

Khaled ABAZA^{1,2}
Aziza GHRAM-MESSEDI^{1,3}

**DYNAMIQUE DE LA VÉGÉTATION ET DE L'ÉROSION
APRÈS L'INCENDIE DE 2014 DANS LE MASSIF FORESTIER DE KESRA
(DORSALE CENTRALE EN TUNISIE)**

Résumé. Les feux constituent un paramètre essentiel de l'évolution des milieux forestiers en Tunisie. Au cours des dernières décennies, plusieurs massifs forestiers dans Dorsale tunisienne étaient le siège de graves incendies induisant d'immenses dégâts socio-économiques et environnementaux. L'objectif de cette étude est de suivre les comportements de la végétation et la dynamique de l'érosion après les perturbations engendrées par l'incendie de 2014 qui a ravagé près de 1400 ha de la belle pinède à pin d'Alep sur le versant Nord du massif de jebel Kesra. La méthodologie adoptée repose sur le calcul de l'indice de végétation par différence normalisé (NDVI) effectué sur trois dates différentes (2014, 2015 et 2022) et les observations sur le terrain. Les résultats obtenus montrent que les feux intenses ont entraîné une carbonisation totale de la biomasse végétale dans le secteur d'étude. L'analyse diachronique des valeurs de NDVI et les observations sur le terrain soulignent que ces écosystèmes forestiers se caractérisent par une résilience élevée et une grande capacité de régénération. La dynamique du paysage végétal post-incendie se fait avec un rythme très hétérogène selon les espèces et les compartiments morpho-pédologiques. Par ailleurs, la destruction totale de la couverture végétale dans le secteur incendié était à l'origine d'une déstabilisation profonde des milieux due au déclenchement d'une activité érosive intense et diversifiée.

Mots clés : incendie de forêt, perturbation, dynamique, observation sur le terrain, NDVI

¹ Université de Tunis, Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis, E-mail: khaledafifabaza@gmail.com

² Laboratoire «Biogéographie, Climatologie Appliquée et Dynamique Environnementale» (BICADE)

³ Laboratoire de « Cartographie Géomorphologique des Milieux, des Environnements et des Dynamiques » (CGMED), E-mail: ghramaziza@gmail.com.

Introduction

A l'instar de plusieurs pays dans le monde, la Tunisie a enregistré au cours des dernières années une augmentation considérable du nombre d'incendies des forêts et des surfaces ravagées par le feu (Lili-Chabaâne et al. 2005, Abdelmola 2005, Chriha et al. 2014, Abaza 2015, Gammar 2020, Klibi et al. 2016, Jaziri 2020...). Ce fléau a touché particulièrement les grands massifs forestiers de la Tunisie, aussi bien dans la Dorsale que dans la région tellienne.

Certes, les feux étaient du tout le temps une donnée constante de l'évolution des milieux forestiers en Tunisie. Mais, l'ampleur du phénomène ces dernières années et leur occurrence dans le temps et l'espace posent des questions sur l'évolution des écosystèmes forestiers après les incendies.

Le massif forestier de Kesra situé dans la Dorsale centrale en Tunisie était au cours de la dernière décennie le siège de plusieurs incendies, dont le plus important est celui qui a affecté en 2014 près de 1400 ha d'une belle pinède à pin d'Alep située sur le mi-versant nord du plateau de Kesra. Les conséquences soldées après le passage de feux étaient lourdes. Outre la carbonisation quasi-totale de la biomasse végétale, cette perturbation a engendré une défiguration remarquable du paysage, une perte considérable des habitats naturels et de la biodiversité animale et végétale et a amorcé une dynamique érosive par endroit, très active dans les milieux sinistrés.

Une des questions que l'on se pose après un incendie de forêt est quelle est la capacité des écosystèmes forestiers méditerranéens à se reconstituer par eux même après les perturbations causées par les feux, et par conséquent, quelle est l'opportunité d'engager des travaux pour favoriser leur reconstitution ? (Trabaud 1984, 1987, Bonnet 2003, Lili-Chabaâne et al. 2005, Khader et al. 2009, Meddour-Sahar et al. 2012, Abaza, 2015).

Basé sur des traitements radiométriques des images satellitales et plusieurs campagnes de terrain effectuées avant et après le passage de feu de l'été 2014 dans la pinède à pin d'Alep à Kesra, ce travail essaye de suivre la dynamique de la végétation et des processus de l'érosion hydrique après plus de huit ans du déclenchement de cet incendie.

1. Présentation du secteur incendié et de l'approche méthodologique suivie

1.1. Un secteur montagneux au cœur d'une pinède étendue et fréquemment perturbée par les feux

Le secteur d'étude occupe près de 1400 ha situé sur le versant Nord-est d'un petit plateau calcaire et marneux aux abords abrupts, dominant et culminant à 1176 m (figure 1). Il bénéficie d'une ambiance bioclimatique semi-aride supérieure (au sens d'Emberger) sensiblement marquée par l'effet combiné de la continentalité et l'altitude, avec une pluviométrie moyenne annuelle située autour de 440 mm (tableau 1).

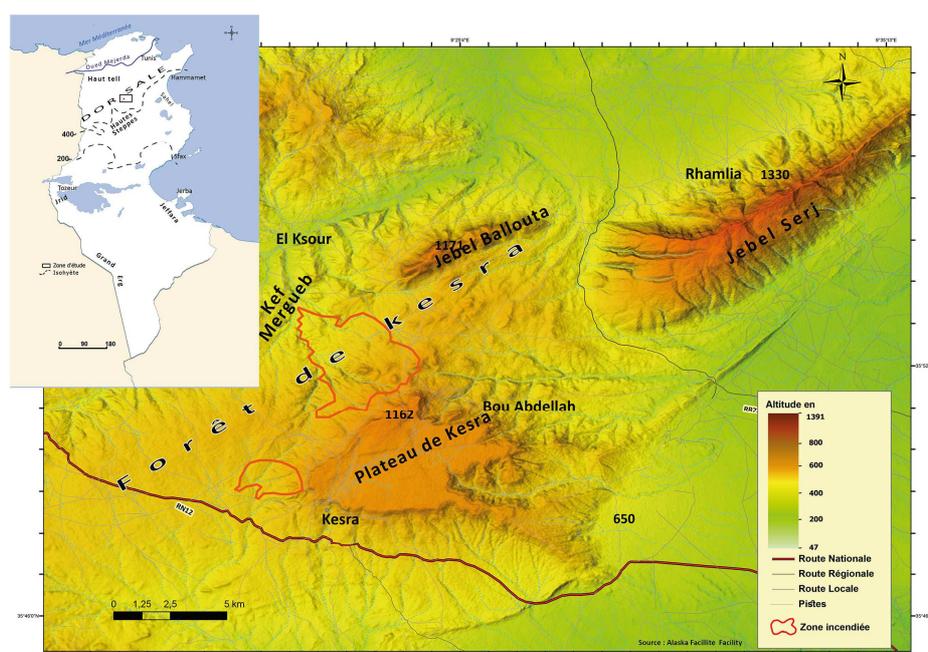


Figure 1. Localisation du secteur incendié en 2014 dans la pinède à pin d'Alep sur le versant Nord du plateau de Kesra

Du point de vue thermique, la température moyenne annuelle dans la station de Siliana⁴ (station de plaine abritée) est de l'ordre de 17.6°C. Toutefois,

⁴ Soit la station principale la plus proche du secteur d'étude.

le secteur d'étude enregistre souvent au cours des mois de juillet et août des températures maximales supérieures à 45°C. Ainsi, les fortes chaleurs estivales combinées à la sécheresse diminuent énormément l'humidité relative de l'air (tableau 2) et exposent la végétation dans le secteur d'étude davantage aux risques d'incendies.

Tableau 1

Pluviométrie moyenne annuelle en mm dans la station de Kesra entre 2012 et 2023

Moyenne annuelle	2012-2013	2013-2014	2014-2015	2015-2016	2016-2017	2017-2018	2018-2019	2019-2020	2020-2021	2021-2022	2022-2023
439	333	409	382	360	511	457	754	446	496	448	404

(Source: CRDA de Siliana, 2024)

Quant aux conditions météorologiques relevées le jour du déclenchement des feux, les valeurs enregistrées dans la station de Siliana sont proches des moyennes mensuelles et saisonnières (tableau 2). Par conséquent, les conditions météorologiques qui ont été régnées le jour de l'incendie n'ont joué qu'un rôle très secondaire dans la propagation des feux dans l'espace forestier.

Tableau 2

La situation météorologique dans la station de Silana le 28 août 2014 (le jour du déclenchement de l'incendie dans la pinède De Kesra).

Heure locale	Température ° C	Vent Km/h	Humidité %	Pression Pa.
13	34.7	7	17	1012.8
10	30.7	11	25	1014.4
07	20.9	4	59	1015.4

(Source: infoclimat.fr)

Avant l'incendie de 2014, ce secteur formait une belle futaie jardinée de pin d'Alep qui constitue l'un des peuplements forestiers les plus riches et étendus en Tunisie faisant partie du Domaine Forestier de l'Etat et géré par la Direction Générale des Forêts conformément aux textes du Code Forestier.

L'aspect très mosaïqué de la structure physionomique de cette pinède et la présence de plusieurs traces de passage des feux dans l'espace forestiers (matière végétale carbonisée, régénération post-incendie, prolifération

par endroit des espèces pyrophiles...) sont d'autant des indicateurs d'un espace forestier très perturbé par les feux.

Par ailleurs, cet espace forestier constitue le cadre de vie d'une paysannerie traditionnelle dépourvue en terres (tableau 3), qui intègre l'espace forestier voisin dans son système de production, où la forêt fournit aux riverains des produits ligneux et non ligneux divers (bois domestiques, bois de charbon, grains de pin d'Alep, plantes médicinales et aromatiques...) et sert aussi de pâturage local (caprin, bovin, ovin, abeilles). Des clairières agricoles nombreuses et vastes s'observent çà et là à l'intérieur du secteur d'étude et dans son voisinage immédiat occupant des versants et replats marneux. Un habitat dispersé sous forme des petits douars occupe le plus souvent les interfaces cultures-forêt. Ils se rattachent au centre rural⁵ de Bou Abdellah situé au milieu d'un ensemble de grandes clairières au Nord-est du secteur incendié. Ainsi, la forte fréquentation de cet espace forestier par les riverains l'expose directement à un risque élevé d'incendie.⁶

Tableau 3

Quelques caractéristiques socio-économiques des chefs des ménages dans le secteur d'étude

Population totale	Nombre de ménages	Taille moyenne des ménages (personne)	Taille moyenne de l'exploitation / ménage (ha)	Taille moyenne du cheptel/ménage (têtes)	Revenu moyen mensuel des ménages (D.T.)
1967	371	5.3	1.6	13.7	287

(Source: enquête personnelle 2022)

⁵ Déchra

⁶ Selon les données des Archives Forestières, l'incendie du 28 août 2014 dans le secteur d'étude avait comme cause l'incinération de chaumes dans les clairières céréalières proches de l'espace forestier.

1.2. Une approche basée sur le croisement des données issues des observations sur le terrain et du calcul des valeurs de l'INDV

1.2.1. Le suivi de la dynamique de la végétation et des milieux par l'observation directe sur le terrain

Pour observer les processus de la dynamique de la végétation et des milieux incendiés dans le secteur d'étude, nous avons adopté la méthode directe (Pavillard, 1935) ou méthode « diachronique ». Il s'agit de suivre les changements de la végétation (composition floristique et structure paysagère) et de l'état de surface entre 2014 et 2023 sur 5 placettes permanentes de 100 m² de superficie qui occupent des milieux variés (figure 2, tableau 4). La diversité des sites des placettes permet de cerner l'impact des conditions écologiques stationnelles et de la composition floristique de la végétation pré-incendie dans la régénération forestière post-incendie d'une part, et le suivi de divers processus de l'érosion hydrique dans les milieux incendiés au cours des neuf derniers ans après l'incendie de 2014.

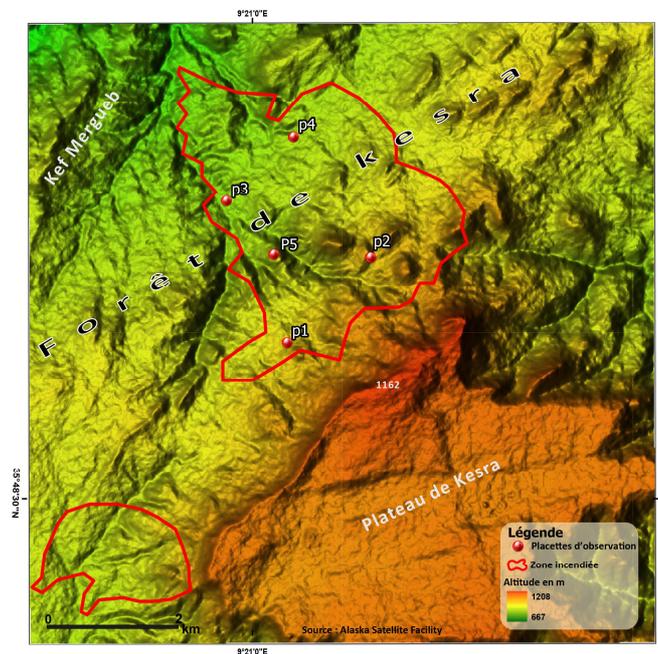


Figure 2. Répartition des placettes d'observation

Tableau 4

Caractéristiques des sites des cinq placettes d'observation

N° de placette	Caractéristiques			Coordonnées
	Morphologiques	Pédologiques	Occupation	
Placette 1	Versant Nord-ouest à pente forte situé à 980 m. d'altitude	Sol brut marneux et fortement décapé	-Ce site a été le siège d'un reboisement en pin d'Alep en 2016. -Matorral haut et clair à pin d'Alep et chêne vert	533495.74 m E 3967424.02 m N
Placette 2	Fond d'un ravin en « v » assez épais à 870 m. d'altitude	Sol argilo-mameux, profond, très caillouteux et riche en matière organique	-Matorral bas et clair à ciste de Montpellier piqueté de rares touffes de pin d'Alep et chêne vert	534807.00 m E 3968766.00 m N
Placette 3	Replat à 730 m. d'altitude	Sol rocailleux assez profond sur croûte calcaire.	-Site d'une ancienne clairière céréalière et oléicole. -Matorral moyen et clair à pin d'Alep	532628.87 m E 3969639.92 m N
Placette 4	Berge d'un ravin en « v », à 910 m. d'altitude en exposition Nord-ouest	Sol argileux assez profond et caillouteux.	-Matorral moyen assez et couvrant à pin d'Alep	533642.54 m E 3970620.81 m N
Placette 5	Sommet d'une colline à sommet aigu à près de 750 m. d'altitude en exposition Sud-est	Sol marneux assez épais et moyennement riche en matière organique	Matorral bas et très dense à ciste de Montpellier	533412.40 m E 3968794.59 m N

La technique d'observation consiste à confectionner chaque année (au printemps) des relevés phyto-écologiques de type Braun-Blanquet dans les placettes retenues décrivant principalement les formations forestières ligneuses ou herbacées vivaces et les principaux facteurs écologiques du milieu (types des reliefs et des sols, actions anthropozoïques, topoclimats, dynamique érosive, ...). La méthodologie consiste tout d'abord à intégrer au sein d'un SIG les informations géographiques pertinentes, telles que les cartes topographiques, et les données issues de télédétection. Les cartes topographiques ont servi de base pour l'extraction de données de fond de carte (infrastructure routière, réseau hydrographique, toponyme)

et des données hypsométriques (courbe de niveau et point d'altitude). A partir des données issues de télédétection nous avons obtenu un modèle numérique du terrain. Il s'agit plus précisément des données Radar PALSAR qui est un radar à synthèse d'ouverture (SAR) en bande L et qui peut acquérir des produits de haute résolution dont le TanDEM-X fournis à 12 m au format GeoTIFF. Ce MNT est téléchargé du site ASF⁷ (Alaska Satellite Facility) qui depuis août 2016, fournit des modèles numériques d'élévation pour quelques régions du monde. Ce modèle numérique de terrain a été couplé aux données hypsométriques (courbes de niveau essentiellement) afin de réaliser une carte d'altitude. L'utilisation des formules empiriques et des différentes applications, intégrées dans les logiciels dédiés au Système d'Information Géographique (SIG), ont permis de générer les différentes cartes thématiques dérivées du modèle numérique du terrain (MNT). Il s'agit de la carte des pentes et celle de l'exposition. Ces différentes cartes permettront de mieux cerner la problématique et d'appréhender le risque d'incendie dans la zone d'étude et de mieux cerner la vulnérabilité de la forêt de Kesra (Assali et al. 2016, Rahmani et al. 2019, ...). Notre travail s'est basé aussi sur les traitements des images issus de télédétection. Trois dates sont choisies (2014, 2015 et 2022) pour effectuer une étude diachronique afin de suivre l'évolution des valeurs d'indice de végétation avant et après l'incendie (figure 3). Les images exploitées dans ce travail appartiennent à différents capteurs (Landsat OLI et Sentinel 2) et chaque capteur a ses propres caractéristiques. Dans ce cadre, l'homogénéisation de ces images était une étape fondamentale de ce travail. Afin de pouvoir superposer et comparer surtout au niveau de la résolution spatiale. Pour ce passage de la résolution de 30 m (Landsat) à 10 m (Sentinel). Le rééchantillonnage est un processus qui consiste à interpoler pour chaque pixel des nouvelles valeurs à partir des valeurs existantes au cours du redimensionnement spatial. La méthode de rééchantillonnage utilisée est la convolution cubique. (Keys R.G., 1981)

L'image Landsat 8 OLI utilisée date de l'année 2014. Elle est téléchargée depuis le site de l'USGS⁸. Cette image est aussi en réflectance de niveau 2. Les images Sentinel2 utilisée, datent de 2015 et 2022, sont téléchargées depuis

⁷ <https://asf.alaska.edu/>

⁸ <https://earthexplorer.usgs.gov/>

le site THEIA⁹ (pôle de données et de services surfaces continentales). Ces données sont en réductance de niveau 2. Elles fournissent des réflectances de surface, corrigées des effets atmosphériques. Une série de prétraitements est effectuée sur ces images en premier temps. Dans un deuxième temps, un calcul d'un indice simple mais efficace pour quantifier la végétation verte. Il s'agit de l'indice de végétation par différence normalisé « NDVI ». Cet indice normalise la diffusion des feuilles vertes dans les longueurs d'onde du proche infrarouge avec l'absorption de la chlorophylle dans les longueurs d'onde rouges (Bartholomé E., 1993). Le néocanal (une seule bande) résultant présente une gamme de valeur allant de -1 à +1. Nous avons alors affecté une classification et on a appliqué une gamme de teinte de vert-orange-rouge proportionnellement à un gradient croissant d'activité végétale, c'est-à-dire de la photosynthèse, allant du vert pour une activité chlorophyllienne très élevée, au rouge pour l'absence de photosynthèse en passant par l'orange pour une activité moyenne.

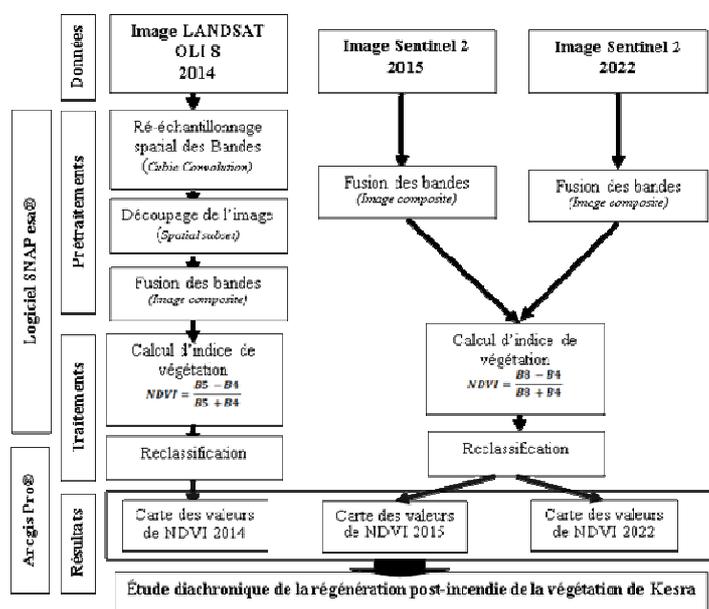


Figure 3. Approche méthodologique suivie dans l'étude diachronique de la régénération post-incendie de la végétation de Kesra

⁹ <https://www.theia-land.fr/>

2. Une régénération spontanée post-incendie très hétérogène

2.1. Essai de reconstitution de la végétation pré-incendie

En se basant sur la documentation (Gammar 1979 et 2001 et Abaza 2017), l'observation des peuplements forestiers échappés aux feux situés au voisinage immédiat du secteur sinistré et les valeurs de l'IDVI de l'avant l'incendie (figure 4), nous avons pu reconstituer les principales caractéristiques physionomiques et floristiques de la végétation du secteur d'étude d'avant l'incendie de 2014 (photo 1).

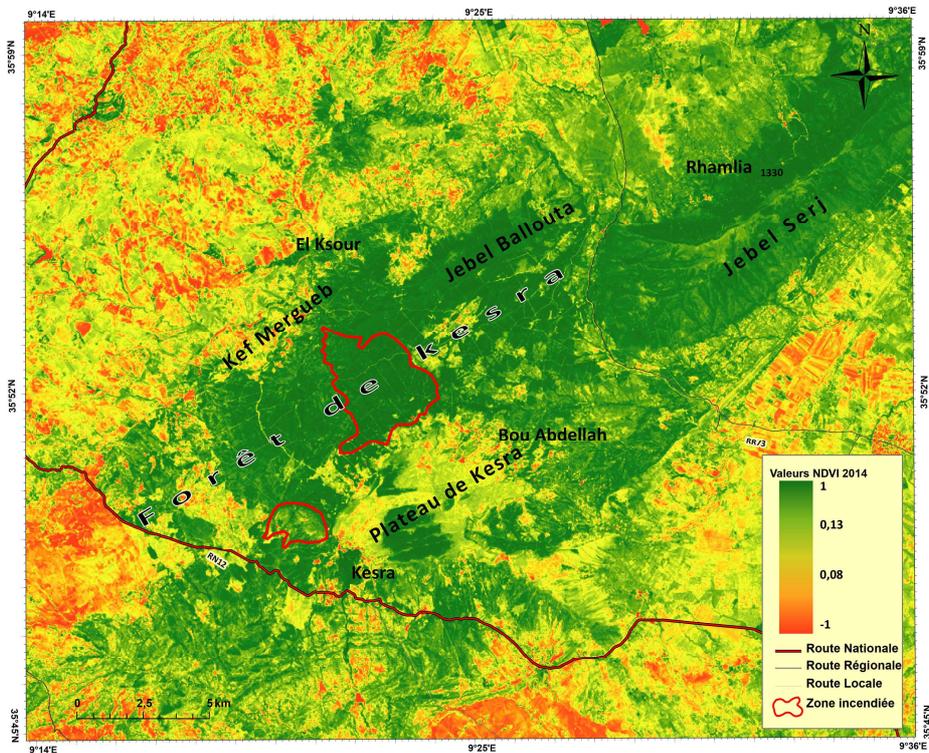


Figure 4. Les valeurs de l'IDVI en 2014 (avant l'incendie)

Au moins 5 strates bien distinctes peuvent être observées dans cette végétation :

- Une strate forestière composée par des sujets âgés de pin d'Alep de plus de 8 m de haut et bien couvrante (taux de recouvrement végétal supérieur à de 80 %).
- Une strate ligneuse haute et ouverte (taux de recouvrement végétal inférieur à 40 %) constituée de sujets de pin d'Alep de taille souvent inférieure à 5 m.
- Une strate moyenne de faible recouvrement végétal (inférieur à 25%) était occupée par de grands fourrés de chêne vert et de rares pieds de lentisque, oléastre, filaire et genévrier oxycèdre.
- Une strate buissonnante très claire (taux de recouvrement végétal moins de 15%) constituée par des chaméphytes éricoïdes (romarin, globulaire, cistes, bruyère, genêts, fumanas...).
- Une strate herbacée est une pelouse essentiellement graminéenne, avec surtout : *Bromus ssp.*, *Scleropoa rigida*, *Trifolium ssp.*, *Lolium perenne*, *Urtica pilulifera*, *Coronilla valentina*... Par ailleurs, ce paysage végétal renferme sur les hauts versants ombragés un groupe d'espèces indicatrices de bon état de la forêt et du sol, où les plantes grimpantes et humicoles sont nombreuses: *Viburnum tinus*, *Clematis flamula*, *Lonicera implexa*, *Colutea arborescens*, *Prasium majus*, *Arbutus unedo*, *Jasminum fruticans*, *Asparagus acutus*... indiquant le bon état de la végétation et du sol. Alors que dans les sites ensoleillés, notamment sur les sols érodés apparaît un groupe d'espèce telles que l'alfa (*Stipa tenacissima*), la stipe tortille (*Stipa retorta*), le ciste de Liban (*Cistus libanotis*), l'astragale (*Astragalus armatus*).



Photo 1. Une pinède dense et étendue dans le secteur d'étude avant les feux de 2014

La végétation des fonds des vallées profondes dans le secteur d'étude étaient des milieux assez particuliers. Elle se distinguait par une futaie encore haute et pluristratifiée et riche en espèces ripicoles. On y trouvait : *Nerium oleander*, *Tamarix ssp.*, *Populus alba*, *Salix pedicellata*, *Rosa sicula*, *Rosa canina*.

Du point de vue morpho-dynamique, cette végétation arrivait avant l'incendie de 2014 à contrôler le ruissellement, favoriser l'infiltration, améliorer le bilan hydrique des sols, régulariser les cours d'eau et limiter l'érosion sur les versants marneux d'une extrême sensibilité.

2.2. Une carbonisation quasi-totale de la végétation par le feu

La présence d'une biomasse végétale pré-incendie à forte densité et très inflammable (aiguilles, cônes et brindilles de pin d'Alep, couches épaisses de litière...), et la chute sensible de l'humidité relative le jour de l'incendie due à la forte chaleur et au sirocco expliquent l'intensité élevée des feux (photo 3) et leur propagation très rapide dans l'espace forestier lors du sinistre. En effet, l'incendie a engendré une carbonisation quasi-totale de la végétation et de la litière sur une superficie totale de près de 1400 ha (photo 2).



Photo 2. Une destruction quasi-totale de la végétation par les feux de 2014 (en arrière plan, le site de la placette 5)



Photo 3. L'intensité des feux de 2014 dans le secteur incendié

Cette situation est attestée par la chute sensible des valeurs de l'IDVI dans le secteur d'étude juste après le passage des feux (figure 5) par rapport

à la situation d'avant l'incendie (figure 4) et aux valeurs de l'INDVI des peuplements forestiers échappés aux feux situés à proximité immédiate de la végétation sinistrée.

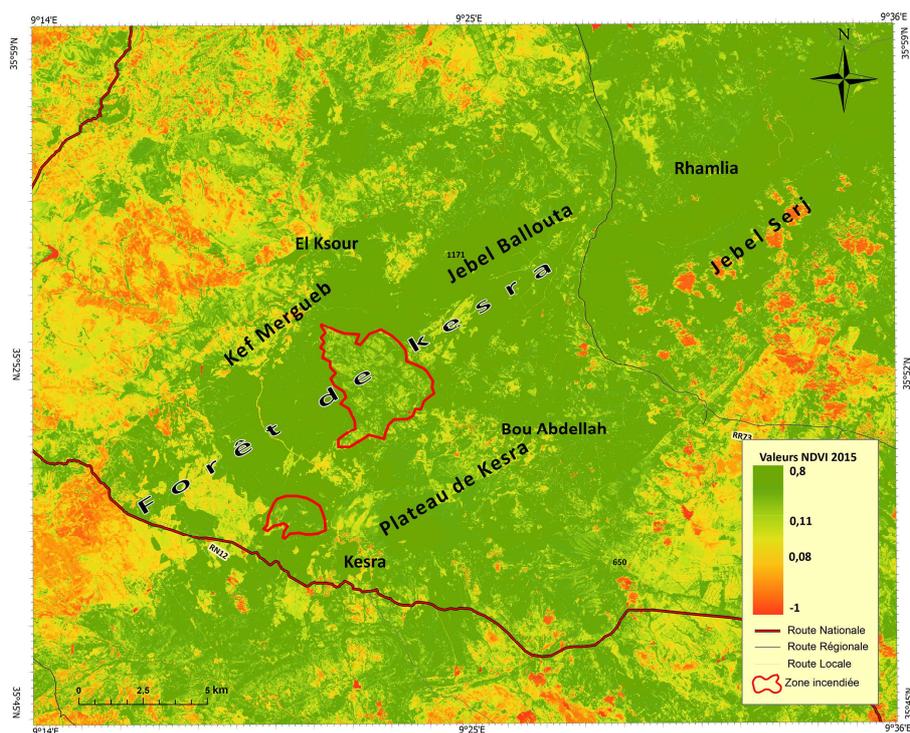


Figure 5. Les valeurs de l'IDVI en 2015, un an après l'incendie

2.3. Une régénération post-incendie très nuancée

2.3.1. L'échec relatif des actions de reboisement des milieux incendiés

Après près de 2 ans de l'incendie de 2014, des opérations de reboisement en pin d'Alep ont été effectuées par de volontaires de la Société Civile avec le soutien technique des Services Forestiers local et régional. Cette action a intéressé environ une étendue de 400 ha sur des replats situés jouxtant la route reliant le village de Bou Abdellah à la ville de Kesra

ancienne. Le résultat de ce reboisement était assez décevant, puisque son taux de réussite n'avait pas dépassé le 20%. L'échec relatif de cette revégétalisation artificielle des milieux incendiés s'explique par des contraintes techniques (reboisement dans des trous non appropriés, manque d'entretien et surtout d'irrigation après le reboisement, destruction des plantules par le piétinement des troupeaux...) et climatiques (une période sèche longue et intense survenue juste après le reboisement). Par conséquent, la reprise de la végétation après l'incendie dans le secteur d'étude est due essentiellement à une régénération spontanée.

2.3.2. Une modification profonde de la composition floristique de la végétation préexistante

Par rapport à la situation d'avant l'incendie de 2014, les observations sur le terrain faites en 2023 dans les 5 placettes d'observation permettent de constater que les feux ont engendré une modification profonde de la composition floristique de la végétation préexistante marquée par la prolifération spectaculaire des diverses espèces pyrophiles qui ont pleinement profité des feux (cendres) et de l'ouverture des milieux (figure 8, placettes 1, 2 et 5). Nous citons en particulier ; *Cistus monspeliensis*, *Cistus Libanotis*, *Globularia alypum*, *Fumana ericoides*, *Gesnista microcephala*, *Spartium junceum*, *Erica multiflora*, *Astragalus armatus*... En outre, d'autres espèces telles que l'arbousier (*Arbutus unedo*), la filaire (*Phillyrea angustifolia*), la bruyère multiflore (*Erica multiflora*), le lentisque (*Pistacia lentiscus*), le chêne vert (*Quercus ilex*) connaissent une réinstallation importante par rejets de souches et arrive souvent à reconquérir les milieux incendiés sous forme de matorrals denses constitués de grandes touffes (photo 4).



Photo 4. Les feux de 2014 ont engendré une prolifération des cistes (notamment, le ciste de Montpellier et le ciste de Liban) dans les différents milieux incendiés



Photo 5. Régénération remarquable des feuillus (ici, le chêne vert) sur le replat après l'incendie de 2014

Cependant, la comparaison des données des figures 8 et 9 autorise la mise en évidence des nuances sensibles dans le rythme de la reprise de la végétation post-incendie en rapport avec l'influence des conditions écologiques stationnelles, notamment la microtopographie et l'orientation.

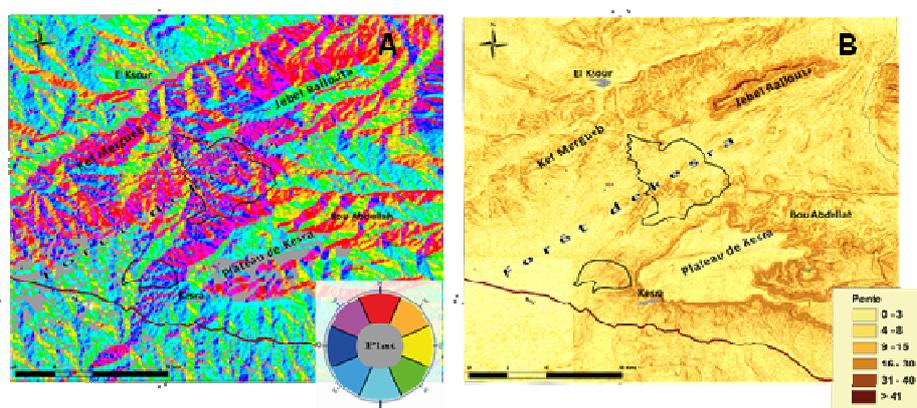


Figure 6. A. Carte des expositions, B carte des pentes

A ce propos, trois constats sont à soulever :

- Le développement spectaculaire des chaméphytes pyrophiles notamment, les cistes (ciste de Montpellier et ciste de Liban) et la bruyère multiflore semble être plus avantage par les orientations ensoleillées ; Est, Nord-est, Sud-est (figure 8, placette 5).
- Les feuillus (surtout le chêne vert, l'oléastre et le lentisque) se régénèrent davantage sur les replats et dans les talwegs, en particulier sur des sols profonds et humifères (figure 8, placette 5) et le plus souvent en expositions ombragées (Nord et Nord-ouest).

Par opposition aux feuillus et cistes, les conifères (pin d'Alep et genévrier oxycèdre) connaissent une régénération modeste dans toutes les placettes d'observation. Cette situation pourrait être expliquée par la faible quantité des semences des pins stockée dans le sol après l'incendie, en rapport avec l'intensité élevée des feux qui ont détruit quasi-totalement les cônes et les graines des pins dans les différents milieux incendiés, comme en témoigne les nombreux cônes de pin d'Alep entièrement carbonisés rencontrés dans les différentes placettes d'observation.



Photo 6. Un jeune semis d'un an au pied d'un vieux pin brûlé

En outre, le manque de semences serait dû à la sur-collecte illicite et non organisée des graines de pin d'Alep par les paysans au cours des

années antérieures aux incendies du mois d'août 2014, ce qui a réduit énormément le stock des graines dans les sols. Toutefois, l'amélioration sensible du taux des individus de pin d'Alep dans les placettes 1 et 2 (figure 8) s'explique d'une part, par la microtopographie plane des ces sites (un replat assez étendu dominé par des versants à pentes assez fortes, figure 6) qui favorise le stockage des semences de pin d'Alep transporté par le ruissellement des pentes voisines dans le sol.

2.3.3. Une régénération selon des rythmes très variés

Après près de huit ans du passage de feux, la figure 7 montre une reprise remarquable de l'activité chlorophyllienne de la végétation dans le secteur d'étude témoignant d'une régénération intense à la fois spontanée et artificielle de la végétation, mais selon un rythme très variable selon les caractéristiques des sites et les années.

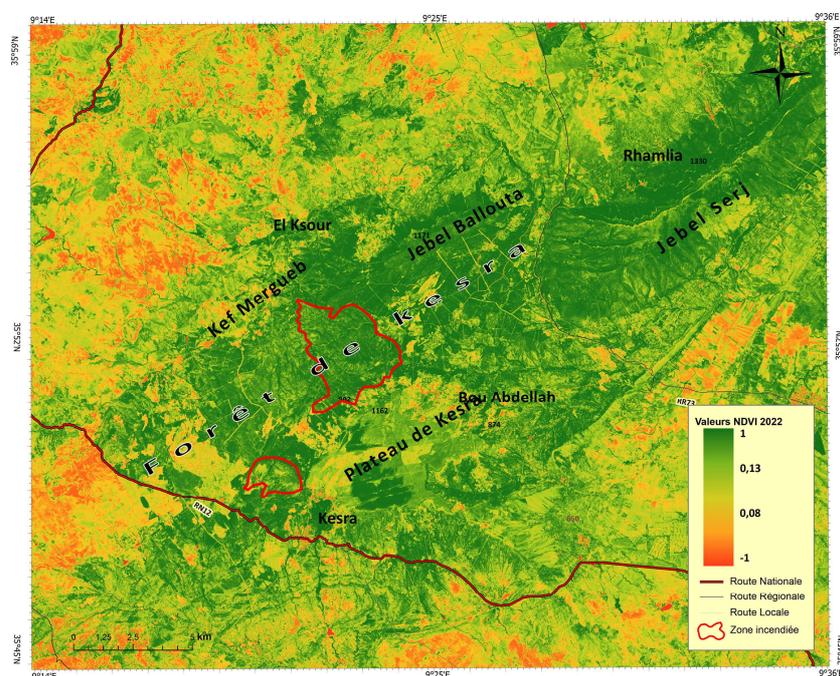


Figure 7. Les valeurs de l'NDVI en 2022 (huit ans après l'incendie)

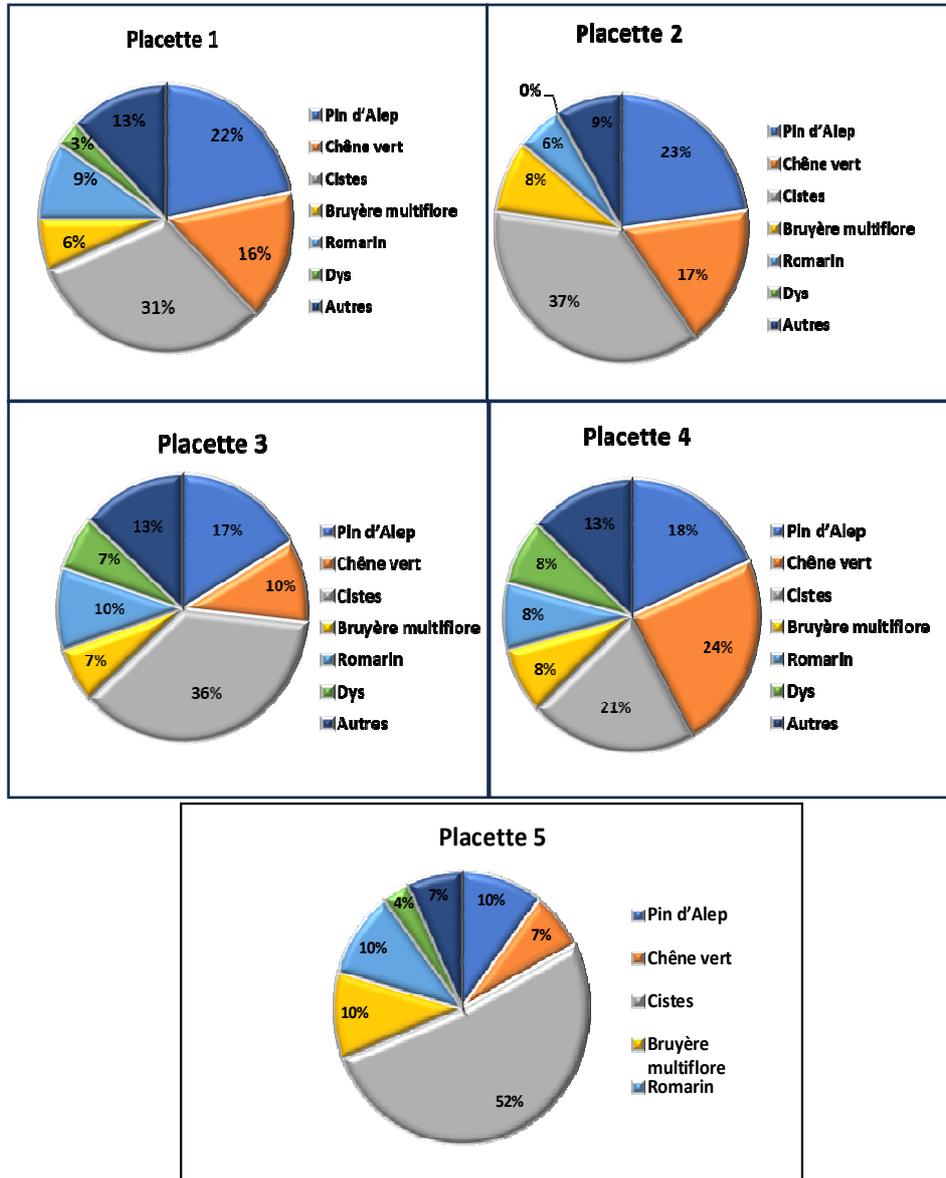


Figure 8. Composition floristique de différentes placettes d'observation en 2023

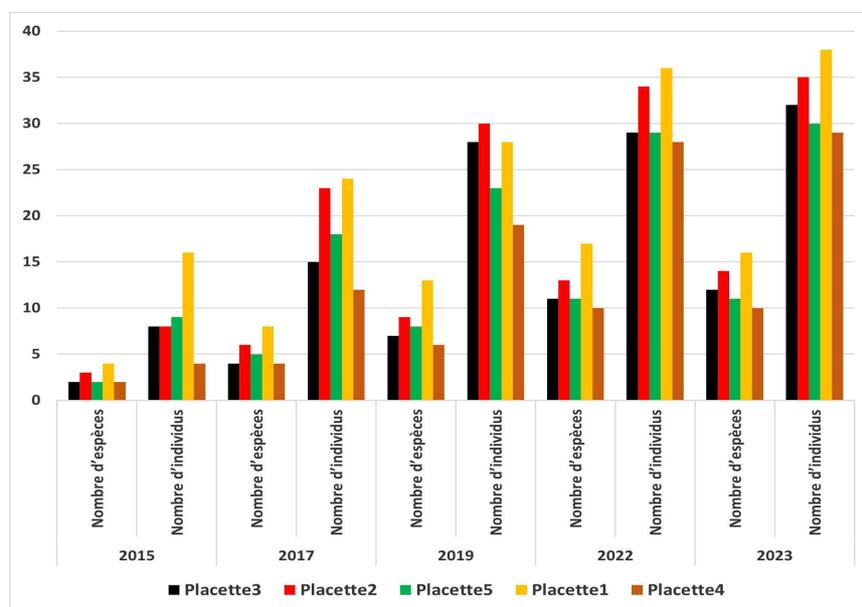


Figure 9. Évolution des nombres d'individus et d'espèces dans les cinq placettes d'observation entre 2015 et 2023

La figure 9 souligne que la vitesse de la reprise de la végétation dans le secteur incendié exprimée par le nombre d'individus et d'espèces recensés entre 2014 et 2023 croît graduellement entre 2014 et 2023 dans toutes les placettes d'observation. A cet effet, la figure 9 et les données du tableau 1 permettent de mettre en relief les constats suivants :

- La reprise de la végétation était lente pendant les années sèches, notamment au cours des deux années après le passage des feux ; 2013-2014, 2014-2015, 2015-2016 et 2022-2023. Au contraire, les années particulièrement pluvieuses ; 2016-2017 et 2018-2019 ont connu une réinstallation rapide de la végétation ligneuse et herbacée dans les cinq placettes d'observation.
- La vitesse de la réinstallation de la végétation (espèces et individus) est devenue très lente au cours des trois dernières années dans toutes les placettes d'observation ce qui indiquerait une certaine stabilité dans le rythme de la reprise végétale dans les différents milieux incendiés, surtout pour les espèces qui se régénèrent par graines (pin d'Alep, cistes, ...), en rapport avec l'épuisement des stocks des semences dans le sol.

3. Une déstabilisation importante des milieux sinistrés

La carbonisation quasi-totale de la végétation, le caractère violent des pluies, la prédominance des sols jeunes développés sur des roches marneuses à résistance limitée et la raideur des pentes dans le secteur d'étude étaient des conditions favorables au déclenchement d'une dynamique érosive active après l'incendie de 2014. En effet les observations de terrain nous ont permis de soulever une gamme assez variée des manifestations d'érosion développées dans le secteur après l'incendie de 2014, témoignant ainsi, d'une déstabilisation assez généralisée des milieux. D'ampleur et d'aspects très variables, ces manifestations d'érosion peuvent être divisées en :

3.1. Le ruissellement embryonnaire

Ce processus érosif a intéressé l'ensemble du secteur incendié suite aux premières pluies automnales qui ont survenus juste après l'incendie de 2014. Il se manifeste sous forme de chevelu de filets très discontinus dont la potentialité érosive est réduite. Toutefois, la réinstallation spontanée de la végétation sous l'aspect d'un matorral bas dense à romarin, cistes, bruyère pin d'Alep a entraîné dans plusieurs milieux l'atténuation sensible de ce processus érosif témoignant d'une stabilisation progressive des milieux.

3.2. Le décapage généralisé de la litière et des cailloux

Il s'agit d'un ruissellement diffus le plus souvent incapable de creuser mais qui provoque un décapage massif et parfois continu de la litière et de la végétation carbonisée et une exportation massive des débris sous l'aspect d'un pavage caillouteux quasi-généralisé (photo 7). Un tel phénomène a été particulièrement visible après des averses enregistrées au cours de l'automne et l'hiver 2014 et 2015 sur les versants à pente fortes. La matière transportée par le ruissellement est souvent déposée derrière des obstacles (souches et/ou branches des plantes carbonisées, rochers, blocs...) ou dans les fonds des ravins ou sur des replats. Par endroit, l'accumulation de la litière sous forme d'une couche très épaisse

a gêné la régénération spontanée de la végétation après les feux. En outre, cette érosion en nappe a engendré dans les milieux non ou très peu couverts par la végétation l'apparition de la roche mère ou les croûtes calcaires en place.



Photo 7. Affleurement en surface de la croûte calcaire dans la placette 3, suite au décapage total du sol observé six ans après l'incendie de 2014

3.4. Le recul des têtes de ravin

La destruction totale de la végétation par les feux a entraîné le recul des têtes de plusieurs ravins, notamment sur les pentes raides. Ce type de recul se manifeste par endroit, sous forme de marmite d'érosion, positionnée au niveau de la tête de ravin. Un tel phénomène était à l'origine d'une augmentation sensible de la longueur de ces ravins par érosion régressive (photo 8).



Photo 8. La destruction de la couverture végétale après l'incendie de 2014 a engendré par endroit, le façonnement de petites marmites d'érosion (ici, placette 4)

3.5. Le ruissellement concentré élémentaire

Favorisé par un réseau dense de sentiers façonné par les piétinements des paysans et leurs troupeaux, le ruissellement diffus commence après plus de 4 ans de l'incendie à se concentrer pour donner naissance à des rigoles et des ravines de taille décimétrique ayant le plus souvent l'aspect de griffures et griffes (photo 8). Ces signes d'érosion marquent surtout les sites de rupture de pentes (talus, talwegs...) taillés dans des roches d'inégale résistance (marne/argiles/ marnes/calcaires/argiles calcaires) et les milieux dépourvus de végétation tout au long de schémas de l'écoulement. Par endroit, la concentration localisée des eaux de ruissellement a donné naissance à un réseau ravinaire assez hiérarchisé (photo 9).

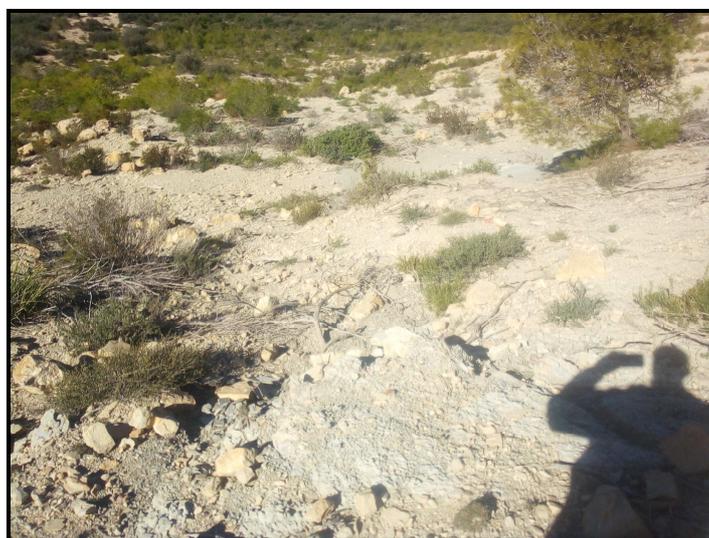


Photo 9. Apparition d'un réseau ravinaire sur des substrats marneux résultant de la concentration localisée du ruissellement observé après l'incendie de 2014

3.6. Vers un rétablissement progressif de l'équilibre du milieu

La régénération spontanée parfois spectaculaire de la végétation et les actions de reboisement entreprises suite à l'incendie de 2014 dans le secteur d'étude donnant naissance à un matorral moyen de pin d'Alep par endroit très couvrant (Cf. plus haut) ont entraîné l'amorce d'une nouvelle dynamique matérialisée par un ralentissement sensible de l'activité de l'érosion dans plusieurs sites. En effet, nos observations de 2023 ont permis de relever plusieurs signes de début de stabilisation des milieux dans le secteur qui ont été perturbé par les feux. En effet, dans plusieurs endroits, les surfaces sous les fourrés de pin d'Alep, lentisque et chêne vert situés sur les replats et dans les fonds des ravins ne montrent actuellement aucune trace d'écoulement et de transport, ce qui permet de conclure que la rétention des eaux pluviales par la végétation et l'infiltration est totale. Dans d'autres milieux, les signes de ruissellement embryonnaire et de pavage caillouteux dans le matorral bas peu couvrant à romarin et cistes (figure 8, placettes 3 et 5) ont été couverts par une couche assez épaisse de litière et de sol brut. Enfin, sous les grandes

touffes de chêne vert et lentisque issues de la régénération post-incendie, plusieurs signes de premiers indices d'une décomposition de la litière, des mycéliums, de granules de matière organique humifiée et de couleur noirâtre ont été soulevés (figure 8, placette 4).

Conclusion

Notre objectif était de suivre par télédétection et observations de terrain, la dynamique de la végétation et du milieu après l'incendie qui a ravagé en 2014 une partie de la pinède à pin d'Alep sur le versant Nord du plateau de Kesra. Les résultats obtenus soulignent une perturbation profonde des milieux causée par les feux qui a affecté à la fois leurs composantes biotiques (essentiellement la végétation) et abiotique (l'état de surface). Après une carbonisation quasi-totale de la végétation, les différents milieux incendiés ont enregistré une reprise végétale significative entre 2014 et 2023. Par ailleurs, des nuances spatiales parfois très remarquables dans la régénération de la végétation post-incendie selon les espèces végétales et les compartiments morpho-pédologiques des milieux ont été mis en évidence. Parallèlement, la dénudation des sols était à l'origine du déclenchement d'une dynamique érosive parfois assez rapide, matérialisée par la prolifération d'une gamme assez variée de formes d'érosion. Toutefois, plusieurs milieux ont montré ces dernières années un rétablissement progressif de leur équilibre en rapport avec l'amélioration du taux de recouvrement de leur végétation. Cette dynamique de la végétation et des milieux met en évidence, d'une part, la forte capacité d'adaptation et de résilience de la végétation méditerranéenne semi-aride face aux feux et le rôle des feux dans le rajeunissement des peuplements forestiers dans les milieux méditerranéens semi-arides d'autre part.

La lutte contre la pauvreté et l'amélioration des conditions de vie de la petite paysannerie riveraine de l'espace forestier par la diversification de leurs sources de revenus et l'instauration des activités non nuisibles à la forêt (apiculture, tourisme-nature, ...) pourraient atténuer sensiblement le risque des feux de forêt dans le secteur d'étude. En contre partie, l'amélioration des équipements et des moyens d'intervention et de

contrôle de l'espace forestier paraît une condition nécessaire pour faire face aux feux des forêts et atténuer leurs dégâts.

Bibliographie

- ABAZA, K., 2015, « Analyse de la régénération spontanée de la végétation post-incendie dans la forêt de Dar Chichou (Cap Bon, Tunisie Nord-Orientale) », *Revue Roumaine de Géographie*, n°59, p. 159-172.
- ABAZA, K., 2017, « Les géosites à Kesra (Dorsale tunisienne) : Diversité des paysages, patrimonialisation et développement territorial local », *Revue Roumaine de Géographie*, Volume 61 (1), p. 39-85.
- ABDELMOULA, K., 2005, "Évaluation de l'efficacité des réseaux de coupures de combustible sur la réduction du risque d'incendie à l'échelle du massif forestier", Thèse, Université de Provence Aix-Marseille I, 246 p.
- ASSALI, F., MHARZI-ALLOU, H., ROUCHDI, M., BADRAOUI, M., 2016, « Modélisation et cartographie du risque d'éclosion d'incendie de forêt dans le nord-ouest du Maroc (région de chefchaouen-ouazzane) », *Rev. Ecol. (Terre et Vie)*, 71, p. 111-128.
- BARTHOLOME, E., 1993, "Le graphique « binormalisé » : un outil d'étalonnage des indices de végétation - application aux cultures sahéliennes" in *Téledétection et cartographie*. Éd. AUPELF-UREF. Les Presses de l'Université du Québec. p. 187-201
- BONNET, V. et THIERY, T. 2003, « Analyse spatiale et fonctionnelle de la réponse de la végétation après incendie en basse Provence calcaire », *Forêt méditerranéenne*, t. XXIV, n° 4, p. 385-402.
- CHRIHA, S. et SGHARI, A., 2014, « Les incendies de forêt en Tunisie, les séquelles irréversibles de la révolution de 2011 », *Revue Méditerranée*, p. 87-93.
- GAMMAR, A.M., 2001, "Le patrimoine naturel des Kesraouis : La composante végétale", in *N. SKIK : patrimoine et co-développement durable en Méditerranée occidentale*, Institut National du Patrimoine, p. 283-294.
- GAMMAR, A.M., 1979, Étude et carte écologique de la région de Kesra (Dorsale tunisienne), Thèse, Grenoble, 127 p.
- GAMMAR, A.M., 2020, « Inventaire et caractérisation des incendies de forêts et des espaces affectés en Tunisie » « Géographie et Développement » *Revue de l'Association des Géographes Tunisiens*, n° 20, p. 25-42.

- JAZIRI, B., 2020, « Suivi par télédétection de la dynamique de la végétation de Jbel Bil Lahrish », *Geo-Eco-Trop*, 19 p.
- KEYS, R.G., 1981, « Cubic Convolution Interpolation for Digital Image Processing. IEEE transactions on acoustics », *speech and signal processing*, vol. assp-29, n° 6.
- KHADER, M., BENABDALI, K., MEDERBALK, Y., FEKIR-GUEDDIM, R. et MEKKOUS, B., 2009, « Étude du risque incendie à l'aide de la géomatique (cas de la forêt de Nesmouth, Mascara) », *Rev. Mediterranea*, 20 p.
- KLIBI, R. et GRECU, F., 2016, "Incendiile de padure din regiunea Tunis" în vol. Florina Grecu, *Hazarde și riscuri naturale*, Editura Universitară, 2016, București.
- LILI CHABAANE, Z., BOUAFI, H., KHALDI, A., CHAKROUN, H. et CALOZ, R., 2005, « Télédétection et analyse spatiale de la régénération forestière post-incendie dans le massif de Bou Kornine au sud de Tunis », *Télédétection*, Vol. 5, n° 1-2-3, p. 161-181.
- MEDDOUR-SAHAR, O., DERRIDJE, A., 2012, « Bilan des feux de forêts en Algérie : analyse spatio-temporelle et cartographie du risque (période 1985-2010) », *Rev. Sécheresse*, 23 :133-141
- PAVILLARD, J., 1935, *Éléments de sociologie végétale (phytosociologie)*. Paris : Hermann & Cie, Éditeurs, 1 vol., 120 p.
- RAHMAN, S. et BENMESSAOUD, H., 2019, « Modélisation et cartographie du risque incendie de forêt dans la partie orientale des Aurès (Algérie) », *forêt méditerranéenne* t. XL, n° 4.
- TRABAUD, L., 1984, « Évolution après incendie de la structure de quelques phytocénoses méditerranéennes du Bas Languedoc (Sud de la France) », *Annales des Sciences Forestières*, 40 (2), p. 177-195.
- TRABAUD, L., 1987, « Dynamics after fire of sclerophyllous plants communities in the Meditranean basin », *Ecologia Mediterranea*, XIII (4), p. 25-37.

DECLARATION OF CONFLICTING INTERESTS

The authors declared no potential conflicts of interest with respect to the research, authorship, and/or publication of this article.