



Suivi par télédétection de la dynamique de la végétation de Jbel Bil Lahrish un an après l'incendie de 2017 (Bizerte-Beja, Tunisie septentrionale)

Teledetection monitoring of the vegetation dynamic in Jbel Bil Lahrish one year after the 2017 fire (Bizerte-Beja, Northern Tunisia)

Brahim JAZIRI^{1*} & Najet BACCOUCHE¹

Abstract : The study of the vegetation behaviour after a fire by remote sensing is the objective of the present paper. The calculation of the Normalized Difference Vegetation Index (dNDVI) and the Difference Normalized Burn Ratio (dNBR) made it possible to map the severity of fires and vegetation dynamics after a fire that occurred from August 1st to 11th 2017, ravaging over 731.3 ha of forest. The results show a remarkable variation in the different indices according to a different chronology. A first sequence, one year after the fire, indicates a decreasing in the fire severity values. They reflect the recovery of flora in the calculation and mapping of the dNDVI. Hardwoods such as cork oak and eucalyptus regenerate quickly thanks to their protective bark. The regeneration strategies of its species are multiple. The burnt cork oak forest quickly recovered a floral composition thanks to its ability to regenerate through the production of rejuvenation and suckers or even through seedlings. One year after the fire, the structure of the cork oak forest is comparable to that which existed before the fire. Over 80% of the floral procession is present. The main species of the undergrowth, both filarial and mastic, have developed stumps of more than 60 cm high that develop fairly dense tufts. Pine forest, especially pinion pines, have a moderated or even stopped recovery, which appears in low NDVI values. The undergrowth accompanying the various formations plays a crucial role in sustaining biodiversity and conserving natural resources.

Key words : Natural hazard, forest fire, vegetation index, fire severity, vegetation regeneration, Jbel Bil Lahrish.

Résumé: Le suivi par télédétection du comportement de la végétation après un incendie est l'objectif du présent travail. Le calcul de la différence Normalized Difference Vegetation Index (dNDVI) et la différence Normalized Burn Ratio (dNBR) ont permis de cartographier la sévérité des feux d'une part et la dynamique de la végétation d'autre part après un incendie qui a eu lieu du 1^{er} au 11 août 2017 ravageant 731,3 ha de forêt. Les résultats obtenus montrent un changement remarquable des différents indices selon une chronologie différente. Une première séquence, un mois après l'incendie, révèle un type d'incendie à brûlure de forte à haute sévérité. Une deuxième séquence, un an après l'incendie, montre un affaiblissement dans les valeurs de la sévérité du feu. La reprise de la végétation un an après l'incendie trouve ses traces dans le calcul et la cartographie de dNDVI. Les feuillus, comme le chêne liège et l'eucalyptus se régénèrent rapidement grâce à leur écorce protectrice. Les stratégies de régénération de ces espèces sont multiples. La forêt de chêne liège brûlée a retrouvé rapidement sa composition floristique grâce à ses facultés de régénération par la production de rejets et de drageons ou même par les semis de graines. Un an après l'incendie, la structure de la forêt de chêne liège est comparable à celle qui existait avant le feu. Plus de 80% du cortège floristique est présent. Les essences principales du sous-bois, filaire et lentisque, ont développé des rejets de souche de plus de 60 cm de haut constituant des touffes assez denses. Les pinèdes, particulièrement celles de pins pignons, ont une reprise lente voire arrêtée, ce qui se traduit par des valeurs faibles de l'NDVI. Le sous-bois accompagnant les différentes formations joue quant à lui un rôle important dans le maintien de la biodiversité.

Mots-clés: Risque naturel, incendie de forêt, indice de végétation, sévérité des feux, régénération de la végétation, Jbel Bil Lahrish.

¹ Université de Tunis, Faculté des Sciences humaines et sociales, Département de Géographie.
Auteur correspondant : jaziribrahim@gmail.com

INTRODUCTION

Les incendies de forêt dans les régions montagneuses méditerranéennes constituent un risque naturel majeur. Ils représentent la première menace de la fragmentation des espaces forestiers et de la perte des habitats naturels et de la biodiversité. Les habitants vivants à l'intérieur des forêts ou à leurs lisières sont potentiellement exposés aux incendies. Il est important de rappeler qu'en Tunisie, le nombre d'habitants vivants dans le domaine forestier est de 750.884, dont 28.759 vivants à l'intérieur des forêts et le reste à un rayon de 5 kms de celles-ci (DGF, 2012). Ce risque est piloté essentiellement par des composantes à la fois climatiques, biologiques et anthropiques. En Tunisie, l'occurrence et la fréquence des feux de forêt ne cessent de s'accroître depuis 2010 ce qui contribue à la perte de milliers d'hectares de formations végétales tous les ans. Les forêts de Bizerte connaissent un nombre élevé d'incendie avec des variations notables selon les années. Le phénomène a pris de l'ampleur après 2011 : passant de 8 incendies en 2010 à 57 incendies en 2014 avec un pic en 2017 de 76 incendies. Les années 2013, 2014 et 2016 ont connu particulièrement les plus grandes superficies incendiées. Mais, finalement, l'année 2017 a été la plus désastreuse avec 76 incendies qui ont ravagé 4424 ha (DGF, 2018).

Jbel Bil Lahrish a été épargné des feux depuis plusieurs années. De ce fait, les forêts qui l'abritent sont en grande partie conservées. Mais du 1^{er} au 11 août 2017, un incendie a ravagé 731,3 ha de forêt de chêne liège, de pin d'Alep, de pin maritime et d'Eucalyptus touchant à la fois les ressources forestières, les habitants de la forêt et les recettes de l'Etat.

Plusieurs travaux réalisés dans la région méditerranéenne ont montré la capacité des indices de végétation à discriminer les zones brûlées (PEREIRA J.M., 1999 ; HADDOUCHE et al., 2001 ; ESCUIN S., 2008). Le *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) et le *Normalized Burn Ratio* (NBR) restent les indices les plus performants. Comparer les données multi-dates avant et après l'incendie est intéressant pour cartographier la sévérité du feu et étudier la dynamique de la végétation et des paysages. Les travaux de terrain sont indispensables pour la vérification de la pertinence des indices de végétation.

Le présent article a pour objectif d'établir un constat sur l'état du massif forestier brûlé après le passage du dernier incendie. Le travail mené adopte une approche basée sur l'analyse des données du satellite Landsat 8-OLI, données acquises à des périodes avant et après l'incendie et validées par des vérifications sur le terrain.

LE SITE D'ÉTUDES

Localisation

Situé entre les latitudes 37°02' N et 37°05' N et les longitudes 9°07'E et 9°11' E, Jbel Bil Lahrish se trouve entre les villages de Tamra et Hadada (Fig.1). Tamra appartient au secteur Shabna dans la délégation de Sejname à l'ouest du gouvernorat de Bizerte et Hadaha au secteur de Jbel Eddiss dans la délégation de Nefza au nord du gouvernorat de Béja. Sur le plan régional, la végétation de Jbel Bil Lahrish fait partie du Tell méditerranéen et plus précisément des Mogods.

Cadre orographique

Sur base de diverses cartes topographiques, le relief de Jbel Bil Lahrish forme un anticlinal haut de 418 m. Il fait partie de la chaîne montagneuse des Mogods littorales, au nord du pays. Malgré la modestie des altitudes, Jbel Bil Larish paraît imposant à cause de l'importance des dénivellations et des plaines qui l'entourent, comme la plaine marécageuse de Sejname au nord et la plaine étroite de Nefza au sud. Une ligne de crêtes principales et une autre secondaire séparent trois versants. Ces lignes de crête portent les noms de Jbel Bil Lahrish, Argoub Al Motif et Jbel Haddada. Le versant exposé au nord-ouest se limite au niveau de la route nationale 7 du côté de Nefza. Le versant sud-est, plus pentu se limite au niveau de Henrich Ouled Zayed. Le versant ouest, plus étroit et encore pentu se limite au niveau de l'oued At Tarf (Fig. 2). La carte de l'exposition des pentes montre des pentes dirigées pour l'essentiel vers le nord et le nord-ouest pour le flanc septentrional du Jbel et des pentes exposées plutôt au sud-est pour le flanc méridional du Jbel. Les versants sont composés par des séries argilo-marneuses du flysch numidien datant de l'oligocène aquitainien. Les piedmonts sont marneux ou formés d'alluvions anciennes du pléistocène moyen et supérieur. Les sols ferrallitiques reposants sur le flysch numidien sont à l'origine de plusieurs mines à ciel ouvert. Sur les trois versants coulent des cours d'eau de petite taille qui s'organisent autour du barrage Sidi Barrak du côté sud-est et de la plaine de Sejname du côté ouest et nord-ouest.

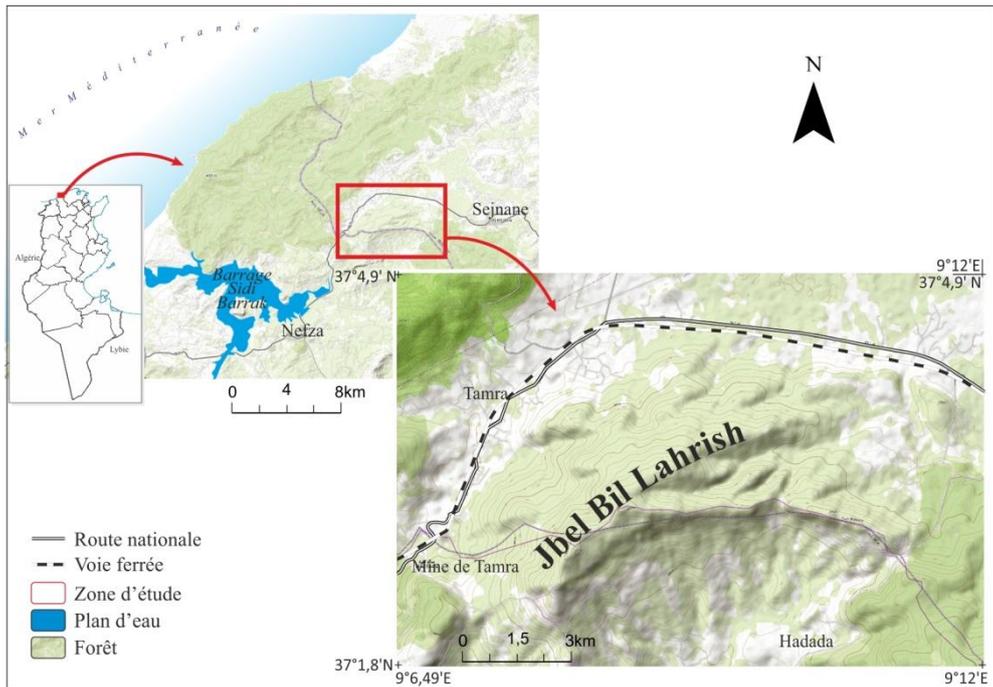


Figure 1.- Carte de localisation de la zone d'étude.

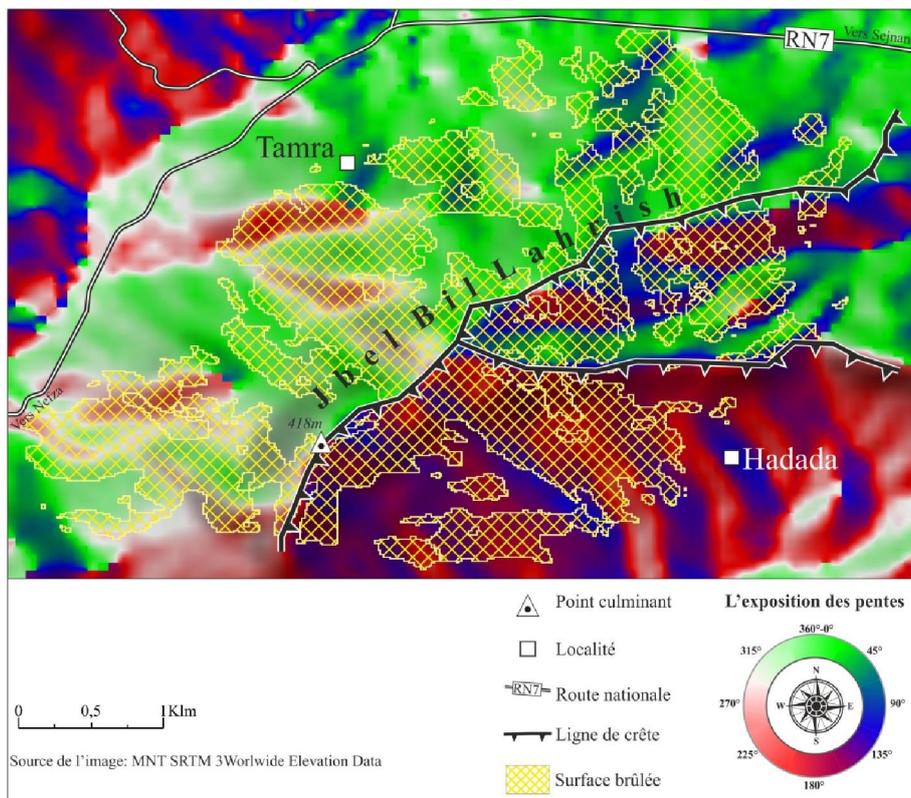


Figure 2.- Carte de l'exposition des pentes de Jbel Bil Lahrish.

Cadre climatique

La station de Nefza jouit d'un climat méditerranéen capricieux avec une alternance de deux saisons fortement contrastées. L'été chaud correspond à la saison sèche et l'hiver doux correspond à la saison humide. La température moyenne annuelle est de 19,8°C (période 2002-2010) à Nefza (INSTITUT NATIONAL MÉTÉOROLOGIQUE). C'est en janvier qu'on enregistre la température mensuelle la plus basse avec 11,9°C, alors que le mois d'août est le mois le plus chaud avec une moyenne de 28,5°C (Fig. 3).

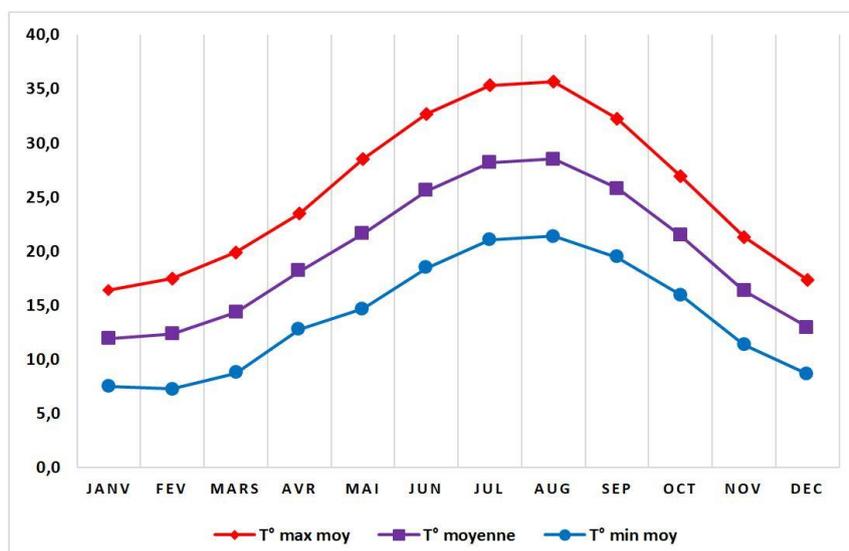


Figure 3.- Les températures annuelles maximales, moyennes et minimales de la station de Nefza. (période 2002-2010).

La station de Nefza bénéficie d'un bioclimat méditerranéen humide inférieur à hiver doux. Les précipitations annuelles moyennes atteignent 692,7 mm (période 1981-2010) et peuvent atteindre la barre de 1.200 mm sur les reliefs, mais avec une forte irrégularité interannuelle. Le régime pluviométrique saisonnier est de type "2-1-3-4". Il pleut surtout l'hiver, qui, avec 325,2 mm en moyenne (de décembre à février), concentre 47 % du total annuel moyen. Le régime pluviométrique mensuel est de type simple, avec un seul maximum enregistré en décembre, maximum de 145,8 mm (Fig. 4).

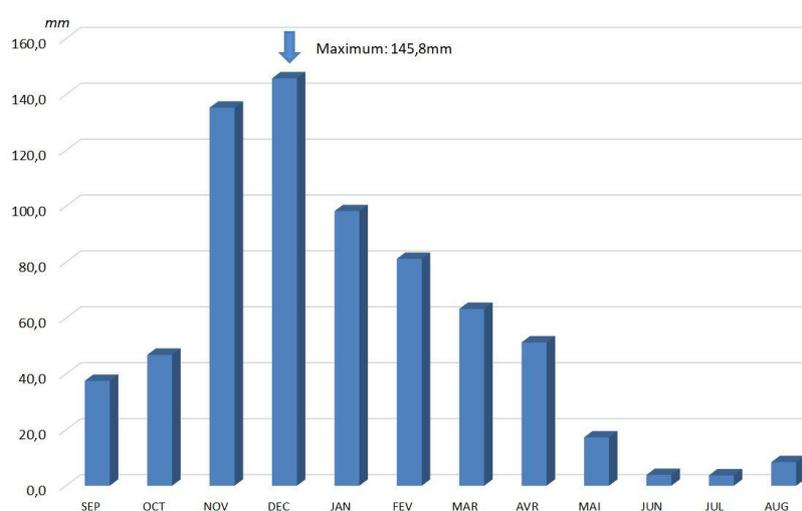


Figure 4.- Les précipitations moyennes mensuelles de la station de Nefza (période 1981-2010).

La végétation de Jbel Bil Lahrish

Selon la carte phytocéologique de la Tunisie septentrionale (GOUNOT et al., 1967), Jbel Bir Larhich appartient à l'étage bioclimatique humide inférieur à hiver doux. Il est couvert par le groupement CZ à *Quercus suber*, *Pistacia lentiscus* et *Quercus coccifera*. C'est un groupement qui couvre les régions littorales de la Kroumirie et des Mogods. La composition caractéristique de ce groupe comprend ces trois espèces, mais également *Erica arborea*.

Ce groupement se caractérise par la présence d'espèces indicatrices de la douceur du climat comme *Quercus coccifera*, *Teucrium fruticans* et *Chamaerops humilis*. L'*Olea europaea* est assez présent dans ce groupement, surtout au contact de celui-ci avec les groupements reliques d'oléo-lentiques.

Formations climaciques

Une subéraie s'étend sur les versants nord et ouest de Jbel Bil Larish à moins de 400 m d'altitude. Elle se développe principalement sur les sols siliceux. Sa physionomie présente un caractère moins vigoureux qu'en Kroumirie, en raison de la diminution de l'altitude et des précipitations. Dans les sites les mieux conservés, cette subéraie ne dépasse pas les 7 à 10 m de haut et présente un sous-bois sous forme de maquis touffu où dominent la bruyère arborescente, le lentisque et la filaire. Elle porte des stigmates de passage antérieur d'incendies et de surpâturage.

Formations reboisées

Le pin pignon (*Pinus pinea*) est l'essence principale de reboisement des formations préforestières à Jbel Bir Larhich. Il constitue une forêt monospécifique en association avec certaines espèces arbustives et buissonnantes autochtones dont les plus remarquables sont *Quercus coccifera*, *Pistacia lentiscus*, *Olea europaea*, *Daphne gnidium*, *Rubia peregrina*, *Calicotome villosa*, *Rubus ulmifolius*, *Cistus salvifolius*, *Myrtus communis* et *Cistus monspeliensis*.

Dans les surfaces planes des topographies basses prédominent deux espèces exotiques, l'*Eucalyptus camaldulensis* et l'*E. gomphocephala*. Les arbres alignés et espacés d'une façon régulière, permettent le développement d'un maquis dense de lentisques, de bruyères et de filaires. Dans les secteurs les plus éclairés de cette forêt se développe les *Cistus monspeliensis* accompagnés de *Helanthemum cinereum* et de *Lavandula stoechas*.

L'inflammabilité des espèces végétales

L'inflammabilité et la combustibilité caractérisent le comportement de la végétation par rapport au feu. La haute inflammabilité de la plupart des espèces forestières qui forment le cortège floristique de la subéraie constitue un sous-bois d'essences très inflammables, au premier rang desquelles se situent la bruyère arborescente et la filaire. Ce sous-bois, généralement très dense, constitue en été, notamment à l'époque où souffle le "sirocco", un milieu très susceptible de prendre feu et de le propager. Les peuplements d'*Eucalyptus* sont aussi très inflammables (Tab. 1) et cela malgré l'espacement des pieds d'arbres. Les pinèdes à pin pignon présentent une moindre sensibilité aux incendies en comparaison avec celles à pin maritime ou à pin d'Alep. Les houppiers de pins parasols sont particulièrement denses, limitant ainsi la quantité de lumière arrivant jusqu'au sous-bois. L'ombre importante des houppiers va freiner la croissance de la végétation arbustive et ce sous-bois peu dense réduit la combustibilité des peuplements. De plus, l'épaisseur de l'écorce et l'absence de branches basses pour les grands individus le rend résistant aux feux.

Le tableau repris ci-après classe les espèces végétales trouvées à Jbel Bil Lahrish selon leur degré d'inflammabilité. Cette classification repose sur les essais à l'épi-radiateur réalisé par l'INRA de France et l'INIA d'Espagne.

Tableau 1 : Inflammabilité des principales espèces végétales présentes à Jbel Bil Lahrish selon la classification de l'INRA (France) et l'INIA (Espagne)

Inflammabilité	Espèces végétales
Espèces très inflammables toute l'année	<i>Erica scoparia</i> L. <i>Erica arborea</i> L. <i>Pinus halepensis</i> Mill. <i>Eucalytus</i> sp. <i>Genista hirsute</i> Vahl. <i>Phillyrea angustifolia</i> L.
Espèces très inflammables seulement pendant l'été	<i>Pinus pinaster</i> Soland. <i>Quercus suber</i> L. <i>Ulex parviflorus</i> Pourr. <i>Stipa tenacissima</i> L.
Espèces moins inflammables	<i>Arbutus unedo</i> L. <i>Cistus salvifolius</i> L. <i>Erica multiflora</i> L. <i>Juniperus oxycedrus</i> L. <i>Olea europaea</i> L. <i>Quercus coccifera</i> L. <i>Pinus pinea</i> L. <i>Rhamnus lycioides</i> L. <i>Pistacia lentiscus</i> L.
Espèces peu inflammables	<i>Daphne gnidium</i> L. <i>Rubia peregrina</i> L.

LES ACTIVITÉS SOCIO-ÉCONOMIQUES DE LA POPULATION LOCALE ET LES RISQUES D'INCENDIE

Le sol ferrallitique dans lequel on exploite le minerai de fer est à l'origine de l'apparition du petit village de Tamra. Ce dernier se localise sur un axe routier important qui relie Sejnane et Nefza. La population est de dominance rurale, elle vit dans des habitations dispersées dans les douars. Suite à la crise de la mine de Tamra, le secteur de Shabna a perdu 34 % de sa population depuis 1966. Aujourd'hui, ce secteur compte 4.595 habitants, dont 4.178 ruraux répartis en 1.235 ménages. Du côté de Hadada, le secteur de Jbel Eddiss compte 4.988 habitants ruraux (INS, 2014). La surface forestière correspondant à une personne dans le secteur de Shabna est de 1,12 ha. Cette valeur est légèrement inférieure à la moyenne nationale estimée à 1,15 ha / usager. La zone d'interface habitat-forêt est hautement menacée par le risque d'incendie ; on a recensé 746 constructions, dont 284 d'entre elles sont situées à moins de 100 mètres de la forêt. Cette configuration expose les habitants, ainsi que leurs biens, aux flammes en cas d'incendie (Fig. 5).

Une étude réalisée par la Direction Générale des Forêts et le GIZ en 2012 portant sur la population forestière en Tunisie avait évalué le nombre total d'usagers de la forêt dans le Gouvernorat de Bizerte à 88.400 usagers, soit 12% de l'ensemble de la population usagère de la forêt en Tunisie. Aujourd'hui, les activités économiques se limitent aux activités agro-forestières. Les petites exploitations agricoles, *Microfundia*, dépassent rarement un hectare et sont séparées par un bocage à dessin irrégulier. A Tamra, on trouve essentiellement de l'arboriculture avec des champs de tabac. A Hadada, située sur le versant sud-est de Jbel Bil Lahrish, la céréaliculture domine le paysage agraire. La zone d'interface cultures-forêts constitue une zone propice au départ des feux. Les champs assez vastes occupent les clairières forestières et les lisières forestières.

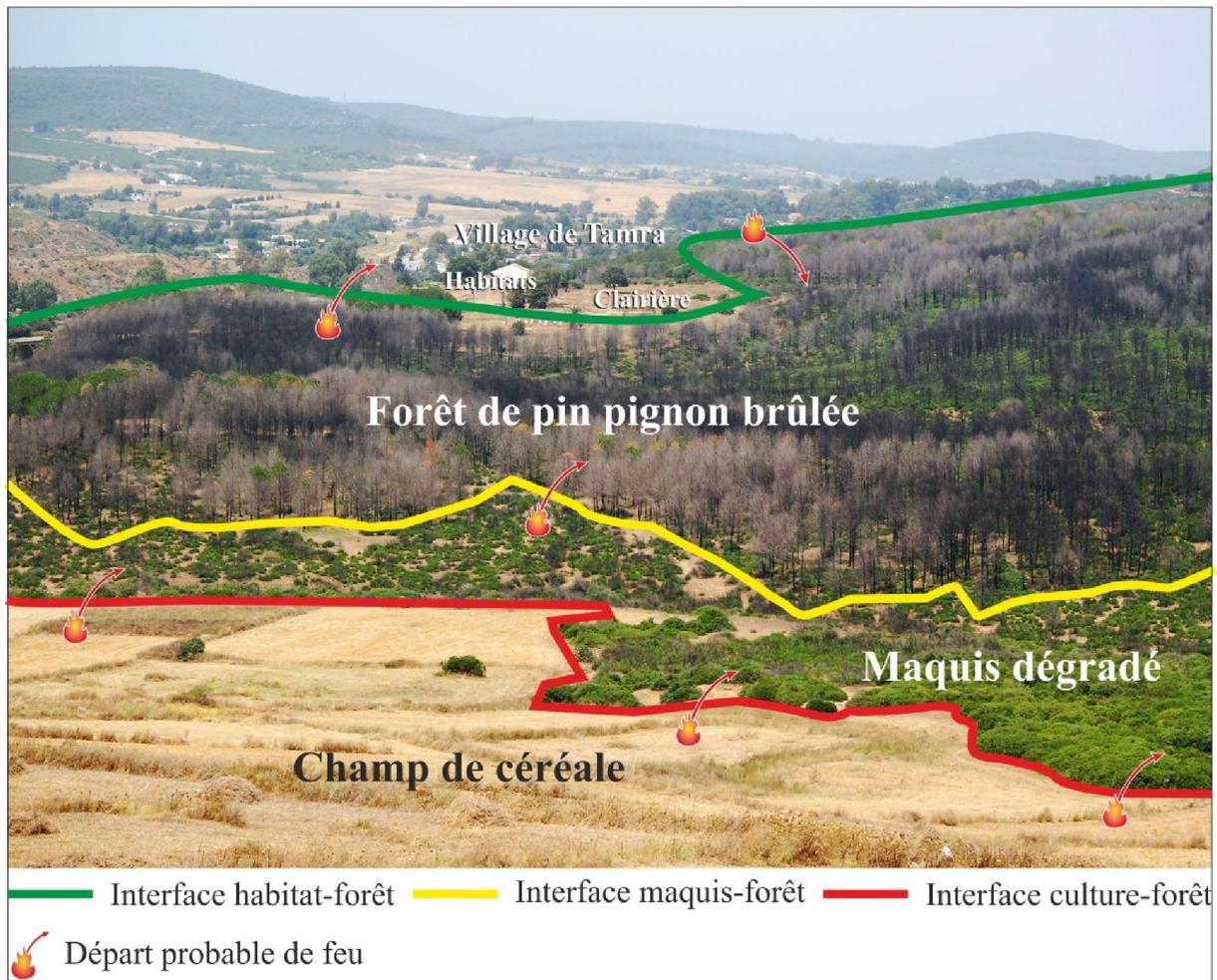


Figure 5.- Les interfaces habitat-forêt à Jbel Bil Lahrish en juin 2018. © Jaziri & Baccouche.

Ce genre d'activité agricole peut être une source d'éclosion des feux, surtout lors de la saison estivale. En effet, entre 2006 et 2015, 20 % des incendies dans les forêts de Bizerte sont dus aux travaux agricoles (HAMDJ, 2018).

Le code forestier tunisien actuel accorde à la population vivant à la lisière et même à l'intérieur des forêts le droit d'utiliser « *gratuitement pour ses besoins et à raison de son domicile certains produits des forêts* » (voir note infrapaginale 1). Cependant, l'État reste le principal exploitant du bois dans le triage de Tamra.

La fréquentation de la forêt par les habitants est courante vu l'importance de la population vivant à l'intérieur de la forêt et l'importance du réseau de sentiers. Ces réseaux totalisent 81,5 km dont 32 km sont des pistes DFCI, 35,3 km des pistes ordinaires et 14,2 km des pare-feux (Fig. 6).

La place de la forêt dans le triage forestier de Tamra est importante. On y trouve le seul parc à chêne liège de tout le gouvernorat. Une pépinière de reproduction de chêne liège fournit une grande partie des plants de reboisement des forêts de la région. Les *Eucalyptus* et les pinèdes ont également une place prépondérante. Ces essences forestières jouent un rôle écologique et économique important, par la préservation des ressources naturelles d'une part et par la production sylvicole d'autre part. La production moyenne annuelle du bois dans le triage de Tamra est estimée à 13.710 tonnes pour la période 1998-2002 (LAARIBI, 2015).

Note 1 : La section 4 du code forestier tunisien, dans ses articles 35 à 42, organise les droits et obligations des usagers du domaine forestier. Il considère comme usager du domaine forestier tout habitant vivant à l'intérieur du domaine forestier. Ne sont « *reconnus comme titulaires d'un droit d'usage dans les forêts de l'Etat que les tunisiens domiciliés à l'intérieur des forêts* ». Quant aux citoyens domiciliés dans un rayon de 5km des dites forêts et qui ont effectivement exercé le droit d'usage précité, ils continueront à exercer ce droit d'usage d'une façon transitoire pendant 5 ans ».

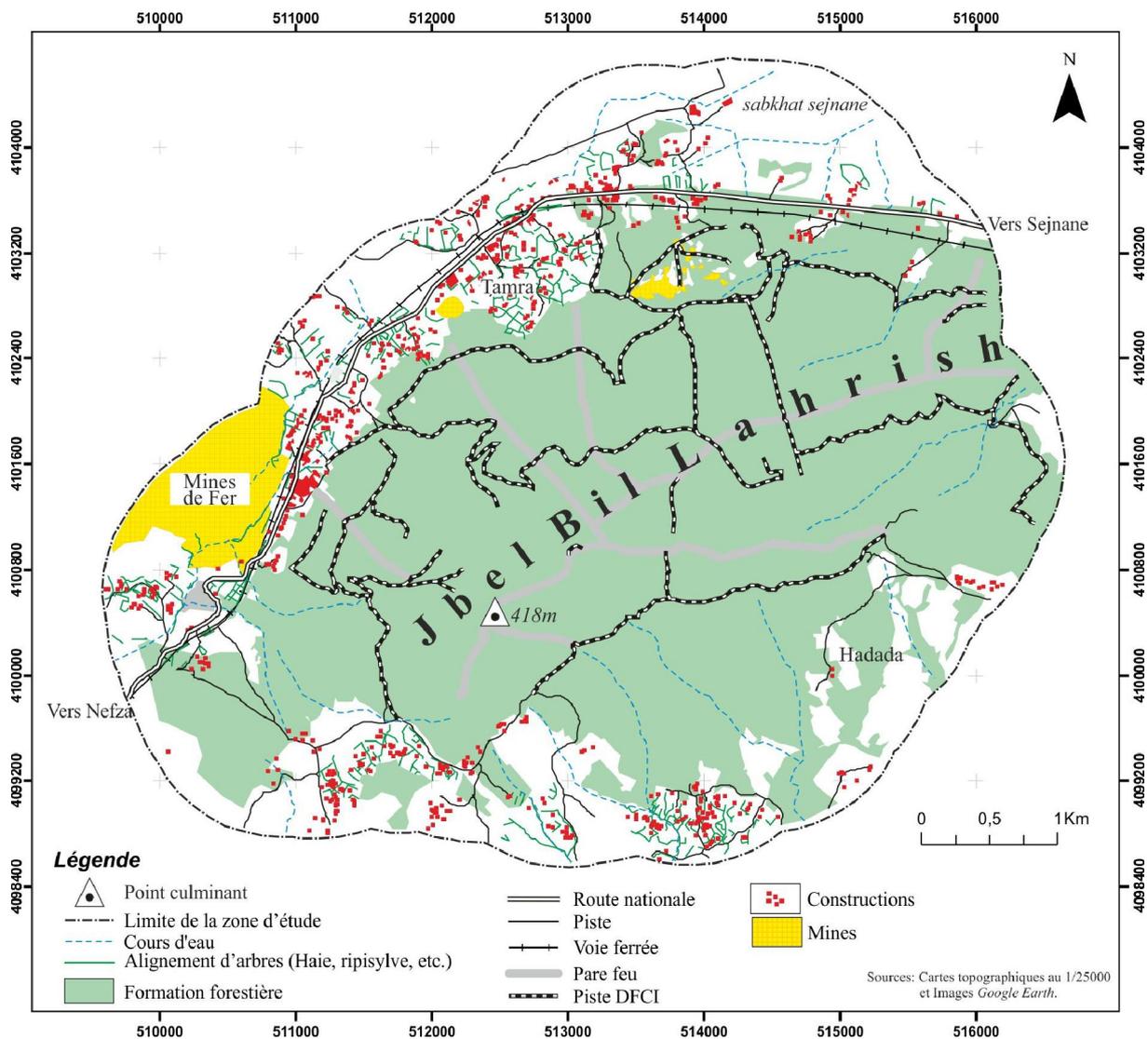


Figure 6.- Occupation des sols aux alentours de Jbel Bil Lahrish.

MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE

Prétraitement des images Landsat 8 OLI

Le traitement des images satellitaires Landsat 8 OLI passe par plusieurs étapes. Grâce aux outils accessibles pour la télédétection et aux SIG, il est devenu aisé de procéder à de nouvelles techniques basées sur le calcul des divers indices de végétation. Après l'acquisition des images, un prétraitement doit être établi pour améliorer les résultats. L'utilisation des données de télédétection pour des analyses quantitatives, multitemporelles et multicapteurs nécessite un passage à des valeurs physiques de réflectance de surface. Dans ce contexte, il est indispensable que toutes les scènes soient normalisées afin que les données soient comparables (CHANDER & MARHAM, 2003). L'approche méthodologique repose sur l'utilisation d'un modèle de correction atmosphérique visant à corriger les sources de dégradation du signal provenant de l'atmosphère.

Le processus de correction débute par le passage des comptes numériques de l'image brute en luminance. L'étape suivante consiste à transformer les luminances en réflectance exo-atmosphérique, puis le passage aux réflectances au sol.

Afin de redéfinir la résolution spatiale des pixels, des opérations de *pansharping* ont été effectuées aux images Landsat 8 OLI. Cette opération consiste à redimensionner les pixels en passant de 30 m à 15 m grâce à la bande spectrale n°8 qui se situe dans la région spectrale « visible » (0.513 μm - 0.676 μm).

Pour une meilleure mesure, on utilise des données recueillies immédiatement avant l'incendie et immédiatement après l'incendie. Une première scène prise avant le passage du feu (29 juillet 2017) et une autre photo prise jus après le passage du feu (30 août 2017). Pour évaluer l'état actuel de la forêt et de la régénération forestière post-incendie, une autre photo prise le 30 juin 2018, a été exploitée.

Indices de végétation

Le risque d'incendie est une donnée liée à l'espace : par conséquent, il peut faire l'objet d'une représentation cartographique (MEDDOUR-SAHARET & DERRIDJ, 2010). De nombreux indices de végétation sont développés avec les progrès de la télédétection. Certains d'entre eux font référence à l'état intrinsèque de celle-ci, d'autres à l'hétérogénéité spatiales des paysages (ANTROP & VAN EETVELDE, 2000) et d'autres encore à la dynamique des mosaïques paysagères (DÉCAMPS & DÉCAMPS, 2004). Tous ces indices permettent de caractériser le paysage végétal.

Nous avons retenu deux indices, à savoir le *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) et le *Normalized Burn Ratio* (NBR). Il sera encore fait appel à d'autres indices, dérivés de ces deux premiers. Il s'agit du *Difference NDVI* (Δ NDVI) et du *Difference NBR* (Δ NBR).

Le traitement cartographique se fait uniquement sur les zones brûlées afin d'évaluer l'état de la dynamique végétale. Le découpage se fait par un masque représentant les contours de l'incendie afin d'atténuer les autres régions concernées.

L'NDVI se calcule par combinaison de comptes numériques des bandes spectrales R (bande spectrale du rouge) et PIR (bande spectrale du proche infrarouge). Pour calculer l'NDVI à partir des canaux de Landsat 8 OLI, on utilise la formule suivante :

$$\text{NDVI} = (\text{Bande 4} - \text{Bande 5}) / (\text{Bande 4} + \text{Bande 5})$$

Le NBR fournit une mesure quantitative du changement et permet de différencier les zones brûlées des zones non brûlées. La formule est similaire à celle d'un indice de végétation par différence normalisée (NDVI), sauf qu'elle utilise des parties du spectre électromagnétique dans le proche infrarouge (NIR) et dans l'infrarouge à ondes courtes (SWIR) (KEY & BENSON, 2006). Pour Landsat 8 OLI, la bande NIR correspond au canal 5 et la bande SWIR correspond au canal 7. La bande 5 mesure le proche infrarouge ou NIR. Cette partie du spectre est particulièrement importante pour nous renseigner sur l'état sanitaire d'une plante. En effet, les plantes saines reflètent ce spectre grâce à l'eau contenue dans leurs feuilles. La bande 7 couvre différentes tranches de l'infrarouge à ondes courtes, ou SWIR. Cette bande est particulièrement utile pour distinguer les sols nus et les roches. La formule s'écrit comme suit :

$$\text{NBR} = (\text{Bande 5} - \text{Bande 7}) / (\text{Bande 5} + \text{Bande 7})$$

Le calcul de la sévérité du feu se réalise par la différence NBR (Δ NBR ou d NBR) avant et après incendie. Cet indice permet de mieux comprendre l'étendue et la gravité du feu. D'un point de vue général, la sévérité du feu peut être définie comme le degré de changement dans le sol et la végétation causé par le feu. Déterminer le périmètre de l'incendie, ainsi que la distribution des niveaux de gravité à l'intérieur du périmètre, facilite le processus de prise de décisions visant à restaurer les zones touchées. Il permet également une analyse des effets du feu sur la succession végétale post-incendie (ESCUIN et al., 2008).

Le rapport NBR fonctionne mieux dans des régions où la régénération des plantes devrait se produire lentement. Dans des régions comme les tropiques qui sont humides et caractérisées par une repousse rapide, la NBR peut être moins efficace (WASSER & CATTANU, 2018). Pour cette raison, l'utilisation de la NBR est acceptée en Tunisie.

Pour calculer la différence NBR, nous soustrayons le raster NBR après incendie du raster NBR avant incendie :

$$d \text{ NBR} = \text{NBR avant incendie} - \text{NBR après incendie}$$

Des recherches portant sur la sévérité des feux de forêts sont nombreuses. Plusieurs d'entre elles ont essayé de dresser des seuils qualitatifs et quantitatifs pour estimer la sévérité du feu. Les classes issues des études du programme américain *USGS FireMon* sont couramment utilisées. Elles peuvent être utiles en première approximation pour interpréter la différence NBR. Ces valeurs-seuil sont ensuite utilisées pour créer une couche de la sévérité des brûlures. Sept classes seront retenues. Les classes 1 et 2 sont liées au rythme de la régénération végétale. Les classes 3 à 7 traduisent le degré de gravité de la brûlure.

Le tableau 2 de classification peut être utilisé pour classer la différence de trame en fonction de la gravité de la brûlure.

Tableau 2.- Niveau de sévérité des incendies de forêt par calcul du d NBR.

Classes	ANBR	Niveau de sévérité
1	< - 0,25	Reprise lente de la végétation après l'incendie
2	- 0,25 à - 0,1	Reprise lente de la végétation après l'incendie
3	- 0,1 à + 0,1	Non brûlée
4	0,1 à 0,27	Brûlure de faible gravité
5	0,27 à 0,44	Brûlure de gravité moyenne
6	0,44 à 0,66	Brûlure de forte gravité
7	> 0,66	Brûlure de haute gravité

La différence de l'NDVI pré-incendie et post- incendie est importante pour mesurer le comportement de la végétation après le passage du feu. La réponse de la végétation est fonction de sa flore et de l'importance du sous-bois. Tout comme le dNBR, deux séquences ont été prises en compte. Une première avant et après l'incendie et une seconde après un an de l'incendie.

Pour s'assurer des approches de classification en termes de gravité du feu et de la dynamique post-incendie, l'interprétation et la vérification des résultats doivent toujours être basées sur une évaluation réalisée sur le terrain. Ainsi, le suivi des conditions réelles sur le terrain a été effectué dès le début du printemps 2.018. Plusieurs relevés floristiques et photographiques pris au sol ont été effectués dans les différents secteurs incendiés et non incendiés à Jbel Bil Lahrish.

RÉSULTATS

Cartographie des espaces brûlés

La sévérité des feux

Les cartes réalisées sont issues des mesures des différents indices calculés. Elles montrent l'évolution de la végétation avant et après l'incendie. Deux séquences ont été prises en compte. Une première série après un mois de la date de l'incendie et une deuxième après un an de la date de l'incendie. Les zones récemment brûlées ont une réflectance relativement faible dans le proche infrarouge et réflectance élevée dans la bande infrarouge à ondes courtes. Une valeur élevée de NBR indique généralement une végétation saine tandis qu'une valeur faible indique un sol nu et des zones récemment brûlées. Une première lecture de la carte de la sévérité de l'incendie de Jbel Bil Lahrish montre l'importance de l'impact du feu sur le couvert végétal. Trois classes parmi les 7 classes établies par le programme américain *USGS FireMon* sont présentes.

Les mesures obtenues de cette première carte classent la sévérité du feu entre 0,25 et 1,08, soit la classe « brûlure de gravité moyenne » à « brûlure de haute gravité ». Cette dernière domine les autres classes. En effet, 619 ha de formations forestières sont hautement calcinés, soit 84,7 % de la superficie brûlée (Fig. 7). Cette classe intéresse toutes formations végétales sur les deux versants du Jbel. Les brûlures de forte gravité touchent 101,2 ha soit 11,8 % de la superficie incendiée et 10,8 ha pour les brûlures de gravité moyenne, soit 1,5 % seulement de la superficie incendiée estimée à 731,3 ha.

La repousse de la végétation un an après l'incendie a modifié profusément les indices de l'NBR et par conséquent les classes de sévérité du feu. La figure 8 illustre cette modification du paysage forestier. Les mesures obtenues de cette deuxième carte indiquent que cinq des classes établies par le programme *USGS FireMon* sont concernées. Les valeurs du dNBR varient entre -0,1 et 0,82, soit de la classe « non brûlée » à celle à « brûlures de haute gravité ». Les classes du dNBR 30-8-2017 et 30-6-2018 montrent un affaiblissement de la sévérité du feu, mais avec toujours l'existence de la classe « brûlure de haute gravité » (> 0,66). Cette dernière classe s'est réduite dans la première séquence après l'incendie de 619,3 ha à 44,5 ha (Fig. 8), soit à seulement 6,1 % de la surface incendiée. Sur le terrain, les formations hautement incendiées occupent essentiellement les vallées encaissées ou encore les forêts de pin pignon avec un sous-bois clair voire absent par l'activité érosive.

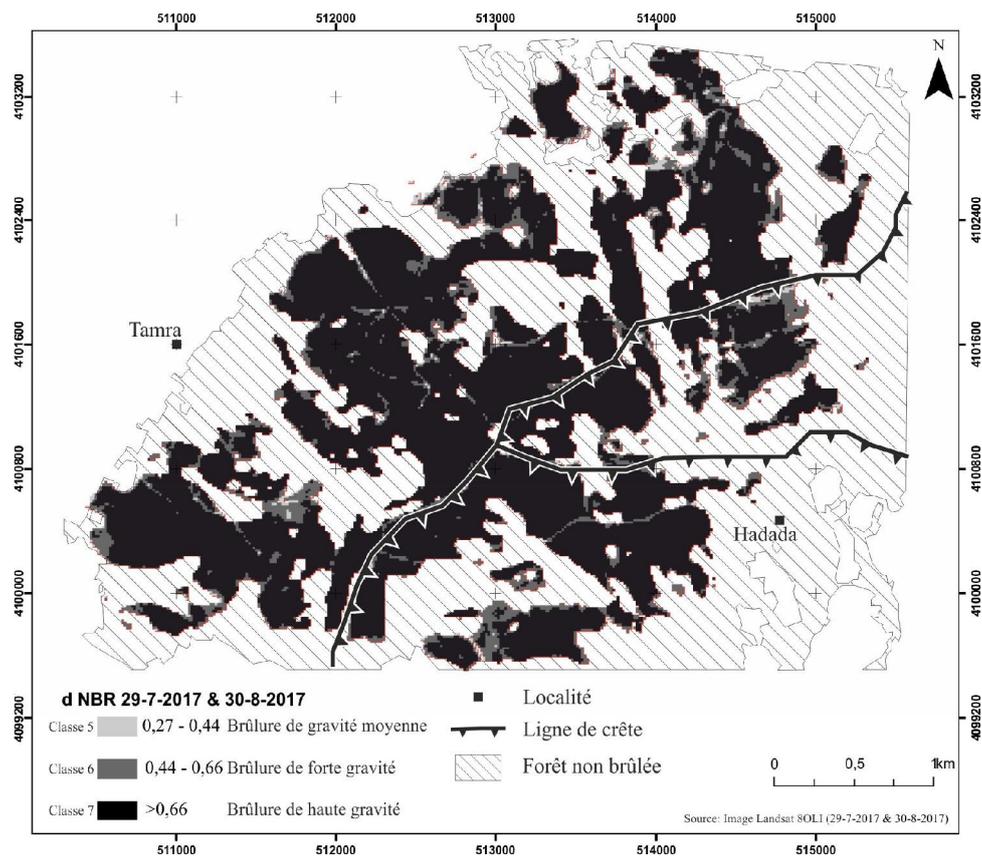


Figure 7.- Niveaux de la sévérité des feux un mois après l'incendie de Jbel Bil Lahrish.

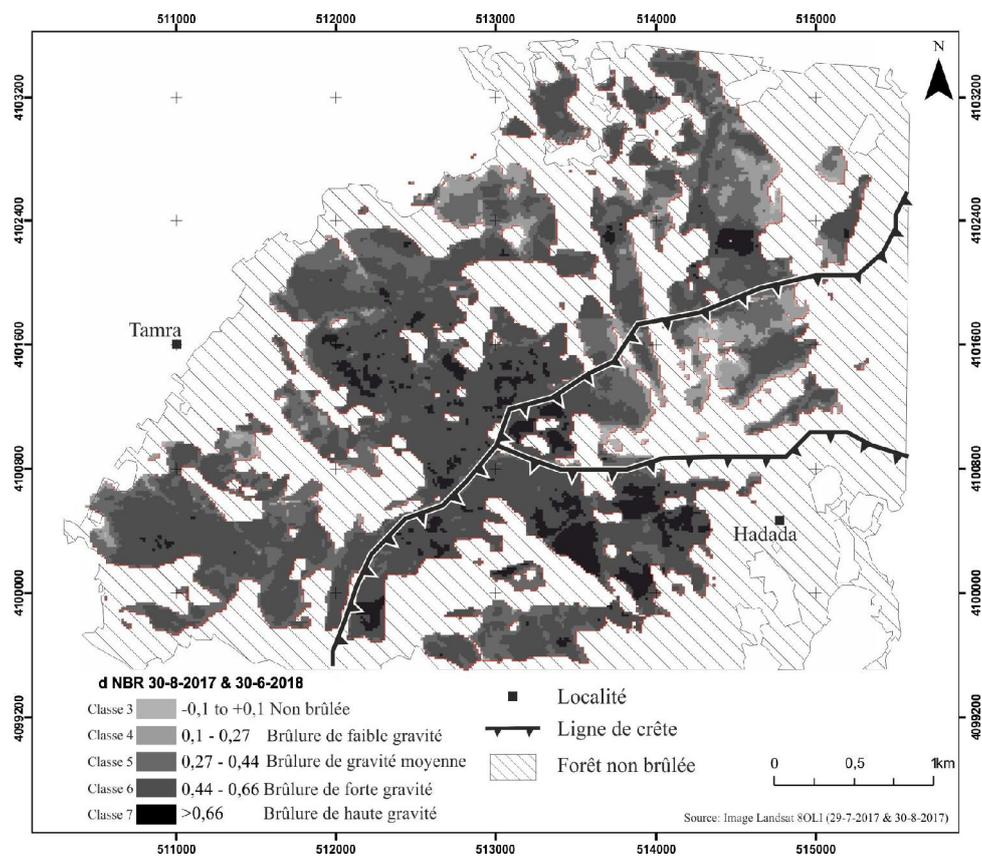


Figure 8: Niveaux de la sévérité des feux un an après l'incendie de Jbel Bil Lahrish

La superficie des autres classes a considérablement augmenté (Fig. 9). La lecture de ce constat doit se faire avec beaucoup de précautions. Les résultats laissent penser que la repousse de la végétation a affaibli les indices de la sévérité du feu. En effet, la chute de la superficie de la classe 7 s'est faite au profit des classes inférieures. Ainsi, la superficie de la classe « brûlure de forte gravité » (classe 6) est passée de 401,2 ha à 101,2 ha, soit 65,2 % de la superficie incendie, après avoir été de 11,8 % dans la première séquence. Le même fait est valable pour les classes 5 et 4 où les superficies ont notablement augmenté entre les deux séquences pour passer, respectivement, à 209,4 ha et à 57,5 ha en juin 2018. Une nouvelle classe est apparue dans cette séquence ; elle est la classe « non brûlée » (8,9 ha) et qui ne correspond qu'à un début de la régénération de la végétation incendiée (Fig. 9).

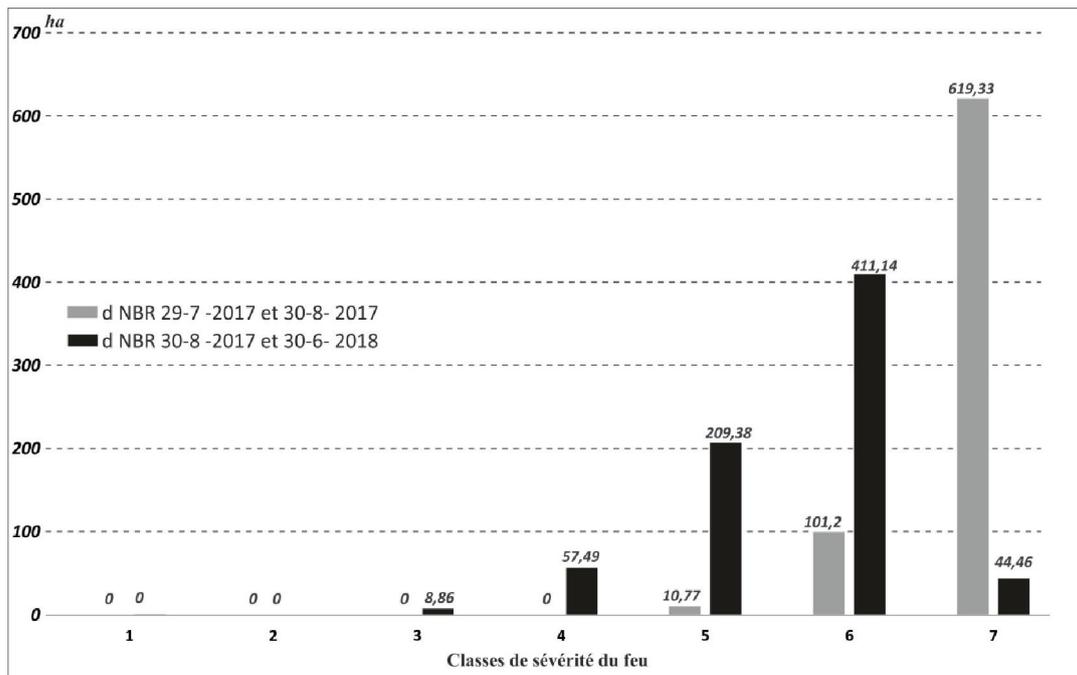


Figure 9.- Evolution du dNBR entre les deux séquences temporelles.

La reprise de l'activité végétale par la lecture de l'NDVI

Les valeurs de l'NDVI changent avec l'état sanitaire de la végétation. Les feux brûlent de manière hétérogène le couvert forestier. Avant l'incendie de 2017 du Jbel, la valeur moyenne de l'NDVI était de 0,82. Le maximum atteignait la valeur 0,95 ce qui correspond à une activité chlorophyllienne maximale, alors que la valeur minimale n'enregistrait que 0,45. Cette dernière valeur intéresse les pistes DFCI, les pare-feux peu ou non végétalisés et les formations végétales peu couvrantes.

Après l'incendie, il est normal que toutes ces valeurs de NDVI chutent (Fig. 10). La moyenne est de 0,14 avec un maximum de 0,22 qui concernent surtout les arbres partiellement brûlés et un minimum de 0,05 où toute activité végétale est arrêtée. Un an après l'incendie, les valeurs de l'NDVI montrent une reprise de l'activité végétale. Les valeurs ont nettement augmentées sans pour autant atteindre les valeurs pré-incendie. La moyenne de l'NDVI est de 0,2 avec un minimum de 0,58, intéressant concernant surtout les formations à reprise rapide et un minimum de 0,23 où la reconquête végétale est lente.

La reprise de l'activité végétale trouve ses traces dans le calcul de la différence NDVI (Fig. 11). Une seule séquence a été prise en compte, celle de 30-8-2017 et 30-6-2018. Les résultats obtenus montrent une activité végétale notable, mais avec un rythme hétérogène.

Les valeurs sont comprises entre 0,04 et 0,46. La reprise végétale rapide concerne essentiellement les formations à *Eucalyptus* et à chêne liège. Les pinèdes monospécifiques et surtout celles à pins pignons sont plus lentes et parfois la régénération par voie naturelle ne se déclenche pas. Le rythme de reprise des formations mixtes dépend de la composition floristique et du degré d'inflammabilité de sa flore.

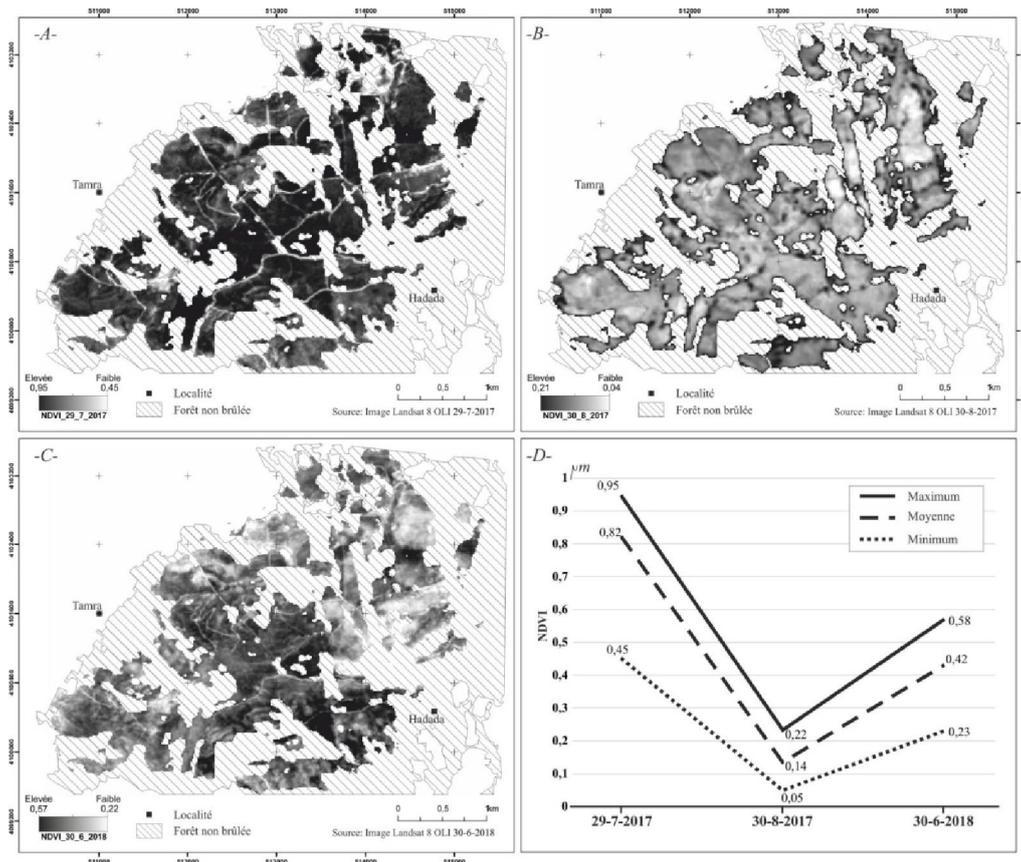


Figure 10- Variation de l'NDVI avant et après l'incendie de Jbel Bil Lahrish.

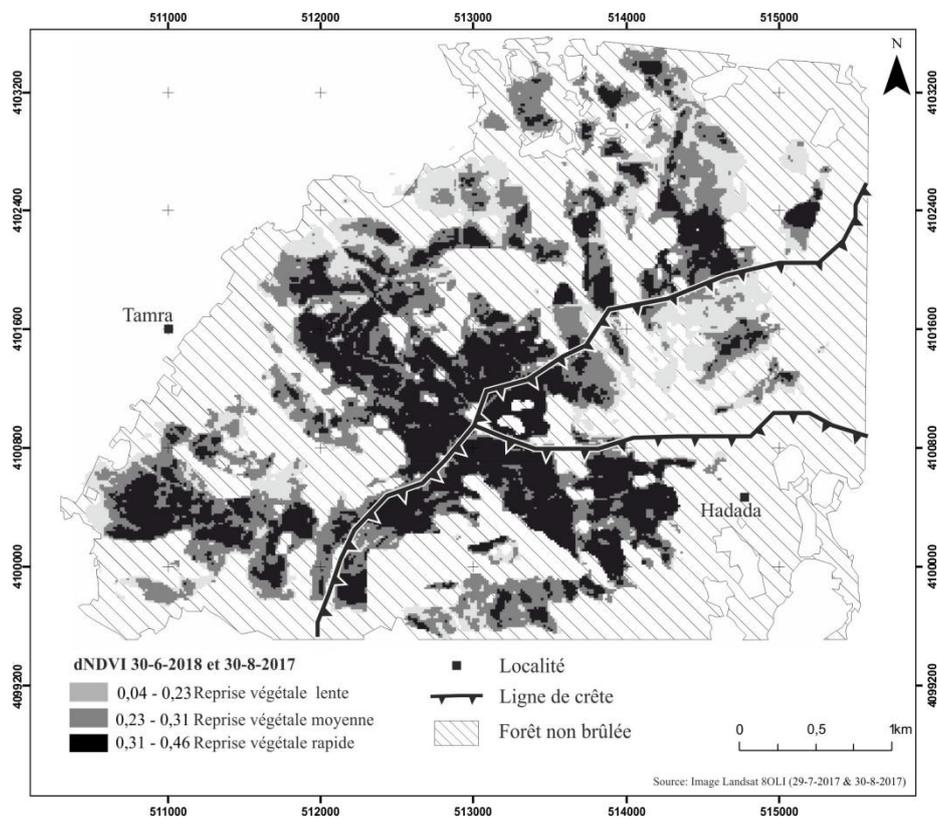


Figure 11.- Rythmes de la régénération de la végétation après l'incendie de Jbel Bil Lahrish.

DISCUSSION

La dynamique de la végétation post-incendie

L'incendie constitue une perturbation pour la végétation qui varie selon le type de feu, son étendue, son intensité ou sa sévérité. Au passage du feu, toute la végétation est affectée : les herbes, les buissons et les arbres dans leurs parties aériennes. Mais, malgré l'apparence de désolation que le feu induit, plusieurs végétaux résistent au feu et avec les premières pluies automnales, ils reverdissent. Généralement la reprise de l'activité végétale est rapide après l'incendie, grâce à deux principaux mécanismes : la régénération par rejets (encore dénommée végétative) et la régénération par germination de graines (encore dite sexuée).

La régénération de la forêt de chêne liège à Jbel Bil Lahrish

La régénération de la forêt de chêne liège ne suit pas le schéma classique d'une évolution, à savoir la croissance des strates basses vers les strates plus élevées (2 – 4 m) jusqu'à reconstitution de la strate arborescente (TRABAUD, 1987). Elle fait exception puisque le chêne liège est une espèce qui régénère ses strates basses et hautes simultanément (AMANDIER, 2004). Le chêne liège se régénère après le feu par la production de rejets et de drageons. Un an après l'incendie de 2017, des rejets ont été produits à partir de la souche par des bourgeons situés en dessous du sol (Fig.12). Ils ont atteint 60 à 90 cm de haut et sont en grand nombre, surtout autour des troncs calcinés. Les vieux individus de chêne liège ont conservé leur faculté de rejeter ou de drageonner et ont développé de jeunes plantules de 30 à 40 cm de haut. Par ailleurs, la production de rejets aériens a eu lieu dans les houppiers, reconstituant les cimes et cela dans le cas où ils ne sont que partiellement endommagés par le feu.

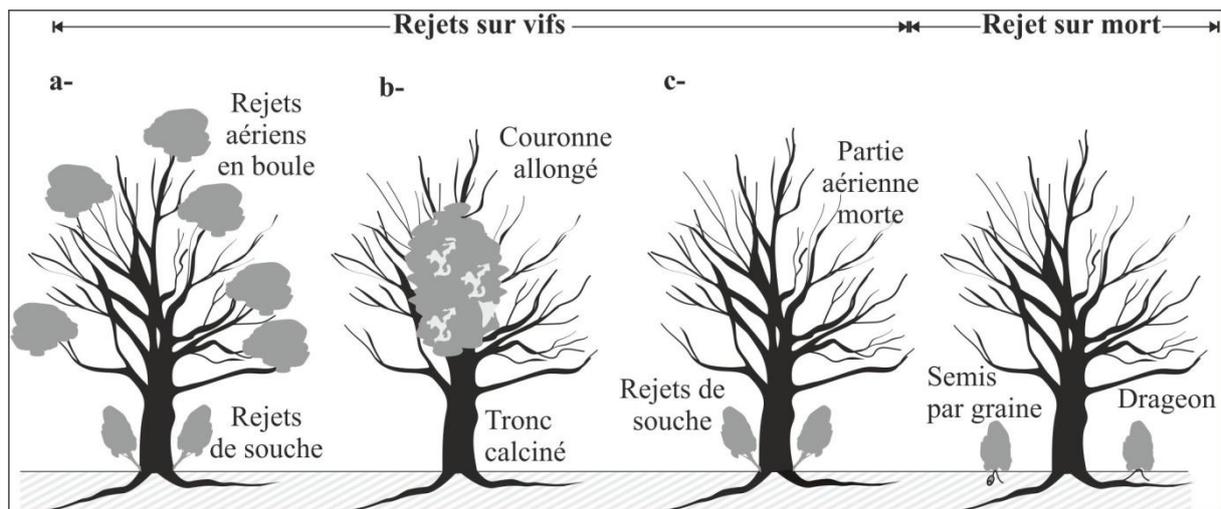


Figure 12.- Différents modes de la régénération du chêne liège un an après l'incendie.

Ces rejets aériens ne se développent que sur des branches ou des rameaux dont l'assise cambiale n'a pas été touchée par le feu. Ils offrent une silhouette assez particulière du houppier, l'ensemble du feuillage et des nouveaux rejets se présente sous forme de boule ou bien ils constituent une couronne allongée de forme irrégulière. Malgré l'ampleur de l'incendie, rares sont les arbres morts dans cette forêt, la plupart des individus de chêne liège ont survécu grâce à l'efficacité de la protection du liège. D'après les relevés effectués, la forêt de chêne liège brûlée a retrouvé rapidement une composition floristique et une structure comparable à celles qui existaient avant le feu. Plus de 80 % du cortège floristique est présent. Les seuls changements enregistrés sont au niveau de la taille des individus et de leur abondance relative.

Le sous-bois se reconstitue rapidement malgré l'absence des opérations de nettoyage après l'incendie (Fig. 13). Les essences principales du sous-bois, filaire et lentisque, ont développé des rejets de souche de plus de 60 cm de haut constituant des touffes assez denses. La bruyère arborescente (*Erica arborea*) a, à son tour, émis des rejets de souche plus nombreux et moins élevés (30 à 40 cm de haut) et cela est lié au fait que sa taille augmente petit à petit au cours de la succession post-incendie. Les plantes grimpantes du sous-bois, telles que *Smilax aspera*, *Tamus communis*, *Lonicera implexa*, *Rubia peregrina* et *Clematis flammula* ont réapparu à nouveau, ne dépassant pas les 30 cm de hauteur.

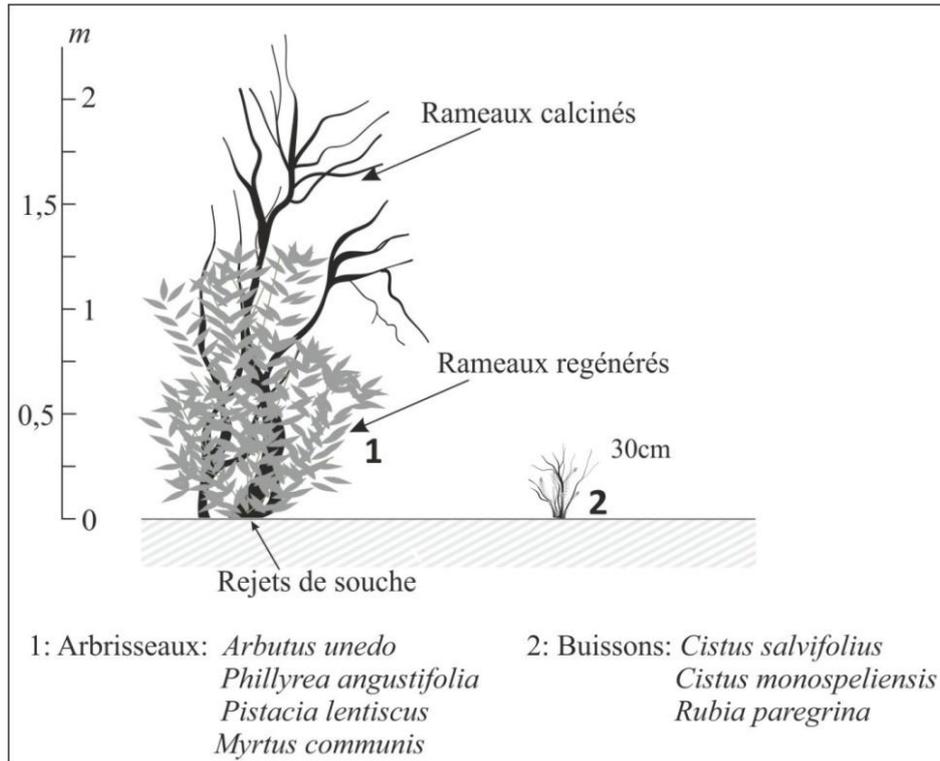


Figure 13.- Redémarrage du sous-bois de la forêt du chêne liège.

Parmi les espèces qui ont proliféré après l'incendie (Tabl.3), il convient de citer les cistes à feuilles de sauge (*Cistus salvifolius*) et les cistes de Montpellier (*Cistus monspeliensis*), des espèces qui se régénèrent facilement par dispersion de graines. Les plantules du ciste de Montpellier ont présenté une germination printanière.

Tableau 3 : Taille des individus du sous-bois un an après l'incendie

Espèces à individus de taille supérieure à 30 cm	Espèces à individus de taille inférieure à 30 cm
<i>Calycotome villosa</i> Poiret	<i>Daphne gnidium</i> L.
<i>Lonicera implexa</i> L.	<i>Smilax aspera</i> L.
<i>Phillyrea angustifolia</i> L.	<i>Tamus communis</i> L.
<i>Pistacia lentiscus</i> L.	<i>Rubia peregrina</i> L.
<i>Myrtus communis</i> L.	<i>Cytisus triflorus</i> L.
<i>Erica arborea</i> L.	<i>Ampeldesma mauritanica</i> Poiret
<i>Clematis flammula</i> L.	<i>Galium ellipticum</i> Willd. ex Hornem.
	<i>Cistus crispus</i> L.
	<i>Crataegus azarolus</i> L.
	<i>Rubus ulmifolius</i> Schott.
	<i>Arbutus unedo</i> L.
	<i>Azarolus crataegus</i> L.
	<i>Asparagus acutifolius</i> L.
	<i>Cistus monspeliensis</i> L.
	<i>Cistus salvifolius</i> L.

La régénération de la forêt à *Eucalyptus*

La forêt à *Eucalyptus* a été sévèrement touchée par le feu. Malgré cela, les *Eucalyptus* ont une forte capacité de se régénérer après l'incendie par la production de rejets. Un an après l'incendie, les houppiers des *Eucalyptus* ont reverdi à nouveau grâce au développement des rejets aériens. Plusieurs bourgeons latents sont entrés en activité après le passage du feu et ont permis le développement d'une couronne allongée et moins étalée que celle d'avant. En conséquence la strate arborescente est devenue moins couvrante et laisse passer plus de lumière pour le sous-bois. Plusieurs rejets de souches et des drageons ont émergés du sol et ont atteint la taille de 70 cm.

Le sous-bois est marqué par l'apparition des rejets de souche de lentisque (*Pistacia lentiscus*), de la bruyère (*Erica arborea*) et de la filaire (*Phillyrea angustifolia*). Leur taille avoisine les 60 cm, ce qui leur permet de constituer un maquis dense couvrant le sol à 80 %. Les cistes de Montpellier (*Cistus monspeliensis*) ont proliféré grâce aux graines présentes dans le sol. (Fig. 14).

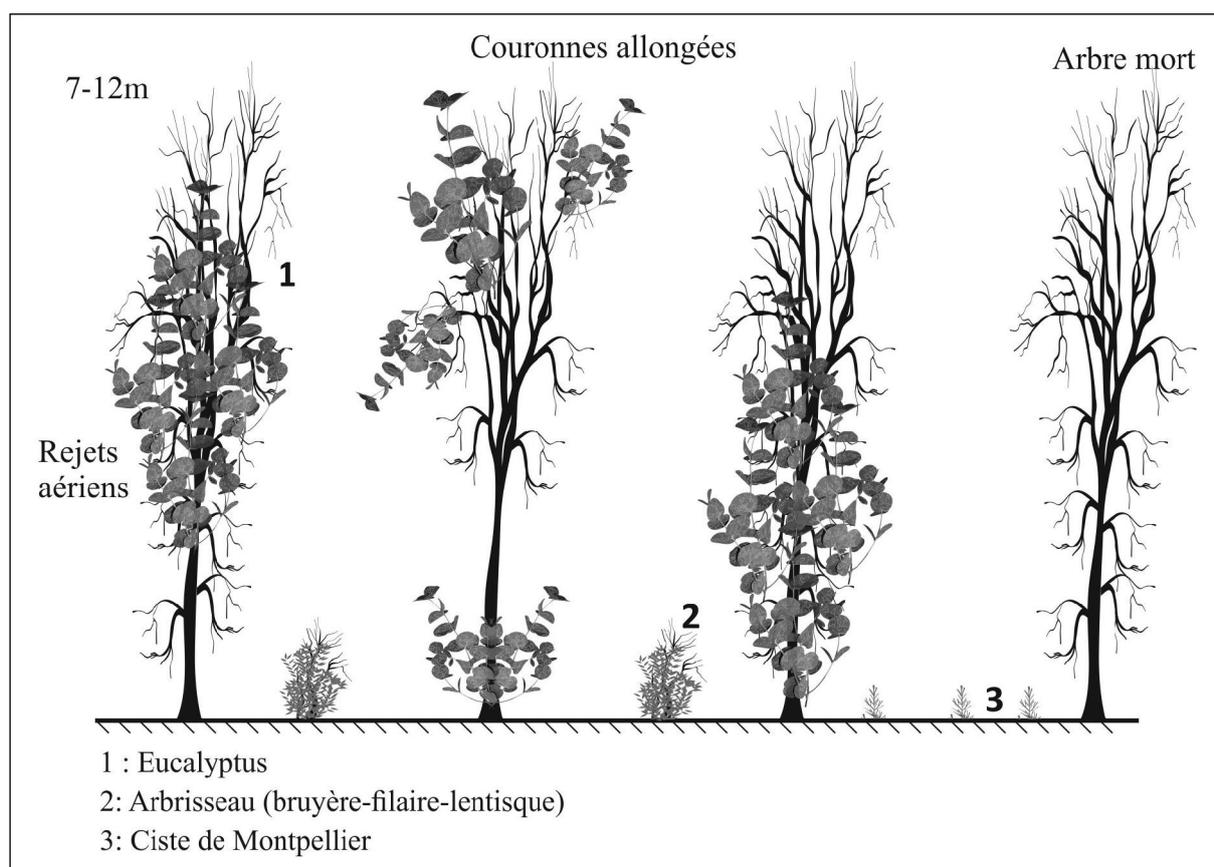


Figure 14.- Redémarrage du sous-bois de la forêt à *Eucalyptus*.

La faible régénération de la forêt de pin pignon (*Pinus pinea*)

Les incendies représentent un risque grave pour les pinèdes, notamment celles qui sont situées le long du littoral, où la pression anthropique est particulièrement intense. Cependant le degré de résistance est variable d'une espèce à une autre. Le pin pignon (*Pinus pinea*) est considéré parmi les différentes espèces de pins comme l'espèce la plus résistante au feu en comparaison avec le pin d'Alep (*Pinus halepensis*). La résistance du pin pignon au feu s'explique par l'épaisseur de son écorce notamment à la base du tronc et sa haute couronne dépourvue de branches basses. Malgré sa résistance au feu, la forêt de pin pignon de Jbel Bil Lahrish a été calcinée. La majeure partie des pieds d'arbres sont morts. Seuls quelques individus ont échappé, surtout ceux qui se situent près des pistes D.F.C.I. ce qui a permis l'extinction rapide du feu au moment de l'incendie.

Les pins pignons se régénèrent uniquement par les graines. Un an après l'incendie qui a affecté cette forêt, aucune jeune plantule de pin pignon n'a été observée sur le terrain. Cela témoigne de la sévérité de l'incendie. Seuls subsistent des arbres calcinés, dont les houppiers ne présentent aucun démarrage jusqu'à présent. Quelques individus de pin pignon ont développé de nouvelles feuilles à l'extrémité des cimes (Fig. 15).

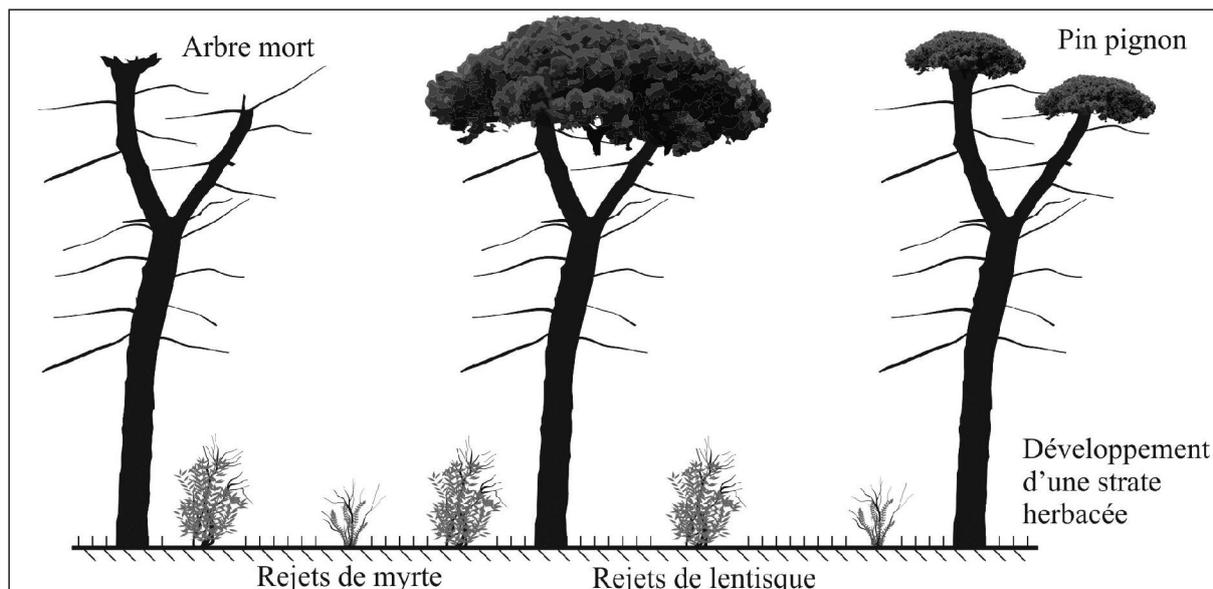


Figure 15.- Différents aspects du pin pignon un an après l'incendie.

Les essences du sous-bois, appartenant au cortège floristique de la végétation préexistante au reboisement, sont apparues à nouveau. Les rejets de souche de filaire (*Phillyrea angustifolia*), de myrte (*Myrtus communis*), de bruyère (*Erica arborea*), de lentisque (*Pistacia lentiscus*) et de chêne kermès (*Quercus coccifera*) ont atteint des tailles de 50 cm à un mètre de hauteur. Cette croissance rapide en hauteur est en rapport avec l'éclaircissement de la forêt à la suite de la destruction de l'ensemble du feuillage. Les rejets d'olivier sauvage (*Olea europaea*) n'ont pas dépassé les dix cm de longueur.

La strate herbacée annuelle est apparue au cours du printemps dernier ; elle est constituée de chardons et de plantes rudérales. Elle couvre 70 % du sol.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'analyse de la dynamique spatiotemporelle dans le paysage forestier post-incendié a été réalisée par l'utilisation de plusieurs outils, à savoir la télédétection, la cartographie numérique et les observations sur le terrain. Au cours de l'été 2017, un incendie a ravagé 731,3 ha de la forêt de Jbel Bil Lahrich. Les conséquences sont dramatiques sur tous les plans. Les interfaces cultures-forêts et habitats-forêts sont l'un des moteurs de propagation des incendies. Cependant, les besoins en ressources forestières pour la population locale et surtout pour les services forestiers restent importants. L'approche statistique descriptive est importante pour évaluer le risque d'incendie, mais elle reste insuffisante. La cartographie du risque repose aujourd'hui sur les données de la télédétection. Les cartes produites dans le présent article ont exposé le degré de sévérité d'un incendie à deux échelles temporelles différentes. Les indices utilisés ont montré leur efficacité. Le dNBR a permis de cartographier les sites gravement brûlés. Les classes-seuils peuvent être améliorées et contextualisées avec les ambiances méditerranéennes.

Le dNVI a permis de suivre l'évolution de la régénération de la végétation. Les espèces climaciques ont montré leur rapide adaptation aux feux de forêt. Le sous-bois, même composé d'espèces hautement inflammables, s'est rapidement régénéré par le développement des rejets de souche. Le chêne liège, espèce climacique, a aussi montré ses facultés d'adaptation par ses différents modes de régénération. Les espèces introduites, quant à elles, se sont comportées de façon différente un an après l'incendie. Les *Eucalyptus* se sont rapidement régénérés alors que les nouvelles plantules du pin pignon sont encore absentes. Le problème des pinèdes réside essentiellement dans les attaques parasitaires et les insectes xylophages après les incendies et ceci peut contribuer à la contamination des espèces vivantes et des cultures dans les champs limitrophes.

Le code forestier, tel qu'il est rédigé aujourd'hui limite aux habitants l'utilisation du feu et punit toute personne allumant du feu en dehors des habitations et des bâtiments d'exploitation, à l'intérieur et à la distance de 200 m de toute forêt ou terrain broussailleux (section 4, article 93). Des notions comme « risque naturel, obligation de débroussaillage autour des foyers, interface habitat-forêt et cultures-forêts » doivent être introduites dans le nouveau code forestier. L'application d'une zone de servitude des forêts va réduire les risques d'occlusion du feu et limiter les pertes humaines et matérielles causées par les flammes. Les données de sévérité

et les cartes de la dynamique de la végétation peuvent aider à élaborer un plan de réhabilitation des espaces forestiers et le choix des espèces à reboiser après un incendie. Ils peuvent être utilisés pour estimer la gravité de la brûlure et évaluer les impacts sur l'érosion des sols, l'envasement des barrages et les inondations en aval.

BIBLIOGRAPHIE

- AMANDIER L., 2004. Le comportement du chêne-liège après l'incendie conséquences sur la régénération naturelle des subéraies. In Actes du Colloque international « Le Chêne-liège face au feu ». Vivès (France), 70-83.
- ANTROP M. & VAN EETVELDE, 2000. Holistic aspects of suburban landscapes: visual image interpretation and landscape metrics. *Landscape and Urban Planning*, **50**(1): 43-58.
- BANNARI A., TEILLET P.M. & RICHARDSON, 1999. Nécessité de l'étalonnage radiométrique et standardisation des images numériques de télédétection. *Canadian Journ. of Remote Sensing*, **25**(1): 45-59.
- CHANDER G. & MARHAM B.L., 2003. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures, and post-calibration dynamic ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **41**: 2674-2677.
- CORGNE S., 2004. *Modélisation prédictive de l'occupation des sols en Bretagne*. Thèse de Doctorat, Université de Rennes 2- Haute Bretagne, 230 p.
- DÉCAMPS H. & DÉCAMPS O., 2004. *Au printemps des paysages*. Paris, France, Édit. Buchet/Chastel, Collection Écologie, 235 p.
- DGF 2012. *La population forestière en Tunisie. Un référentiel économique et social national*. 39 p.
- ESCUIN S., NAVARRO R. & FERNÁNDEZ P., 2008. Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT & TM/ETM images. *International Journ. of Remote Sensing*, **29**(4): 1053-1073.
- GOUNOT, M., SCHOENENBERGER A., BORTOLI L., COINTEPAS J., DIMANCHE P., DUMONT H., FLORET CH., GUYOT L., JACQUINET J., MORI A., SOLER A., 1967. Notice détaillée de la carte phytocologique de la Tunisie septentrionale. Edition le centre d'études phytosociologiques et écologiques, Montpellier, France. 339 p.
- HADDOUCHE I., BENHANIFA K. & GACEMI M., 2011. Spatial analysis of forest regeneration after fire in the forest of Fergoug in Mascara, Algeria. *Bois et Forêts des Tropiques*, **307**: 24-31.
- HAMDI K., 2018. *Le feu et la forêt : Cartographie et étude du risque d'incendie de forêt à Béchateur (Bizerte)*. Mémoire de Master, Faculté des sciences humaines et sociales de Tunis (FSHST), 119 p.
- INSTITUT NATIONAL DE LA STATISTIQUE (INS), 2015. Recensement général de la population et de l'habitat, 2014, Vol. 2, 269 p.
- INSTITUT NATIONAL DE LA STATISTIQUE (INS) (2015)- Recensement général de la population et de l'habitat, 2014. Vol 2, 269 p.
- KEY H.C. & BENSON N., 2006. *Landscape Assessment: Ground measure of severity, the Composite Burn Index; and Remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio*. In FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System. General Technical Report. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep., RMRS-GTR-164-CD : LA.1-LA.51 + 4 Cheat Sheets.
- LAARIBI M., 2015. *L'espace forestier et l'homme dans la Mogodie (Tunisie septentrionale)*. Thèse de doctorat, Faculté des sciences humaines et sociales de Tunis (FSHST), 395 p.
- MEDDOUR-SAHAR O. & DERRIDJ A., 2010. Le risque d'incendie de forêt : évaluation et cartographie. Le cas de la wilaya de Tizi Ouzou, Algérie (période 1986-2005). *Sécheresse*, **21**(3): 187-195.
- PEREIRA J.M., 1999. A comparative evaluation of NOAA AVHRR vegetation indices for Burned Surface Detection and Mapping. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **37**: 217-226.
- SEBAI S., 2017. *Étude des facteurs de risque d'incendie dans la forêt domaniale de Takrouna (Sakiet Sidi Youssef)*. Thèse de doctorat, Faculté des sciences humaines et sociales de Tunis (FSHST), 389 p.
- TRABAUD L., 1983. Evolution après incendie de la structure de quelques phytocénoses méditerranéennes du Bas-Languedoc (Sud de la France). *Annales des Sciences Forestières*, **40**(2): 177-195.
- TRABAUD L., 1987. Dynamics after fire of sclerophyllous plant communities in the mediterranean basin. *Ecologia Mediterranea*, **XIII**(4): 25-37.
- USGS 2004. FIREMON BR cheat sheet V4 [on line] : https://burnseverity.cr.usgs.gov/pdfs/LAv4_BR_CheatSheet.pdf
- WASSER & CATTANU, 2018 [on line], <https://www.earthdatascience.org/courses/earth-analytics/multispectral-remote-sensing-modis/normalized-burn-index-dnbr>