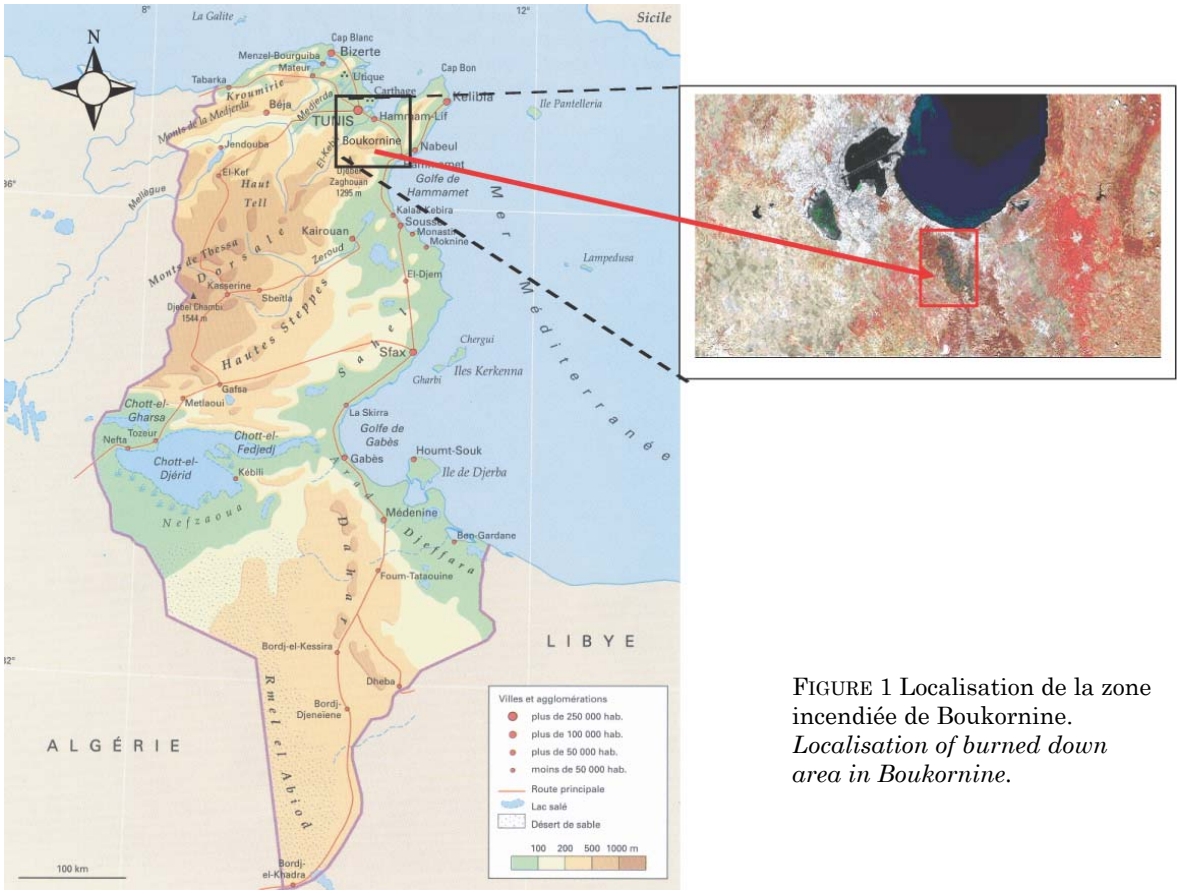


FIGURE 1 Localisation de la zone incendiée de Boukornine.
Localisation of burned down area in Boukornine.

2.2. Caractéristique de la forêt étudiée

Le site était occupé à l'origine par une forêt de thuya (*Tetraclunis articulata*) qui est une espèce endémique de l'Afrique du Nord. Le Thuya représente la deuxième essence résineuse de la Tunisie, après le Pin d'Alep (*Pinus halepensis* L.), tant par la surface qu'il recouvre, soit 32 884 ha de peuplements purs (DGF, 1995), que par sa rusticité et sa résistance aux facteurs de perturbation. Actuellement, en Tunisie, on le rencontre exclusivement au Cap Bon. L'association du Thuya est une association thermophile et xérophile qui se rapproche beaucoup de celle du Pin d'Alep. Généralement, la Lavande, le Ciste, le Philaire, le Romarin, le Calycotome, la Bruyère et le Lentisque forment l'essentiel des espèces que l'on retrouve dans toutes les tetraclinaies (Boudy, 1950).

Après incendie, la régénération du Thuya est surtout assurée par les rejets de souche qui donnent naissance à des taillis très denses, manifestant un grand risque d'inflammabilité en raison de la résine dont la plante est imprégnée (Boudy, 1950). À cause de cette propriété, la Direction générale des forêts en Tunisie a opté pour une régénération naturelle du Thuya sans reboisement.

La régénération du site incendié ne s'est pas produite de manière uniforme sur toute la zone, certaines parties présentant une végétation abondante, d'autres, au contraire, ne connaissant qu'un faible recouvrement. Une quantification de cette régénération et une identification des facteurs l'influençant permettraient d'apporter des éléments de réponse aux questions évoquées en introduction.

3. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Rappelons que le but de ce travail est d'évaluer et de quantifier la variation spatio-temporelle des changements à l'intérieur d'une zone incendiée au moyen d'une analyse diachronique de données de télédétection, couplées avec des observations sur le terrain, ainsi qu'au moyen d'une analyse de la régénération en fonction des caractéristiques topographiques du site et de l'état de la végétation elle-même pré-incendie.

3.1. Méthodologie et principe adoptés

L'étude du comportement au cours du temps de la signature spectrale d'un pixel traduit le principe de l'évolution spatio-temporelle de la régénération. En effet, l'analyse du comportement spectral de surfaces naturelles dans le proche infrarouge (PIR), en fonction de leur réponse dans le rouge (R) (figure 2), montre bien la position que prendrait un pixel en fonction de son recouvrement. En effet, immédiatement après le feu (année 0 : juin 1998), la végétation ayant disparu, le pixel se trouve sur la droite des sols. Au fur et à mesure que la régénération évolue vers une densification de la couverture végétale, le pixel correspondant s'éloigne de la droite des sols et se rapproche progressivement de la zone spectrale spécifique de la végétation verte.

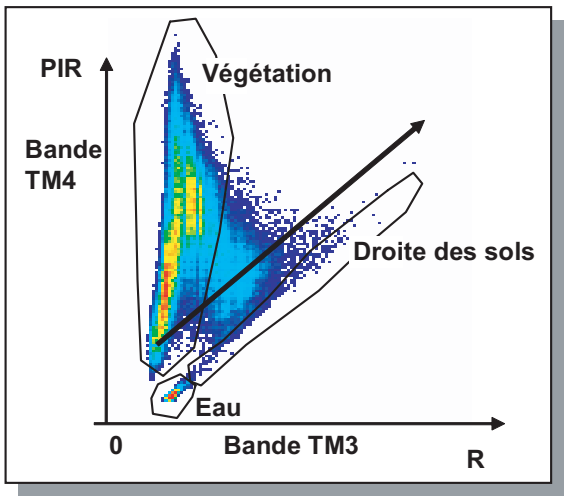


FIGURE 2 Relation entre les réponses spectrales d'une zone hétérogène observée en bandes TM3 (R) et TM4 (PIR). *Spectral-response relationship of heterogeneous zone viewed by TM3 and TM4 of LANDSAT.*

On rappelle que chaque point représente les coordonnées d'un pixel dans l'espace spectral formé par les bandes rouge et PIR. Chaque pixel appartenant à la zone incendiée va évoluer vers des situations que l'on résume en quatre catégories possibles :

– un fort déplacement du voisinage de la droite du sol vers la zone de végétation, lorsque la régénération se produit rapidement ;

– le pixel s'éloigne peu de la droite des sols et la régénération est, dans ce cas, très lente ;

– le pixel évolue dans une situation intermédiaire distante de la droite des sols sans toutefois appartenir à la zone de végétation et la régénération est alors qualifiée de moyenne ;

– le pixel reste sur la droite des sols, il y a, dans ce cas absence de régénération.

Comment caractériser cette dynamique de régénération ? La liaison entre végétation et signature spectrale du pixel sur le diagramme R-PIR nous autorise à exploiter des indices calculés grâce à ces deux bandes. Ces indices ou combinaisons de bandes sont très utilisés dans le cas d'une analyse diachronique, car ils permettent de s'affranchir en partie des problèmes atmosphériques liés surtout

aux variations de l'éclairement solaire entre les images de différentes dates (Robin, 1995). Nous testerons les possibilités offertes par les indices NDVI et NRI pour suivre et pour quantifier la régénération en combinaison avec des données de terrain.

3.2. Acquisition des données images

Pour des raisons pratiques, l'étude a été réalisée sur une image Aster de juillet 2002 et sur des images HRV(XS) de SPOT (octobre 1997 et mars 2000) (tableau 1).

TABLEAU 1 Caractéristiques des images exploitées pour l'étude. *Characteristics of the images used for the study.*

Images	Numéro de bandes	Domaine spectral (µm)	Résolution spatiale (m)	Dates acquisition
Aster de Terra	1 2 3	0,52 –0,60 0,63-0,69 0,78-0,86	15	Juillet 2002
HRV de SPOT	XS1 XS2 XS3	0,50-0,59 0,61-0,68 0,79-0,89	20	Octobre 1997 Mars 2000

3.3. Acquisition des données réalité de terrain

L'acquisition de données de réalité de terrain a visé deux objectifs : fournir les données nécessaires pour l'analyse de la dynamique de végétation et identifier des sites qui seront utilisés comme étant des sites d'entraînement lors de la classification des images satellitaires et des sites tests pour l'établissement de la matrice de confusion.

Deux campagnes de mesures sur le terrain ont été réalisées. La première, en 2000 soit deux ans après l'incendie, et la deuxième, en 2002-2003, soit environ quatre ans après l'incendie. Le suivi a été fait sur la base d'un réseau de 64 placettes réparties dans des zones homogènes (figure 3). En pratique, la forme d'une placette peut être circulaire, carrée ou rectangulaire. Cependant, pour diminuer l'effet de bordure, le choix de la forme circulaire est plus justifié car le cercle présente un périmètre minimal pour une surface donnée. La taille de la placette a été arbitrairement fixée à une surface de 200 m² soit un diamètre voisin de 16 m. La surface de chaque placette est inférieure aux surfaces des pixels des images utilisées, les résolutions spatiales des images utilisées étant, respectivement, de 15 et 20 m pour les images ASTER et HRV (XS). La surface des placettes est donc, respectivement, de 225 m² et 400 m². Cependant, nous avons veillé à ce que chacune des placettes soit noyée à l'intérieur d'une zone homogène pour qu'elle soit représentative.

Les mesures suivantes ont été réalisées sur chaque placette :

– densité d'individus de thuya régénérés par unité de surface ; les individus peuvent être les souches ou les rejets ;

– recouvrement, soit le pourcentage de la surface du sol recouverte si on projetait verticalement les organes aériens d'un individu sur le sol ; dans le cas de cette étude, le recouvrement est celui produit par la projection d'un bouquet formé par *n* rejets de thuya issus d'une même souche ;

– hauteur et circonférence des rejets de thuya ; on mesure la hauteur moyenne par bouquet de rejets, la hauteur moyenne par placette, la hauteur dominante par bouquet de rejets, la hauteur moyenne maximale des cinq plus hauts rejets, la hauteur dominante par placette et la circonférence moyenne à 30 cm.

Outre ces mesures, on a procédé à un zonage des groupements existant sur le site sur la base de la hauteur, de la densité et du recouvrement. Les groupements identifiés sur le site du djebel Boukornine sont :

– les garrigues hautes et denses : la contribution du Thuya à la couverture du sol est supérieure ou égale à 25 %, alors que le recouvrement total du sol par la strate moyenne est supérieur à 75 % ; cette catégorie se caractérise par son extrême densité atteignant plusieurs milliers de rejets à l'hectare et par sa hauteur moyenne relativement élevé (> à 1,5 m en moyenne) ; les rejets de souches sont qualifiés de vigoureux ;

– les garrigues hautes et peu denses : elles ne diffèrent de la première que par la densité et le recouvrement du sol par le Thuya compris entre 10 et 25 % ;

– les garrigues basses et claires : la strate arborée basse se trouve mélangée avec plusieurs autres espèces ligneuses (Romarin, Lentisque, Chêne kermès, *etc.*) ou herbacée (alfa, ciste, *etc.*) ;

– les garrigues dégradées : les formations se trouvant surtout sur des roches mères instables et ravinées ; les quelques sujets qui s'y trouvent prennent souvent une forme chétive.

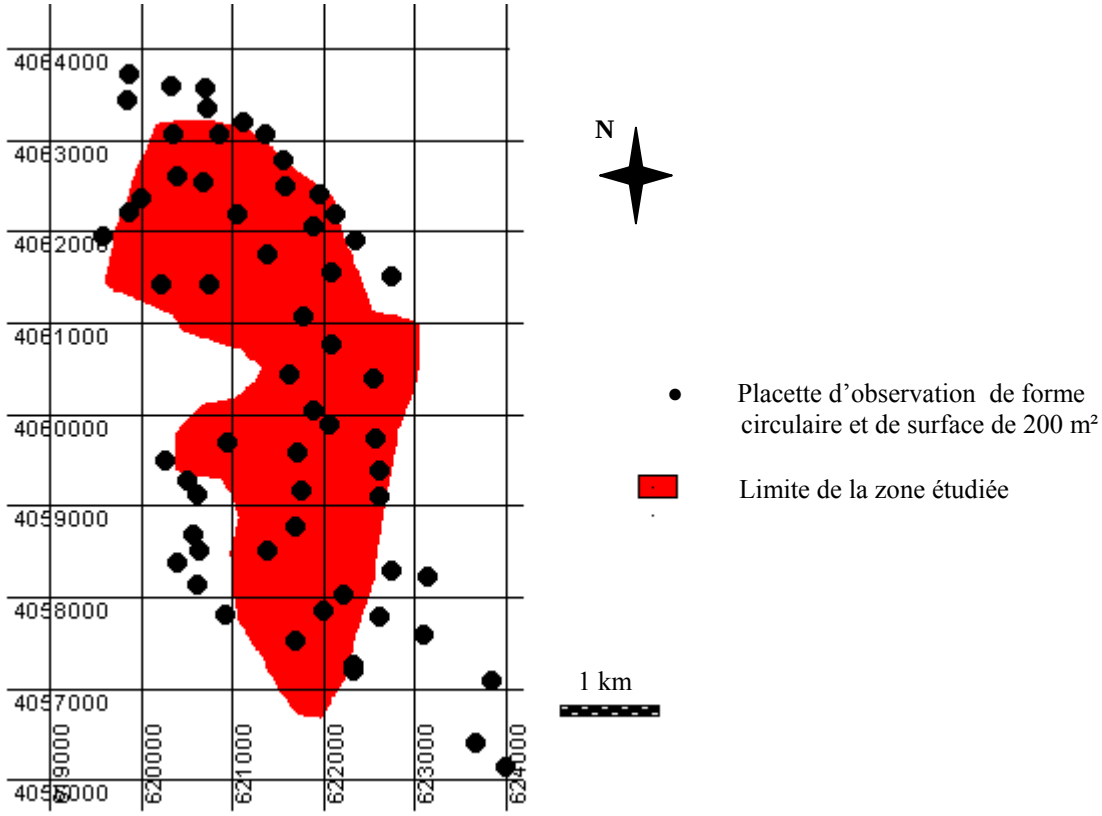


FIGURE 3 Localisation des placettes d'observation sur la zone d'étude. *Locate of observation point within study site.*

3.4. Acquisition d'autres données

Une base de données à référence spatiale a été conçue sur le site étudié ; cette base comporte, entre autres, les pistes forestières (obtenues à partir de l'interprétation visuelle au moyen des orthophotographies numériques au 1/20 000 d'une mission aérienne réalisée en 2000), le réseau hydrographique (extrait de la carte topographique au 1/25 000), les placettes d'observation dont les coordonnées centrales ont été levées par GPS type GARMIN (avec une précision sur la position de l'ordre de 7 m) et dont les attributs sont ceux mesurés sur le terrain, la géologie (obtenue à partir de la carte géologique au 1/50 000 de la Tunisie), le modèle numérique d'altitude (MNA) (obtenu par numérisation de toutes les courbes de niveau et des points cotés à partir de la carte topographique au 1/25 000 dont l'équidistance est de 5 m) et les caractéristiques topographiques du relief (pentes, orientations). Toutes ces données ont été, dans un premier temps, structurées en mode objet à l'aide du logiciel MapInfo, puis transférées en mode image dans le logiciel Idirisi32 pour l'analyse spatiale des différents facteurs.

3.5 Traitement des données

Les corrections radiométriques ont déjà été réalisées sur les images avant leur acquisition. Il a fallut donc, réaliser également leur géoréférencement dans le système de projection adopté par la cartographie tunisienne, soit la projection Universal Transverse de Mercator, WGS 84, zone 32, hémisphère nord.

Le calcul de l'indice NRI (équation 3) a nécessité de normaliser les images pré- et de post-incendie pour qu'elles aient le même nombre de lignes, le même nombre de colonnes et la même résolution spatiale. À cet effet, nous avons normalisé les deux images HRV de 1997 et de 2000 pour les trois bandes XS1, XS2 et XS3 par rapport à l'image Aster acquise en juillet 2002.

Rappelons par ailleurs, que la vitesse de reprise de la végétation post-incendie a été déduite à partir du comportement qu'aurait un pixel appartenant à la zone incendiée dans le rouge et le PIR (voir § 3.1) laisse à penser que le calcul et la

omparaison multidates des images de NDVI, basées sur l'utilisation de canaux rouge et PIR fournirait le même type d'information sur la vitesse de reprise de la végétation.

L'image NDVI (équation 1) a donc été réalisée pour toutes les dates disponibles en utilisant, bien entendu, les bandes XS2 et XS3 pour les images HRV de 1997 et de 2000 et les bandes 2 et 3 pour l'image Aster de 2002. Le logiciel utilisé pour le traitement numérique est Idirisi 32.

Dans la base de données géographique, les données de réalité de terrain obtenues en 2000 et en 2002 ont été structurées dans la table placette d'observation permettant d'apporter les informations nécessaires sur le taux de couverture forestière, sur son état et sur la vitesse de reprise de la végétation. Ces données ont servi à une vérification au niveau des images d'indices NDVI et d'indices NRI.

Par ailleurs, la disponibilité d'une base de données géographiques en mode image dans le logiciel Idirisi 32, a permis d'aborder une analyse spatiale de la variation de la vitesse de reprise de la végétation, d'une part, et de la régénération elle-même, d'autre part.

La disponibilité des grilles de l'altitude, de la pente, de la concavité-convexité et de l'orientation de la pente, a permis d'analyser les effets de ces facteurs topographiques sur la régénération et sur la vitesse de reprise de la végétation. Un rééchantillonnage a été également réalisée pour toutes les couches concernées, permettant de produire des grilles ayant le même nombre de lignes et de colonnes ainsi que la même taille de pixel.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

4. 1. Introduction

La synthèse bibliographique sur le Thuya (Boudy, 1950) montre que sa régénération post-incendie dépend des facteurs du milieu étudié (climat, topographie, pédologie, état et caractéristiques de la végétation pré-incendie, *etc*.).

Le site du djebel Boukornine étant caractérisé par une géologie et une pédologie assez uniformes ainsi que par le même type de climat, seuls l'état de la végétation pré-incendie et les paramètres liés à la topographie, sont donc utilisés dans la présente étude pour analyser la variation spatiale de la régénération.

4.2. Estimation de la surface incendiée

La délimitation de toute la zone incendiée a été faite par interprétation visuelle sur une composition colorée de l'image HRV(XS) SPOT de mars 2000 et comparée à l'image acquise pré-incendie d'octobre 1997. La surface incendiée le 3 juin 1998 est de 2 083 ha.

Pour notre étude et pour des raisons de disponibilité d'informations, nous n'avons traité qu'une partie de la zone soit une superficie de 1 177,5 ha.

4.3. Exploitation des images de NDVI

Les images de NDVI ont été réalisées pour l'image pré-incendie de 1997 et pour les images post-incendie de 2000 et 2002 (figures 4 à 6). Un simple examen visuel montre que la végétation sur le site tend à regagner et à se rapprocher de l'état de la végétation pré-incendie. La confrontation des résultats obtenus avec les données de terrain recueillies en 2000 et en 2002 nous a permis de constater que les valeurs élevées de l'indice NDVI correspondent à des garrigues hautes et denses dans 93,2 % des cas. Pour 1997, ne disposant pas de relevés de terrain, nous avons exploité la base de données de l'inventaire forestier et pastoral national réalisé en Tunisie en 1995 (DGF, 1995) et qui nous a permis de constater que les valeurs élevées de l'indice NDVI en 1997 sur le site étudié correspondent à des garrigues hautes et denses dans 89,3 % des cas.

La segmentation de ces images de NDVI permet de limiter le nombre de classes reflétant la dynamique de la régénération et de les interpréter plus facilement.

Par ailleurs, la segmentation des images de NDVI reflète les procédures suivies pour regrouper les pixels dans le but de former des zones pouvant être interprétées sous forme de classes thématiques. Dans cette étude, on s'appuie sur l'approche de segmentation dite pixel par pixel (Caloz et Collet, 2001). Dans ce cas, le regroupement se fait sur le seul critère de ressemblance spectrale entre les pixels. Deux pixels sont dits ressemblants si leur luminance spectrale respective s'exprime avec des valeurs proches et, dans ce cas, le zonage spatial n'est que le résultat du classement des pixels en catégories.

Dans cette deuxième partie d'analyse qui concerne l'analyse multidate d'un paysage incendié, on a eu recours à une segmentation des images d'indices. L'étiquetage des classes spectrales ainsi déterminées a été réalisé en lien avec les connaissances du milieu incendié acquises sur le terrain de manière systématique à partir de l'année 2000 (soit deux ans après l'incendie de juin 1998) et aux études faites sur la forêt de Boukornine ainsi que sur la base de l'inventaire forestier réalisé par la direction générale de forêts en 1995 (figures 7 à 9).

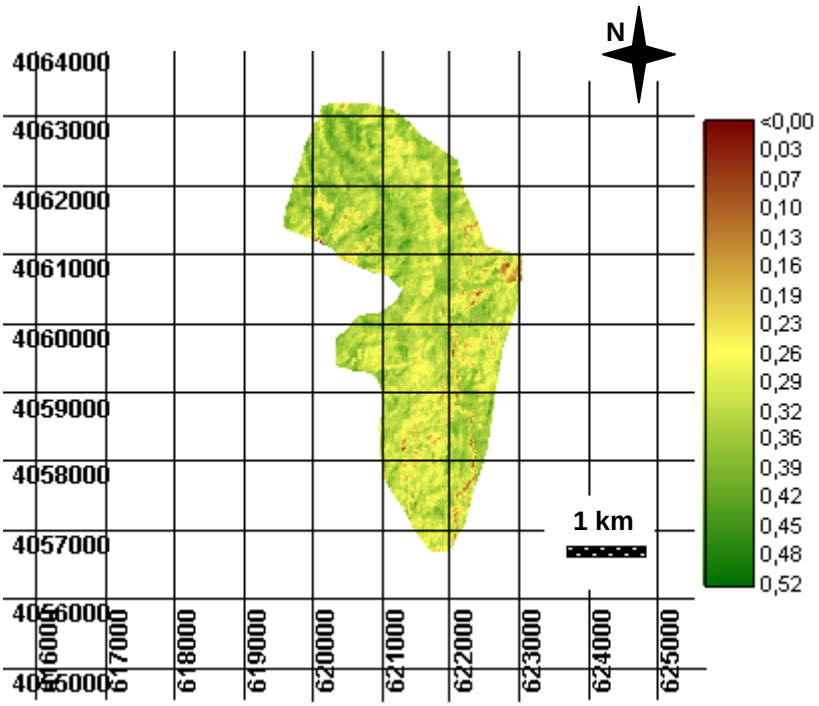


FIGURE 4 Image NDVI avant l'incendie à partir de l'image HRV (XS) de SPOT d'octobre 1997. *NDVI image before fire using SPOT HRV XS in October 1997.*

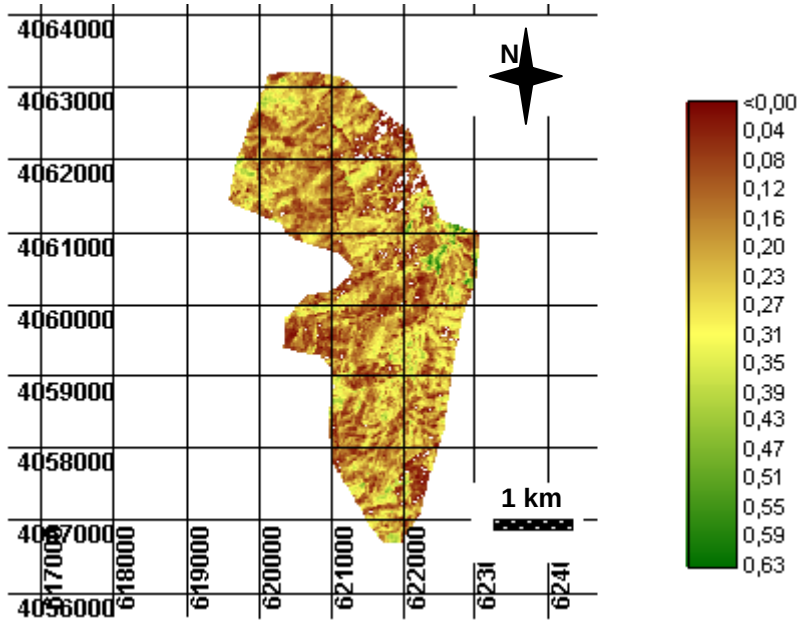


FIGURE 5 Image NDVI deux ans après l'incendie à partir de l'image HRV (XS) de SPOT de mars 2000. *NDVI image two years after fire using SPOT HRV XS in Mars 2002.*

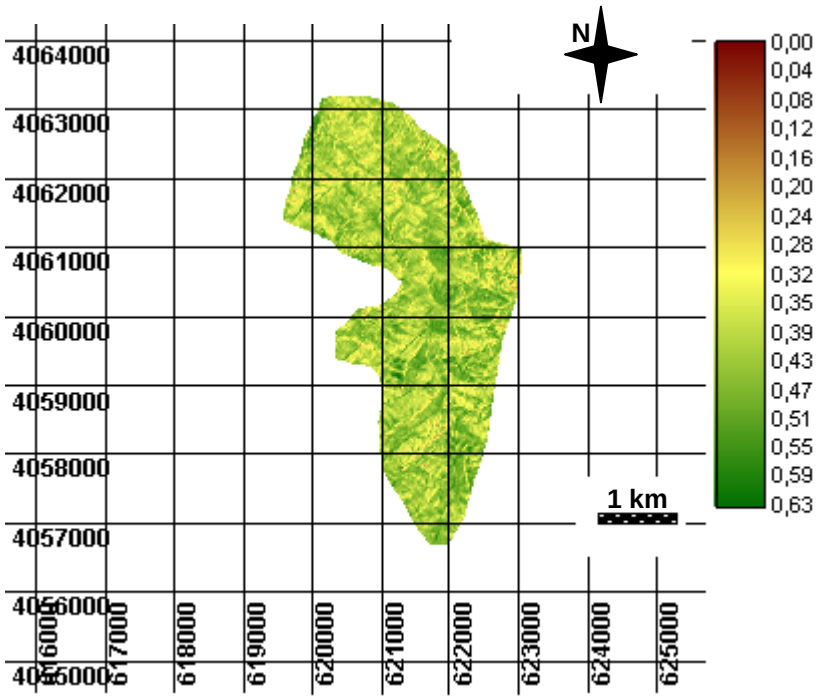


FIGURE 6 Image NDVI quatre ans après l'incendie à partir de l'image ASTER (B2 et 3) de juillet 2002. *NDVI image four years after fire using ASTER bands (B2 and 3) in July 2002.*

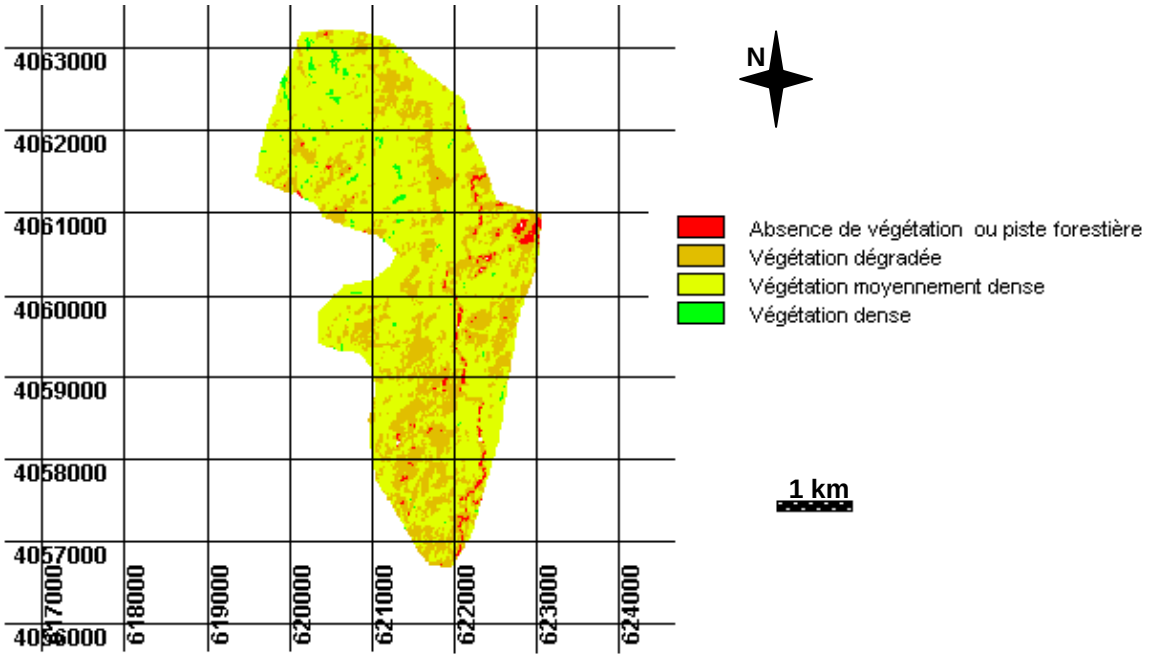


FIGURE 7 Segmentation de l'image NDVI de 1997 (avant incendie) à partir de l'image HRV (XS) d'octobre 1997. *Segmentation of NDVI image October 1997 (before fire) using SPOT HRV XS.*

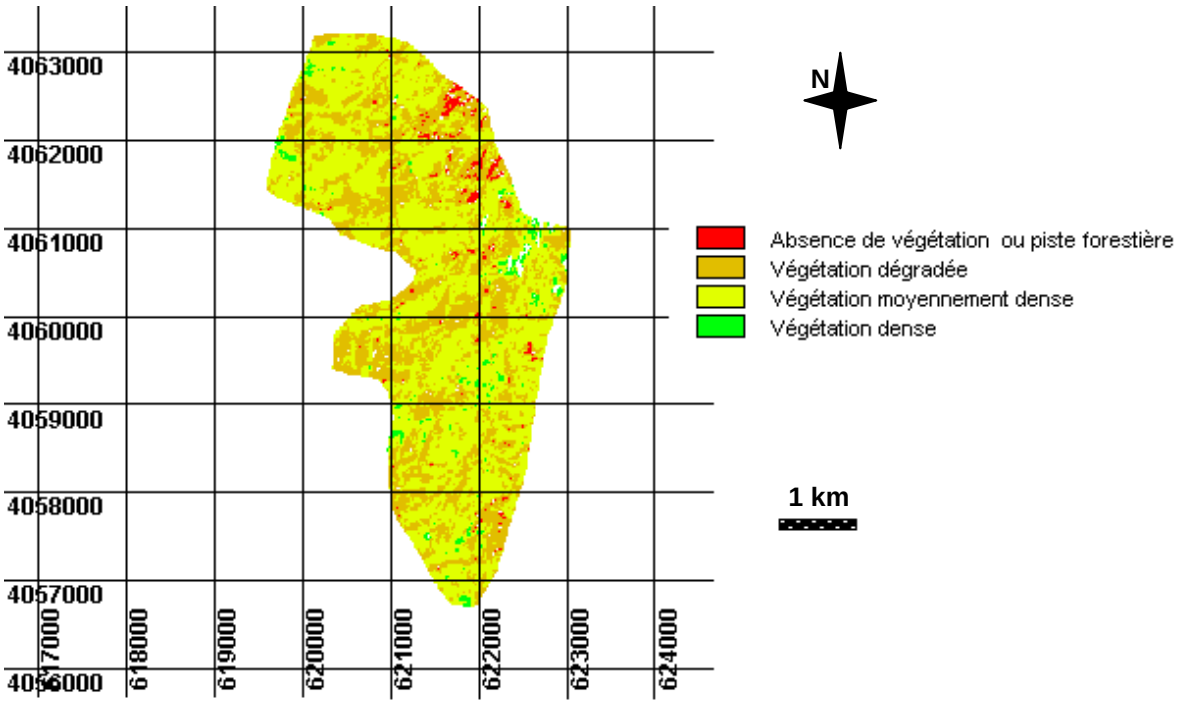


FIGURE 8 Segmentation de l'image NDVI de 2000 (deux ans après l'incendie) à partir de l'image HRV (XS) de SPOT de mars 2000. *Segmentation of NDVI image mars 2000 (two years after fire) using SPOT HRV XS.*

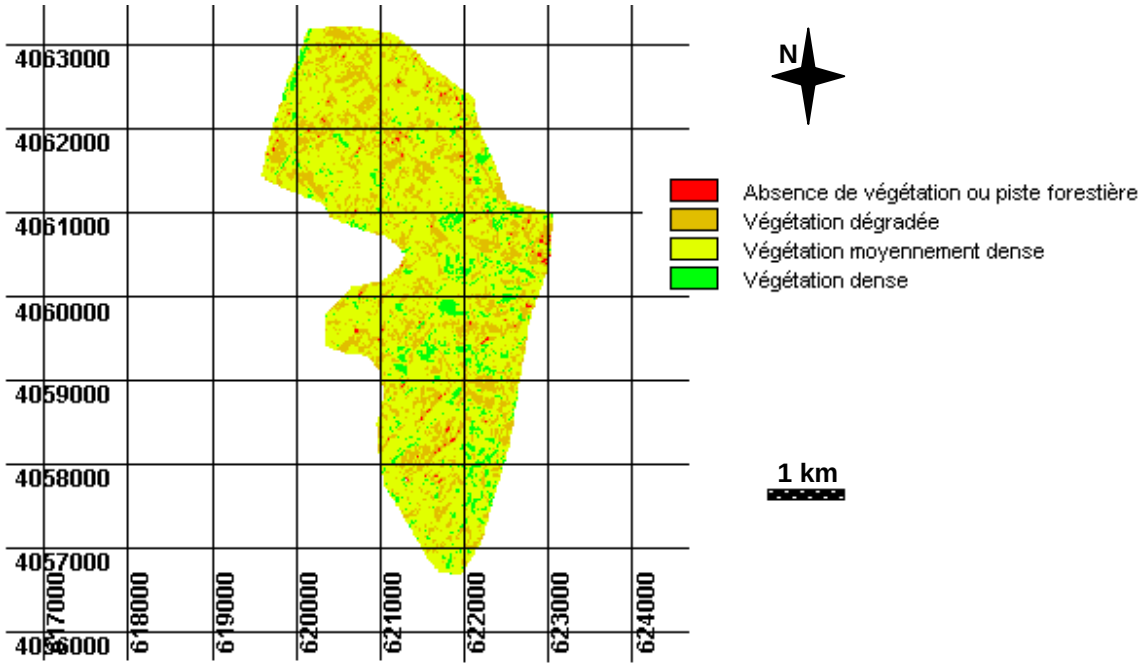


FIGURE 9 Segmentation de l'image NDVI de 2002 (quatre ans après l'incendie) à partir des bandes B2 et 3 de l'image ASTER de juillet 2002. *Segmentation of NDVI image July 2002 (four years after fire) using ASTER image bands B2 and 3.*.

Les résultats obtenus par segmentation de l'image de l'indice NDVI de 1997 font apparaître les pistes agricoles qui se distinguent bien du reste. Notons, qu'à cette même date, la majorité de la zone était occupée par une végétation moyennement dense. Après l'incendie, la décision a été de laisser faire la nature quelques années en attendant de voir ou bout de combien de temps le site retrouverait ses caractéristiques antérieures. Aucun aménagement n'a donc été réalisé sur la zone, pas même l'entretien des pistes forestières, si bien qu'en quelques années les pistes ont aussi été colonisées par de la végétation ; la classe 1 (absence de végétation ou piste forestière) n'existe que sur 6,8 ha, alors que cette même classe occupait 20,1 ha avant l'incendie. Pour l'année 2000 (deux ans après l'incendie), cette classe ne coïncide pas spatialement avec la même catégorie avant l'incendie, mais occupe des zones qui appartenaient à la catégorie de la végétation moyennement dense, soit celle qui n'a pas encore eu le temps nécessaire de se régénérer. Une étude sur l'effet de la pente, de l'orientation et de la concavité/convexité du terrain pourrait apporter des éléments d'explication et d'interprétation à cette dynamique.

Par ailleurs, on propose d'évaluer la reprise de la végétation par la superposition des images de NDVI segmentées d'avant incendie (1997) et 4 années plus tard. Ceci permettra en plus de mieux mettre en évidence l'effet de l'état de la végétation pré-incendie sur sa régénération post-incendie. On constate que toutes les catégories de végétation pré-incendie ont, en grande partie, évolué en végétation moyennement dense (les proportions varient de 61 % pour les sols nus à 72 % pour les sols qui étaient occupés par une végétation dense) (tableau 2).

De même, le regroupement de classes provenant de la superposition de l'image du NDVI de 1997 avec celle du NDVI de 2002 permet de limiter le nombre de classes et de les décrire par une vitesse de reprise de végétation plus au moins rapide (tableau 3). Sur ce tableau, on constate, entre autres, qu'un pixel ayant appartenu à une classe d'indice NDVI donnée en 1997, pourrait :

– évoluer dans la même classe après l'incendie (reprise moyenne) ;

– changer de classe et passer à la catégorie en dessous au point de vu densité de végétation post-incendie (reprise lente ou nulle) ;

– changer de classe et passer à la catégorie au-dessus du point de vue densité de végétation post-incendie (reprise rapide).

Cette classification permet d'évaluer de manière assez grossière la dynamique de la régénération dans le temps et de classer la zone d'étude en fonction de la vitesse de reprise de la végétation (figure 10, tableau 4).

4.4. Calcul de l'indice NRI

Rappelons l'équation (3) qui permet d'obtenir l'indice de régénération normalisé (NRI) :

$$NRI = \frac{2NDVI_{post\text{-}incendie}}{NDVI_{post\text{-}incendie} + NDVI_{pré\text{-}incendie}}$$

où $NDVI_{pré\text{-}incendie}$ et $NDVI_{post\text{-}incendie}$ sont respectivement les indices de végétation normalisés avant et après l'incendie.

Théoriquement l'indice NRI varie entre 0 et 1. La valeur 0 indique que le taux de recouvrement post-incendie est nul sans pour autant donner une indication sur l'état de la végétation pré-incendie. La valeur 1 indique que le taux de recouvrement de l'état pré-incendie est égal au taux de recouvrement de l'état post-incendie. Notons que, si le taux de recouvrement post-incendie dépasse celui pré-incendie, le NRI peut prendre des valeurs > 1.

Le calcul de l'image de NRI pour le site de Boukornine a été réalisé en utilisant l'image de NDVI pré-incendie de 1997 ainsi que post-incendie de 2000 (figure 11) et de 2002 (figure 12).

L'image de NRI obtenue pour l'état de la régénération en 2000 (figure 11) montre que presque la totalité de la zone incendiée exprime un indice NRI < 1, ce qui indique que le taux de recouvrement post-incendie est inférieur à celui pré-incendie. La végétation n'a pas encore eu le temps nécessaire pour atteindre un taux de recouvrement proche de celui pré-incendie. De plus, on remarque que rares sont les pixels qui ont un NRI > 1 ; ils sont d'ailleurs en majorité placés sur la piste forestière (figure 11).

Pour 2002 (figure 12), la majorité de la surface étudiée présente un NRI proche de 1, ce qui veut dire, que ces zones ont atteint un taux de recouvrement presque égal à celui pré-incendie. Les taches ayant un NRI > 1 sont devenues plus importantes en surface par rapport à 2000. En 2002, une surface plus importante présente un taux de recouvrement qui dépasse celui pré-incendie. Il s'agit essentiellement des pistes forestières et des zones qui étaient occupées par des clairières ou par une végétation dégradée. En effet, étant donné qu'aucune intervention n'a été faite sur le site après l'incendie, pas même l'entretien des pistes et des clairières, il y a eu une poussée de végétation dans ces zones, qui se traduit par un NRI > 1. Les relevés sur le terrain ont permis de confirmer ces observations. Une segmentation des images NRI permet de réduire le nombre de classes, de les interpréter et de mieux les comparer aux observations sur le terrain (figure 13 pour 2002).

TABLEAU 2 Proportion des différentes catégories de végétation post-incendie (en 2002) dans la forêt de Boukornine en fonction des catégories de végétation pré-incendie. Le tableau est obtenu par croisement d'images NDVI classifiées pré-incendie (HRV XS, octobre 1997) et post-incendie (Aster, bandes 1, 2 et 3, juillet 2002). *Cross tabulation of vegetation categories four years after fire (Aster, bands 1, 2 and 3, July 2002) and before fire (HRV XS, October 1997).*

	Absence de végétation (1997)	Végétation dégradée (1997)	Végétation moyennement dense (1997)	Végétation dense (1997)
Absence de végétation (2002)	0,01	0,01	0,01	0,01
Végétation dégradée (2002)	0,30	0,22	0,24	0,24
Végétation moyennement dense (2002)	0,61	0,69	0,68	0,72
Végétation dense (2002**)**	0,08	0,08	0,07	0,03

Tableau 3 : Regroupement de classes provenant de la superposition des images du NDVI pré-incendie (HRV XS, octobre 1997) et post-incendie (Aster, bandes 2 et 3, juillet 2002) en classes de vitesse de reprise de végétation. *Classes regrouping from superposition of NDVI image before fire (HRV XS, October 1997) and after fire (Aster, bands 2 and 3, July 2002) in classes of rapidity of vegetation regeneration.*

(i,j) : pixels appartenant à la classe i pré-incendie et à j post-incendie	Vitesse de reprise
(1,2) ; (1,3) ; (1,4) ; (2,3) ; (2,4) ; (3,4)	Reprise rapide
(2,2), (3,3) ; (4,4)	Reprise moyenne
(3,2) ; (4,2) ; (4,3) ;	Reprise lente
(2,1) ; (3,1) ; (4,1) (1,1)	Reprise nulle

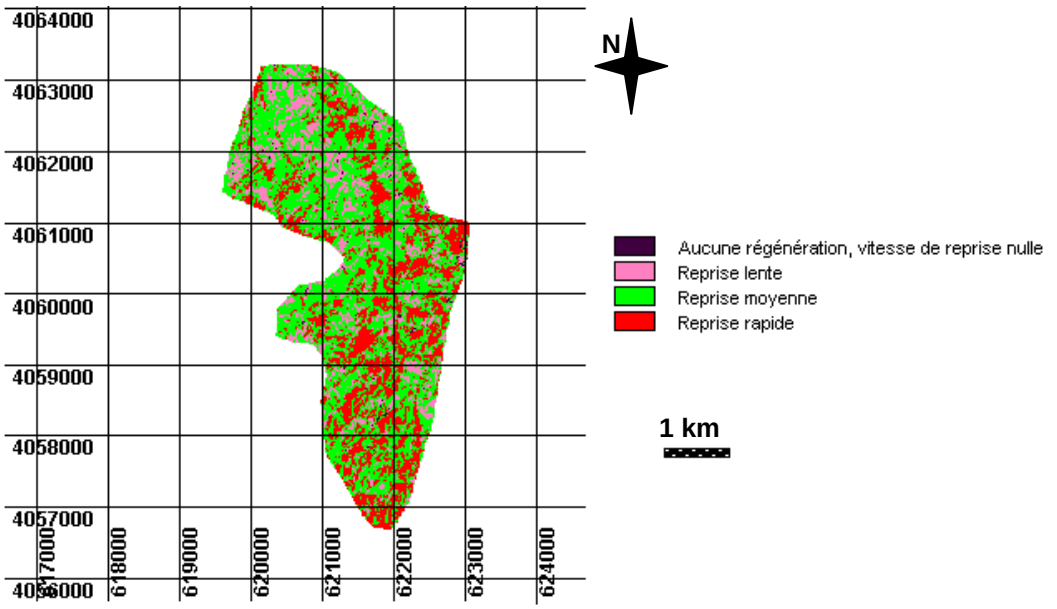


FIGURE 10 Classification en fonction de la vitesse de reprise de la végétation de l'image issue du croisement des deux images NDVI classée de 1997 et de 2002 respectivement avant l'incendie et 4 ans après. *Classification of regeneration speed obtained by cross classification of the two images ; classified NDVI 1997 and 2002, before and 4 years after fire respectively.*

TABLEAU 4 Surface obtenue pour chaque catégorie de vitesse de reprise de la végétation. *Area of each class of rapidity of vegetation regeneration.*

Catégorie	Surface (ha)
Aucune régénération	6,89
Reprise lente	208,21
Reprise moyenne	625,37
Reprise rapide	337,03

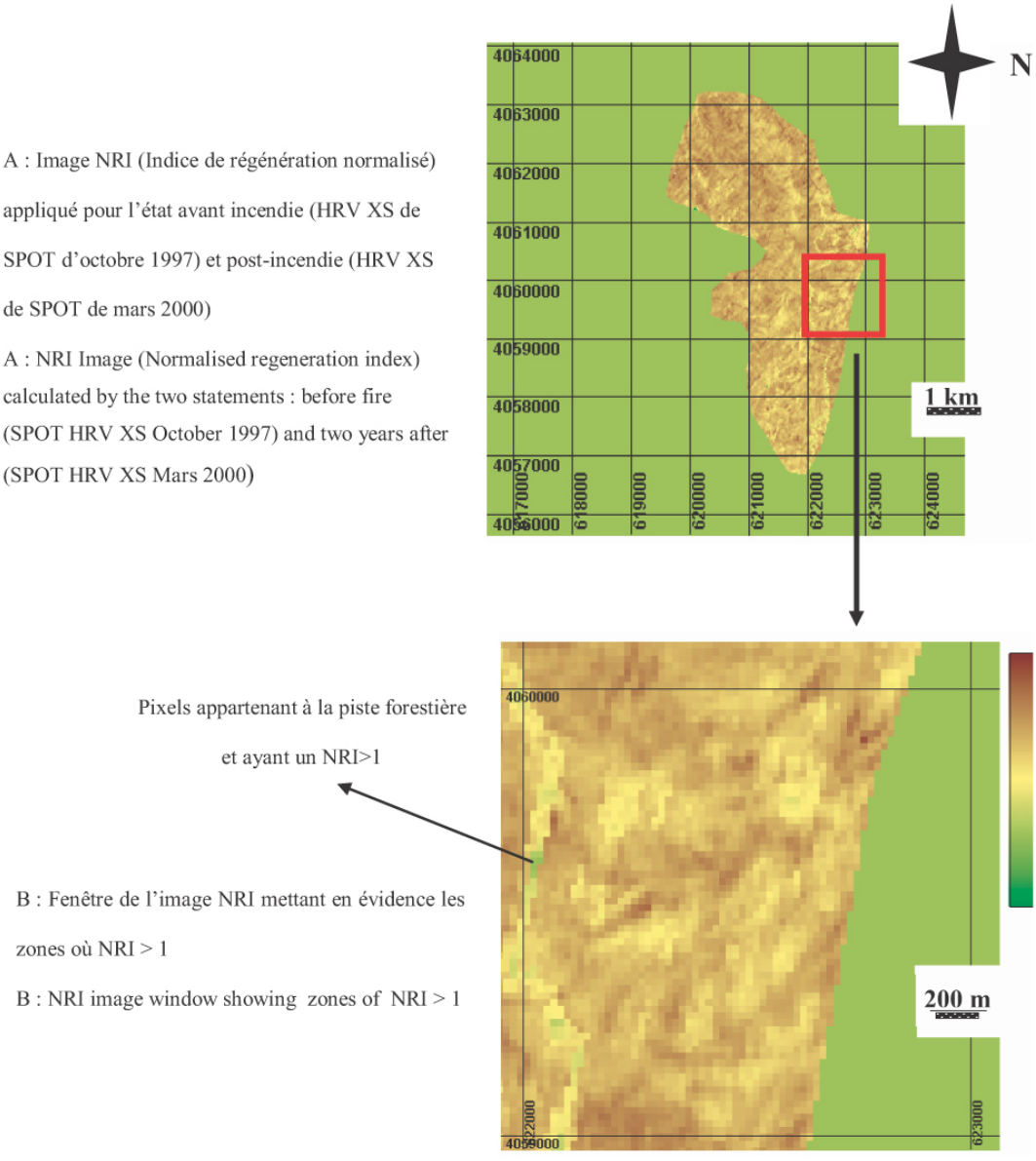


FIGURE 11 Mise en évidence des zones qui ont un NRI > à 1 deux ans après l'incendie. *Pointing out the zones of NRI > 1 two years after fire.*

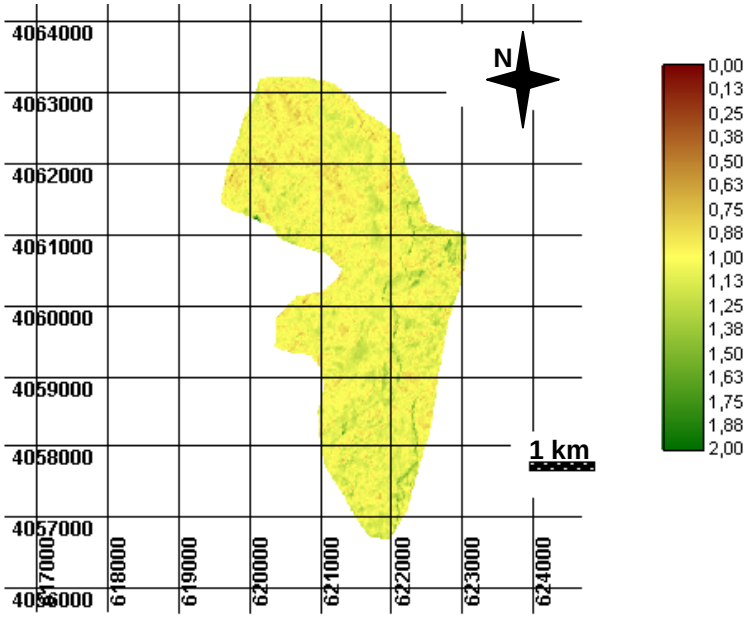


FIGURE 12 : Image NRI (indice de régénération normalisé) calculée pour l'état avant incendie (HRV XS de SPOT d'octobre 1997) et post-incendie (ASTER de juillet 2002). *NRI image calculated by the two statements : before fire (SPOT HRV XS October 1997) and post-fire (ASTER July 2002).*

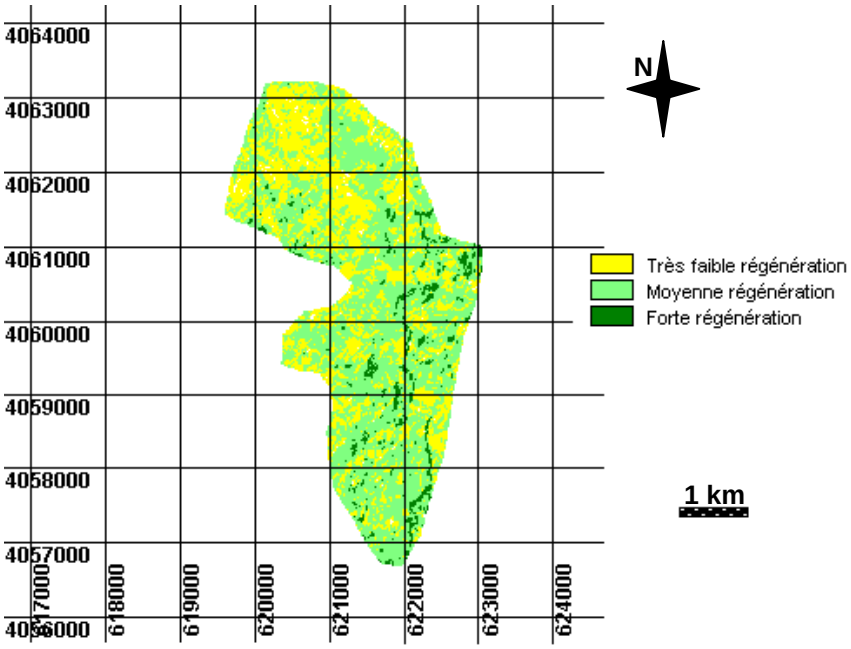


FIGURE 13 Image NRI (indice de régénération normalisé) classifiée et calculée par l'état avant incendie (HRV XS de SPOT d'octobre 1997) et post-incendie (ASTER de juillet 2002). *NRI image classified and calculated by the two statements : before fire (SPOT HRV XS October 1997) and post-fire (ASTER July 2002).*

4.5. Influence de la topographie sur la régénération post-incendie

Plusieurs travaux ont été réalisés sur l'influence de la topographie sur la régénération post-incendie. Nous présenterons ici une brève synthèse.

Les caractéristiques topographiques montrent que :

– la zone étudiée est en majorité à pente convexe (629,2 ha), soit 53,4 % alors que les terrains à pente concave représentent 548,4 ha soit 46,6 % ;

– la majorité de la zone étudiée connaît une pente forte (tableau 5) ;

– l'orientation est et l'orientation ouest caractérisent la majorité des terrains (tableau 6).

L'influence de la topographie sur la vitesse de reprise et sur la régénération elle-même (NRI) a été abordée par l'étude de distributions respectives de diverses classes de vitesse de reprise et aussi de classes de NRI par classe de paramètre topographique (pente, orientation et concavité/convexité de la pente).

TABLEAU 5 Répartition des surfaces en fonction de la pente du terrain naturel. *Slope area classes*.

Classe de pente (%)	Surface (ha)	% de la zone étudiée
Pente faible (0-10)	82,88	7,04
Pente moyenne (10-20)	360,27	30,60
Pente forte (20-30)	534,97	45,43
Pente très forte (>30)	199,36	16,93

TABLEAU 6 Répartition des surfaces en fonction de l'orientation du terrain. *Slope area orientation classes*.

Orientation	Surface (ha)	% de la zone étudiée
Nord	48,85	4,15
Nord-est	12,59	11,01
Est	268,57	22,81
Sud-est	174,27	14,80
Sud	66,26	5,63
Sud-ouest	115,15	9,78
Ouest	234,18	19,89
Nord-ouest	140,53	11,93

4.5.1. Influence de la topographie sur la vitesse de reprise ou de régénération de la végétation

À partir de l'étude de la vitesse de reprise (tableau 4) en fonction des divers paramètres topographiques, il est possible de faire cinq constats.

Un premier constat est que, du point de vue surface, la classe de reprise moyenne de la végétation est la plus importante pour toutes les catégories de classes de pentes, de classes d'orientations ou de concavité/convexité. De même, la classe de reprise rapide de la végétation occupe la seconde place pour toutes les catégories de pentes, d'orientation ou de concavité/convexité.

Un deuxième constat est que la classe de pente forte caractérise la majorité des surfaces dans chaque classe de reprise de la végétation, ce qui est en quelque sorte normal, puisque la majorité de la zone étudiée est caractérisée par une pente forte. Cependant, la pondération de ces pourcentages obtenus par les surfaces respectives des classes de pentes montrerait mieux l'effet de la pente sur la vitesse de reprise de la végétation (figure 14). Il s'avère que la reprise rapide de la végétation semble être avantagée par les pentes faibles à moyennes alors que la reprise moyenne de la végétation représente la catégorie la plus forte et a la même importance quelle que soit la classe de pente. La proportion de surface de reprise lente de la végétation est plus importante pour les pentes fortes. On peut donc affirmer que les zones à fortes pentes défavorisent la vitesse de reprise de la végétation.

Un troisième constat est que le même type de traitement vis-à-vis de la concavité/convexité de la pente du terrain montre que la vitesse de reprise de la végétation ne dépend pas de la concavité/convexité mais, au contraire, pour les deux catégories (concave ou convexe), toutes les classes de reprise de la végétation ont la même importance (figure 15).

Un quatrième constat est que la reprise rapide de la végétation semble être plus avantagée par les orientations est et sud-est, alors que la reprise moyenne de la végétation ne semble pas dépendre directement de l'orientation (figure 16). De même, le croisement de l'orientation avec la concavité/convexité confirme ce résultat. En effet, la reprise rapide de la végétation est avantagée pour les

terrains d'orientation est concave ou convexe ainsi que pour les orientations sud-est concave ou convexe (figure 17).

Un dernier constat concerne le lien avec l'altitude (figure 18).

En effet,

– la classe de reprise rapide de la végétation est nettement favorisée dans les zones de faible altitude (comprise entre 0 et 100 m)

– la reprise moyenne de la végétation occupe la même importance pour toutes les classes d'altitudes supérieures à 100 m ;

– l'absence reprise de végétation ne semble pas être reliée à la topographie.

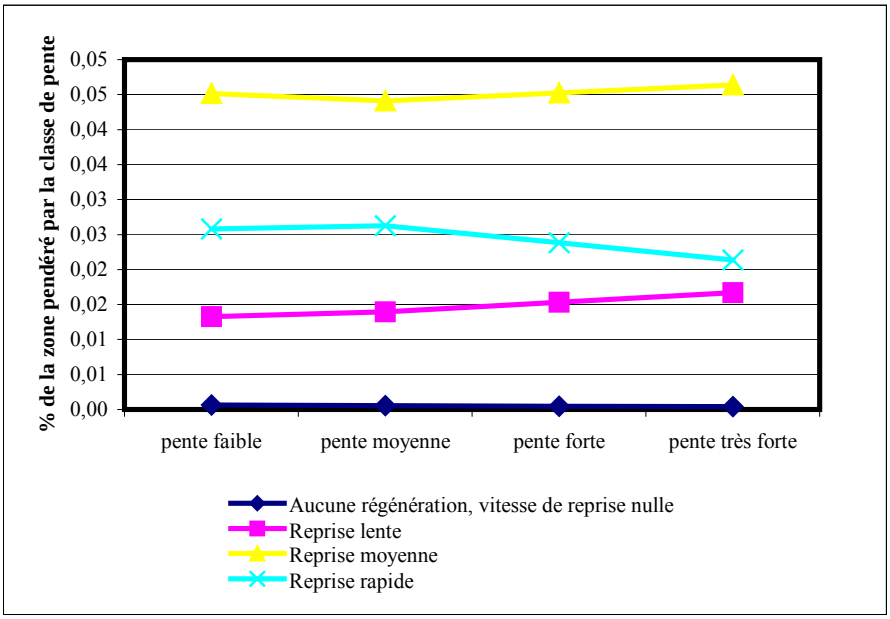


FIGURE 14 Effet de la classe de pente sur la vitesse de reprise. *Variation of regeneration speed in function of slope-class.*

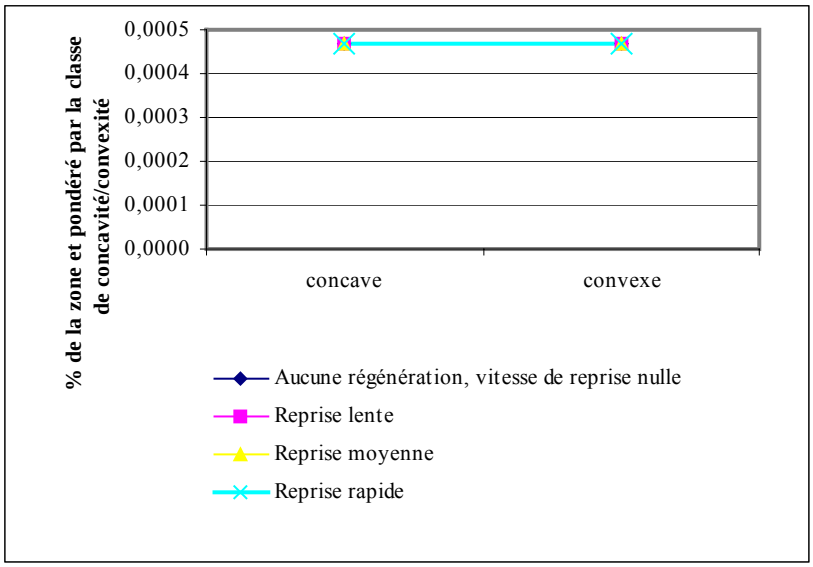


FIGURE 15 Effet de la concavité/convexité du terrain sur la vitesse de reprise. *Variation of regeneration speed in function of field concavity/convexity.*

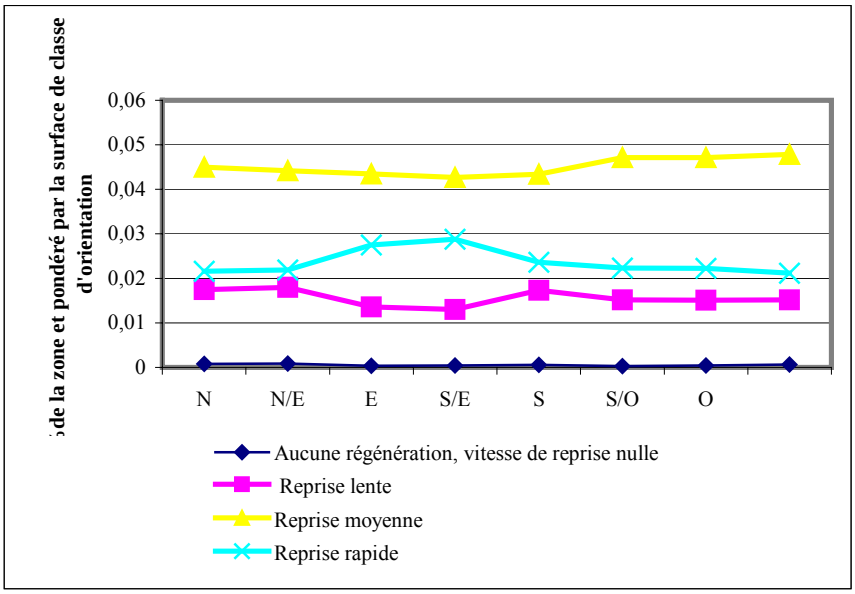


FIGURE 16 Effet de l'orientation sur la vitesse de reprise. *Variation of regeneration speed in function of field aspect.*

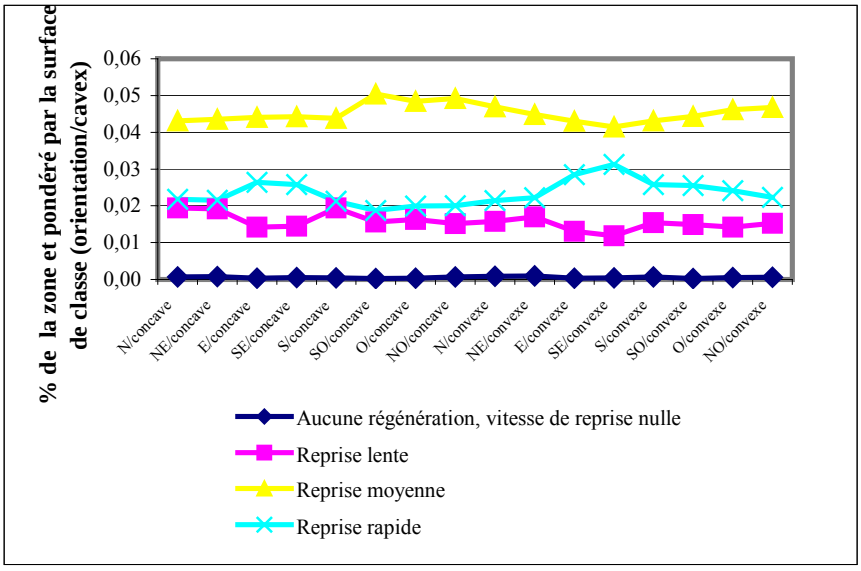


FIGURE 17 Effet de la combinaison de l'orientation et de la concavité/convexité sur la vitesse de reprise. *Variation of regeneration speed in function of both aspect and concavity/convexity.*

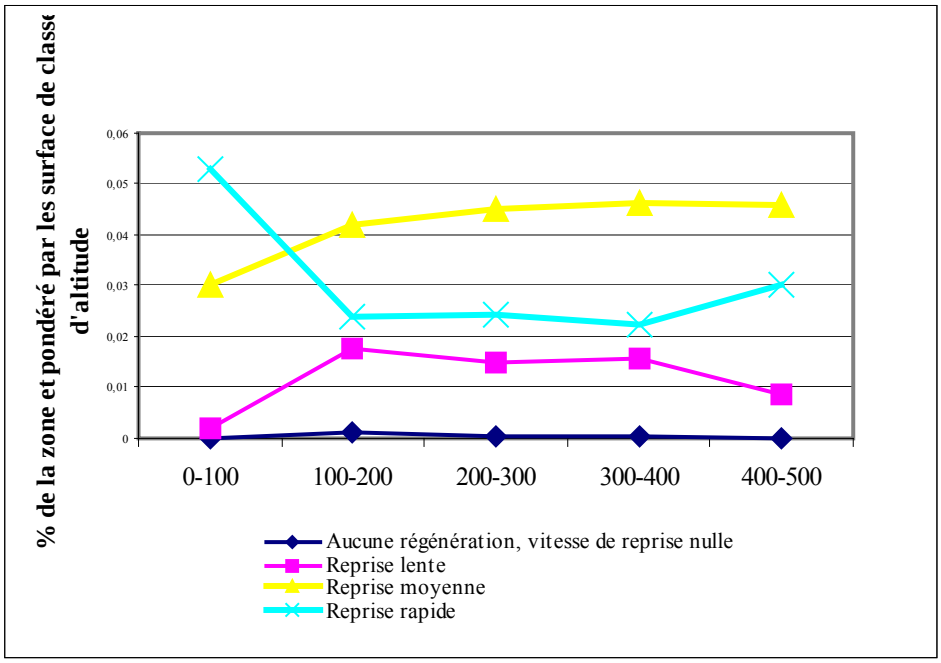


FIGURE 18 Effet de la classe d'altitude sur la vitesse de reprise. *Variation of regeneration speed in function of altitude-class.*

4.5.2. Influence de la topographie sur la régénération de la végétation

La valeur du NRI indique l'état de la végétation post-incendie en comparaison avec celui pré-incendie, la valeur 1 étant atteinte si l'état de la végétation post-incendie est similaire à celui pré-incendie (voir section 4.3.3). La variation du NRI en fonction des paramètres topographiques montre que :

– les régénérations moyenne et forte de la végétation ont tendance à baisser quand la pente augmente (figure 19) ; pour la très faible régénération de la végétation, les surfaces considérées sont plus importantes pour des pentes fortes à très fortes ;

– la concavité/convexité n'a pas d'effet significatif sur le NRI (figure 20) ;

– l'orientation est et sud-est semble avantager les classes de NRI de forte et moyenne régénérations de la végétation alors que la très faible régénération de la végétation semble être en partie due aux orientations nord et nord-est (figure 21) ;

– les altitudes élevées défavorisent beaucoup la forte régénération de la végétation (figure 22) alors que la régénération moyenne de la végétation prend plus d'importance quand l'altitude augmente.

5. CONCLUSION

Cette étude a permis de montrer les possibilités de l'utilisation des images HRV(XS) de SPOT et celles d'Aster pour le suivi et la quantification de la régénération forestière post-incendie au moyen d'images d'indice de NDVI (Rouse *et al.*, (1974) et d'images de NRI (Riâno *et al.*, 2001). La zone incendiée étudiée est une forêt de thuyas dans la banlieue sud de Tunis où le feu semble avoir stimulé la poussée de végétation à base des thuyas, Dans plusieurs endroits du site étudié, les mesures réalisées sur des placettes d'observation montre que la densité d'individus de thuya régénérés par unité de surface dépasse celle pré-incendie (état supposé être identique à celui de la date de 1995 de l'inventaire forestier de la Tunisie). Cette constatation confirme ce qui a été avancé par Boudy (1950) sur le pouvoir de régénération post-incendie du thuya.

Cependant, les données de terrain et de télédétection montrent que la régénération post-incendie est hétérogène à Boukornine. Elle semble non seulement être dépendante de l'état de la végétation pré-incendie, mais également de l'altitude, de la pente et de l'orientation du terrain naturel. En effet les altitudes élevées défavorisent fortement la forte régénération de la végétation. De même, le taux des régénérations moyenne et forte de la végétation a tendance à baisser quand

la pente augmente et la proportion des zones où la végétation s'est mal régénérée prennent plus d'importance sur les terrains à pentes fortes et très fortes.

Par ailleurs, les orientations est et sud-est semblent avantager les classes de NRI de forte et moyenne régénérations alors que la très faible régénération semble être en partie due aux orientations nord et nord-est. Quant à la concavité/convexité de la pente, elle semble n'influencer ni la vitesse de reprise ni le NRI.

L'effet des paramètres topographiques, ajoutés à l'état de la végétation pré-incendie, pourrait donc être appréhendé par une fonction du type R = f(V, P, O,Z), où :

– R : régénération ou NRI (obtenue par télédétection) ;

– V : état de la végétation pré-incendie (obtenue par télédétection) ;

– P : la pente ou la classe de pente ;

– O : l'orientation ou la classe d'orientation ;

– Z : l'altitude ou la classe d'altitude.

La suite de l'étude sera donc orientée vers la détermination de cette fonction régénération.

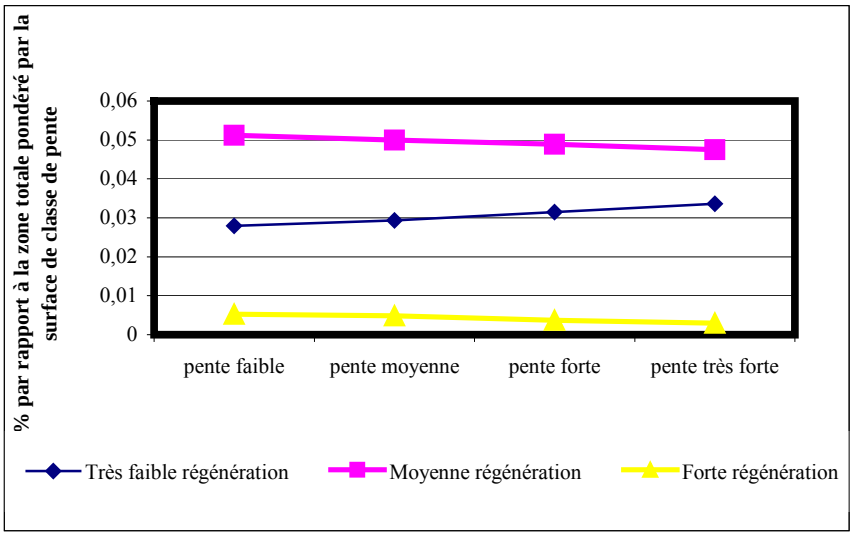


FIGURE 19 Variation du NRI en fonction de la classe de pente. *NRI variation in function of slope-class*.

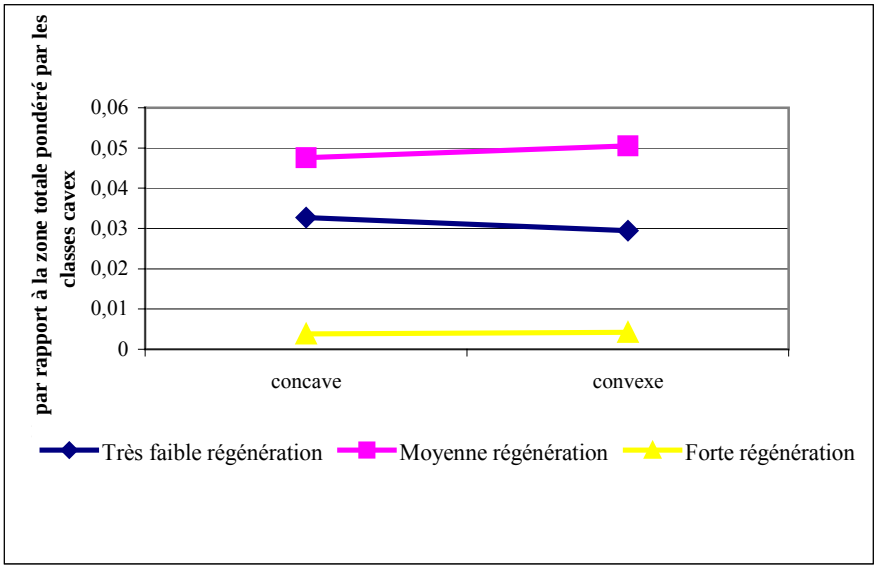


FIGURE 20 Effet de la concavité convexité sur le NRI. Figure 20. *NRI variation in function of concavity/convexity*.

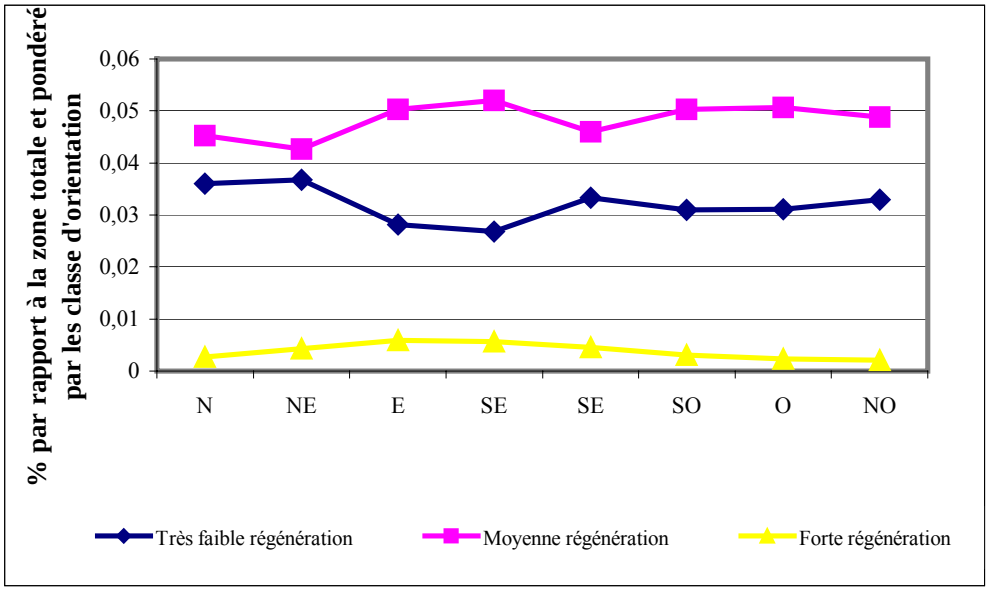


FIGURE 21 Effet de l'orientation du terrain sur le NRI. *NRI variation in function of field aspect*.

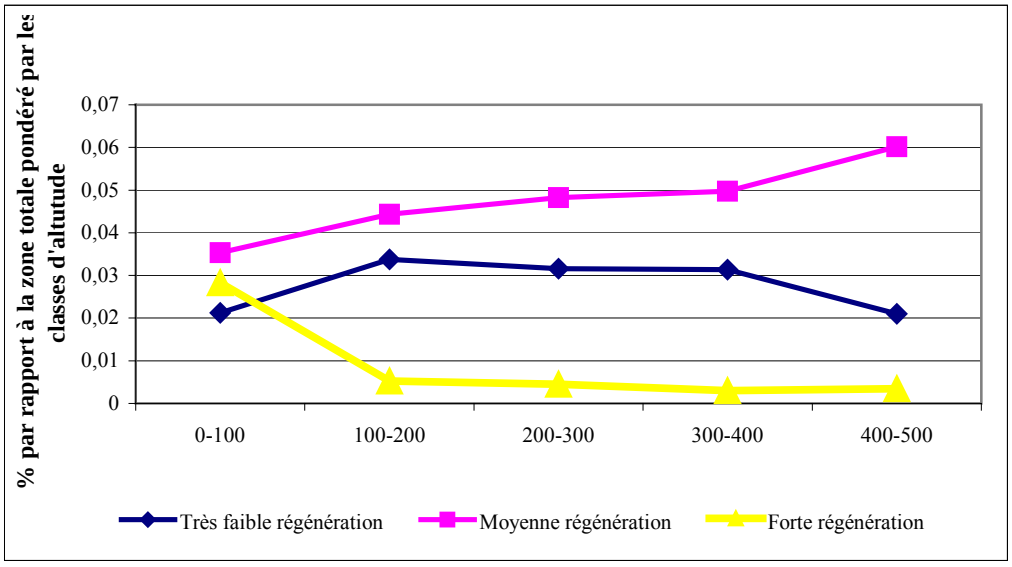


FIGURE 22 Effet de la classe d'altitude sur le NRI. *NRI variation in function of altitude-class*.

Remerciements

Nous tenons à remercier :

– l'Agence Universitaire Francophone qui a appuyé cette recherche par le financement de l'action de recherche du réseau télédétection n° 2012 RR 306 ;

– la Direction générale des forêts de la Tunisie pour tout le soutien qu'elle nous a apporté et plus particulièrement pour la mise à notre disposition des orthophotographies aèriennes numériques (mission de 2000) et de la base de données du premier inventaire forestier et pastoral national de la Tunisie de 1995.

– Les images ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflectance radiometer*) ont été gratuitement acquises sur le site web : http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome

Références

Boudy, P. (1950) Économie forestière Nord-Africaine. Vol. 2 : Monographie et traitement des espèces forestières. Fasc. 1, Éditions Larose, Paris, p. 122-134

Caloz, R. et Collet, C. (2001) Précis de télédétection, volume 3 : Traitement numérique d'images de télédétection. Presse de l'Université de Québec/AUF, Sainte-Foy, 386 p.

DGF (Direction générale des forêts de Tunisie) (1995) IFPN : Résultats du Premier Inventaire Forestier et Pastoral national en Tunisie. Publication officielle du ministère de l'agriculture tunisienne, 88 p.

Gader, G. (1999) Étude socio-économique des causes des incendies de forêts et d'une possible participation de la population à la prévention et la lutte contre les incendies de forêts. Projet FAO GCP/REM/056/FRA, Édition FAO, Rome, 45 p.

Henry, M.C. and Hope, A.S. (1998) Monitoring post burn recovery of chaparral vegetation in Southern California using multitemporal satellite data. International Journal of Remote Sensing, vol. 19, n°6, p. 3097-3107.

Huete, A.R. (1988) A soil–adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment, vol. 25, p. 295-309.

Kushla, J.D. and Ripple, W.J. (1998) Assessing wild fire effects with Landsat Thematic Mapper Data. International Journal of Remote Sensing, vol. 19, nº 13, p. 2493-2507.

Marchetti, M., Ricotta, C. and Volpe, F. (1995) A qualitative approach to the mapping of post fire regrowth in mediterranean vegetation with Landsat TM data. International Journal of Remote Sensing, vol. 16, n°13, p. 2487-2494.

Riâno, D., Chuvieco, E., Ustin, S., Zomer, R., Dennison, P., Roberts, D. and Salas, J. (2001) Assessment of vegetation regeneration after fire through multitemporal analysis of AVIRIS images in Santa Monica Mountains. Remote Sensing of Environment, n°79, p. 60-71.

Robin, M. (1995) La télédétection : des satellites aux systèmes d'information géographiques. Édition Nathan, Paris, 318 p.

Rouse, J .W., Haas, R.W., Schell, J.A., Deering, D.W. and Harlan, J.C. (1974) Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Greenwave effect) of natural vegetation. NASA/ Type – III Final report, Greenbelt (Maryland), 164 p.

Viedma, O., Melia, J., Segarra, D. and Garcia-Haro, J. (1997) Modelling rates of ecosystem recovery after fires using Landsat TM data. Remote Sensing of Environment, n°61, p. 383-398.

White, J.D., Ryan, K.C., Key, C.C.and Running, S.W. (1996) Remote sensing of forest fire severity and vegetation recovery. International Journal of Wildland Fire, vol. 6, n°3, p. 125-136.