

Analyse diachronique de la dynamique forestière et de la susceptibilité aux incendies de forêt: Cas de la province de Fahs-Anjra, Maroc

[Diachronic analysis of forest dynamics and susceptibility to forest fires: Case of the province of Fahs-Anjra, Morocco]

Nisserine BEN DRISS

Structure de recherche: Dynamique Spatiale et Développement Territorial, Laboratoire de recherche: Homme Espace et Développement, Département de Géographie, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Université Abdelmalek Essaâdi, Tétouan, Morocco

Copyright © 2023 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The province of Fahs-Anjra is a province characterized by a very significant forest area, a very rich and diversified biodiversity. The environmental problems in the province are multifaceted and continue to take on an uneven scale and manifest themselves on various scales: entire forests are destroyed and species disappear, ecological disasters multiply, water becomes a rare resource whose uses require more and more arbitration, etc.

Faced with the urgency of the ecological crisis, perceived through climate change, natural disasters and the scarcity of natural resources, the concern to control environmental problems through sustainable development has become a global concern, which is growing over the years. In fact, the degradation of forest space, caused by human activities and climate change, poses major challenges to sustainable development.

Forest fires are the main cause of degradation of these forests; almost a minimum of 200 serious forest fire incidents were recorded between 2008 and 2020, that is to say, an average of 16 fires each year. To deal with forest degradation and monitor their condition, different techniques and methods have been developed for a long time: Geographic Information Systems (GIS) make it possible to georeference observed degradation, and remote sensing, which thanks to satellite images, makes it possible to map plant cover at very varied time and space scales.

KEYWORDS: Forest, fires, SIG, Remote Sensing, province of Fahs-Anjra.

RESUME: La province de Fahs-Anjra est une province caractérisée par un espace forestier très important, une biodiversité très riche et diversifiée. Les problèmes de l'environnement dans la province sont multiformes et ne cessent de prendre une ampleur inégale et de se manifester à diverses échelles: des forêts entières sont détruites et des espèces disparaissent, les catastrophes écologiques se multiplient, l'eau devient une ressource rare dont les utilisations nécessitent de plus en plus d'arbitrage etc.

Face à l'urgence de la crise écologique, perçue aussi bien à travers les changements climatiques, les catastrophes naturelles et la raréfaction des ressources naturelles, le souci de maîtrise des problèmes environnementaux par un développement durable est devenu une préoccupation mondiale, qui se fait croissante au fil des années. En fait, la dégradation de l'espace forestier, causée par les activités humaines et les changements climatiques, posent des défis majeurs au développement durable.

Les feux de forêts sont la principale cause de dégradation de ces forêts; presque un minimum de 200 incidents graves de feux de forêt ont été enregistrés entre 2008 et 2020, c'est-à-dire, une moyenne de 16 incendies chaque année.

Pour faire face à la dégradation des forêts et suivre leur état, différentes techniques et méthodes ont été développées depuis longtemps: les Systèmes d'Information Géographique (SIG) permettent de géoréférencer les dégradations observées, et la télédétection, qui grâce aux images satellitaires, elle permet de cartographier les couverts végétaux à des échelles de temps et d'espace très variées.

MOTS-CLEFS: Forêts, incendies, SIG, Télédétection, province Fahs-Anjra.

1 INTRODUCTION

Les forêts couvrent environ 31% de la surface de la planète, soit un peu moins de quatre milliards d'hectares. Environ 13 millions d'hectares de forêts sont perdus chaque année, principalement en raison de la déforestation pour des usages agricoles ou le développement urbain¹. Entre autres impacts, le processus de dégradation des forêts représente une part importante des émissions de gaz à effet de serre. Il est urgent de le mesurer et de l'analyser, afin de concevoir des actions pour inverser le processus.

Au Maroc, le domaine forestier, concentré essentiellement dans les zones montagneuses, couvre 13% de la superficie totale du territoire national. La population vivant au sein de cet espace représente 50% de la population rurale, soit près de 7 millions d'habitants. Ces écosystèmes, caractérisés par une très riche biodiversité, jouent un rôle crucial, notamment dans la régulation du cycle de l'eau, l'adaptation au changement climatique et la contribution à la sécurité énergétique et alimentaire.

Ce potentiel est néanmoins menacé par une dégradation continue de ces écosystèmes, estimée à 17.000 hectares par an, due en grande partie aux effets négatifs du changement climatique couplés aux pressions anthropiques excessives. En l'absence d'une véritable offre écotouristique, le prélèvement excessif du bois de feu (3 millions de tonnes par an) ainsi qu'une surexploitation fourragère excédant de deux à trois fois la capacité de charge, constituent des freins majeurs à une valorisation durable du couvert forestier.

Les incendies de forêt, qui sont plus fréquents et plus dévastateurs en raison du changement climatique, ont atteint un niveau sans précédent en été 2022 dans le sud du bassin méditerranéen. Les pays les plus touchés sont le Maroc, l'Espagne, la France, le Portugal, et la Grèce. Au nord du Maroc, ces feux ont entraîné l'évacuation de centaines de familles et la destruction de milliers d'hectares d'espace boisé. En 2022, 499 feux de forêts ont été gérés dans le cadre de la mobilisation interdépartementale, avec exceptionnellement, une superficie incendiée de 22.762 hectares. Il demeure important de signaler que même une faible surface incendiée (3000 hectares en 2021) peut avoir un impact considérable sur la reconstitution des écosystèmes dégradés.

Le 12 juillet 2023, un incendie s'est déclaré dans une forêt de la commune rurale de Taghramt, province de Fahs-Anjra, sur environ 130 hectares de chêne-liège et de pin.

Le calcul des indices de végétation, en particulier l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI), est devenu l'une des tentatives les plus réussies, les plus populaires et les plus traditionnelles des méthodes de recherche biogéographique, car le NDVI présente certains avantages par rapport à d'autres indices de végétation ou combinaisons de bandes. Les résultats des calculs des indices de végétation pour l'étude des types de couverture végétale ont été rapportés à plusieurs reprises dans divers travaux. Ainsi, le NDVI est moins dépendant des propriétés du sol de la zone de recherche ainsi que de l'illumination diurne que de la simple combinaison de bandes rouge et infrarouge. NDVI est bien adapté à l'analyse des propriétés de la végétation, qui peuvent être indirectement interprétées à partir des couleurs des objets, comme indiqué sur l'image matricielle. Cependant, la corrélation des résultats obtenus à partir des signaux spectraux du satellite ne correspond pas nécessairement de manière précise aux données réelles sur la biomasse et la qualité de la végétation, ce qui est dû aux paramètres climatiques locaux et au contexte biogéochimique de la zone de recherche.

2 MÉTHODOLOGIE DE TRAVAIL

2.1 PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Située dans l'extrémité Nord du Maroc, la province Fahs-Anjra représente la partie septentrionale de la péninsule tangéroise. Elle fait partie de la région de Tanger-Tétouan-Al Hoceïma. Elle a été créée par le décret no 2- 03-527 du 10 septembre 2004. S'étalant sur une superficie est de 737 km², elle est délimitée au Nord par le Détroit de Gibraltar et la mer Méditerranée, au Sud et à l'Ouest par la préfecture de Tanger Assilah et à l'Est par la province de Tétouan.

Du point de vue administratif, la province se compose de 7 communes rurales: Al Bahraouyine, Melloussa, Ksar Sghir, Jouamâa, Anjra, Ksar El Majaz et Taghramt.

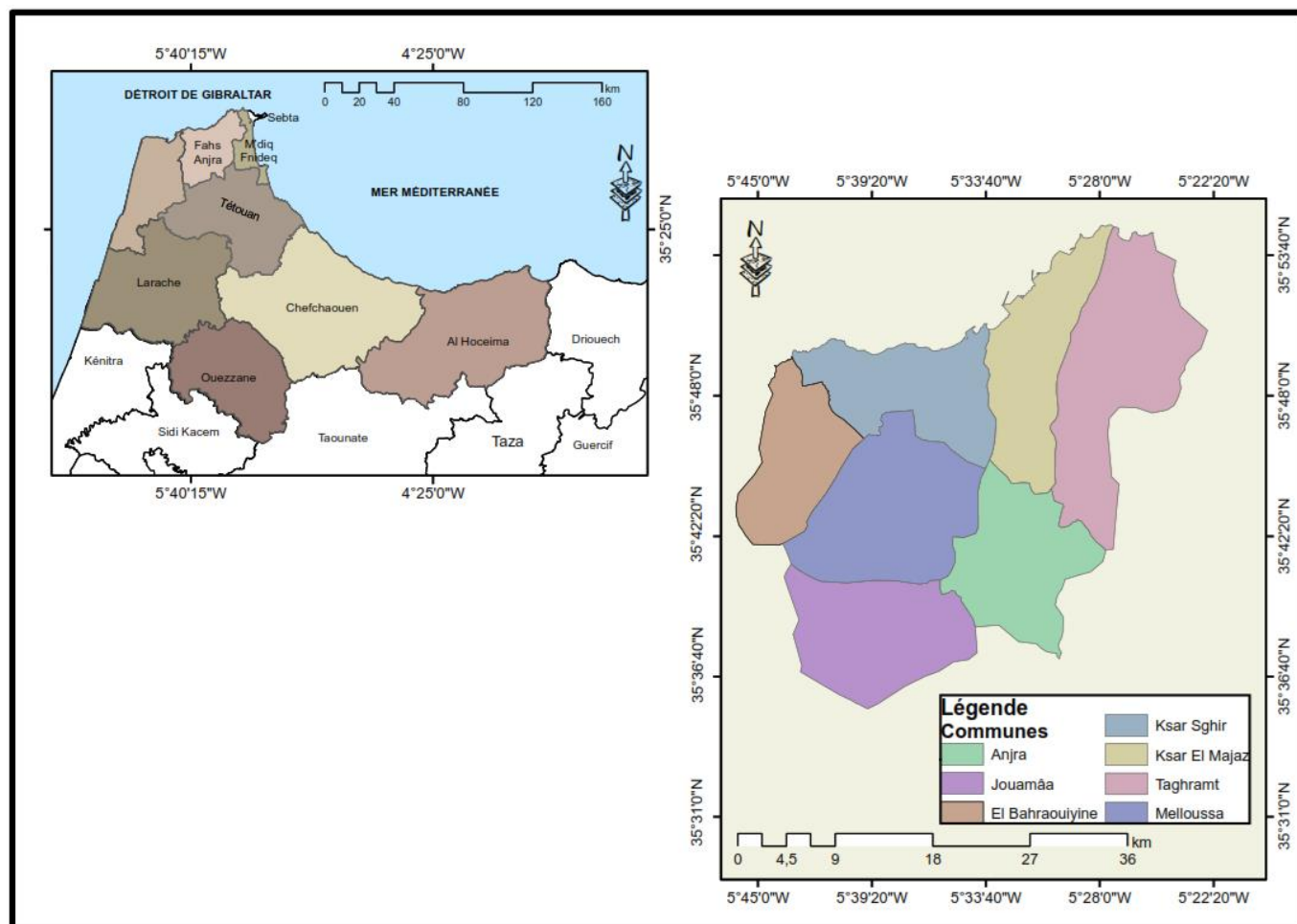


Fig. 1. Localisation de la province Fahs-Anjra

Source: Travail personnel sur la base du découpage administratif 2015

2.2 MÉTHODOLOGIE ET OUTILS DE TRAVAIL

Dans le but d'une planification stratégique, la gestion des ressources dans les écosystèmes dominés par le feu requiert une compréhension des probabilités d'allumage et de propagation des feux à différents endroits sur la province de Fahs-Anjra. Pour parvenir un tel résultat, une série d'analyses spatiotemporelles est adoptée pour comprendre aux mieux le couvert végétal et sa dynamique à l'échelle de dernières décennies. Ces analyses ont été suivies par une tentative de cartographie des zones susceptibles d'être les plus menacées par l'aléa des incendies de forêt. Pour ce faire, plusieurs techniques ont été adoptées:

- L'utilisation de l'indice de végétation normalisé (NDVI) qui montre sa puissance à la détermination de l'état du couvert végétal à l'échelle spatiotemporelle. Les résultats montrent une forte dégradation du couvert végétal depuis 1990 jusqu'aujourd'hui;
- L'extraction de l'occupation du sol par le biais des images satellitaires Landsat, qui ont permis de réaliser une étude diachronique de l'occupation du sol tout en mettant en évidence l'évolution de la forêt de Fahs-Anjra. Les résultats montrent que les surfaces de la forêt de Fahs-Anjra diminuent d'une façon dramatique, alors que ces surfaces se remplacent par les zones industrielles ou agricoles. En fait, l'augmentation de la population a fortement perturbé la configuration spatiale du milieu naturel par le biais du développement de l'agriculture et aux différentes autres formes de pression;
- Essayer de comprendre si les conditions météorologiques ont une forte influence sur la dégradation de la forêt de Fahs-Anjra, la susceptibilité aux feux de forêt a été calculée basant sur les facteurs anthropique (à partir de l'analyse réalisée

auparavant) et météorologique (température, aridité...). Les résultats marquent le fait que presque toutes les étendues forestières ont une susceptibilité, forte à extrêmement forte, aux feux de forêt. Cette étude préliminaire permet aux planificateurs de la faune d'élaborer des stratégies de prévention et d'atténuation des risques de feu pour la gestion des matériaux combustibles et la sécurité des caractéristiques naturelles et des espèces endémiques. Cela renforcera également la voie pour développer un aménagement du territoire, un développement rural et une agriculture durable efficaces.

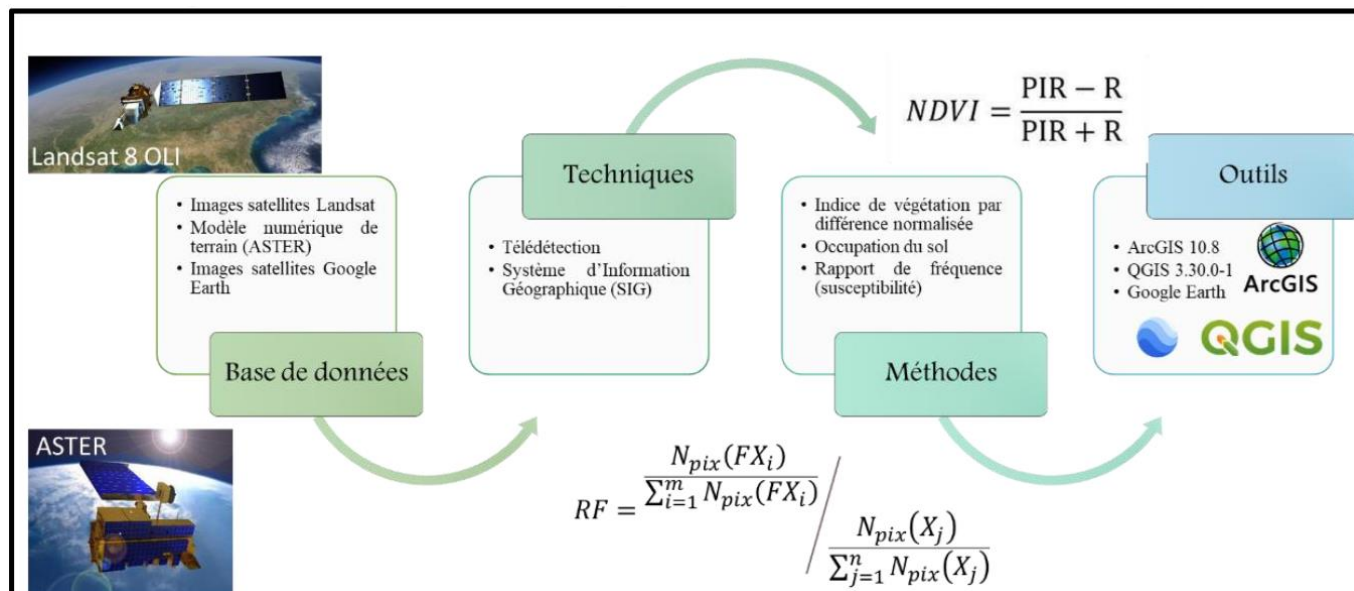


Fig. 2. Schéma résumant la méthodologie de travail et les étapes suivies (élaboration propre)

2.3 DOMAINE FORESTIER DE LA PROVINCE FAHS-ANJRA

La province de Fahs-Anjra fait partie de la chaîne montagneuse du Rif (Rif occidental). Elle se caractérise par un bioclimat subhumide et une couche de végétation thermo-méditerranéenne. Le couvert végétal lui aussi est très diversifié, il est composé de deux grandes strates: le maquis d'Erica Arborea et de cistes et la forêt dominée par les pins.

Elle se caractérise aussi par l'existence au sein de son territoire d'une aire protégée: l'aire protégée de Jbel Moussa, d'une superficie d'environ 5.000 ha, à cheval sur la province de Fahs-Anjra et la province de M'diq-Fnideq. Elle s'étale sur le territoire de trois communes: Taghramt, Ksar El Majaz et Belyounech. Les limites du site englobent une superficie de 50 km² (partie terrestre: 35,55 km²; partie marine: 14,45 km²), soit une superficie totale de 5000 ha. Cette aire protégée a été identifiée par le Plan Directeur des Aires Protégées du Maroc, en 1996, comme Site d'Intérêt Biologique et Ecologique (SIBE). Elle a été inscrite sur la liste des sites Ramsar en 2019. Elle est également localisée dans la zone désignée comme Réserve de Biosphère Intercontinentale de Méditerranée (RBIM).

2.4 MILIEU NATUREL

2.4.1 GÉOMORPHOLOGIE

Du point de vue géomorphologique, la province présente deux entités géomorphologiques bien individualisées: les crêtes montagneuses et les vallées associées à des plaines réduites. Elle se caractérise par un paysage montagneux et accidenté dans la quasi-totalité de son étendu, à l'exception de la zone côtière, caractérisée par des reliefs plats. Son relief est donc à prédominance montagneuse, surtout à l'Est (600 m à Kedana près de Taghramt), à l'Ouest (460 Bni Mjemel) au centre de la province (620 près de Dar El Brarek) et au sud (643 m à l'Ouest de Chrafat). En général, les montagnes constituent 54%, alors que les plaines ne dépassent pas 12%, les plateaux 16% et les collines 17,5%. Dans le même contexte, les pentes orientées vers l'Est, sont souvent les plus raides. La classe des pentes dominantes est comprise dans une fourchette de valeurs allant de 0 à 20°. Les valeurs de pente supérieures à 30° sont également enregistrées. La province est caractérisée généralement par des pentes moyennes à fortes, sauf au niveau de la zone côtière, au niveau de laquelle elles décroissent pour devenir plus faibles.

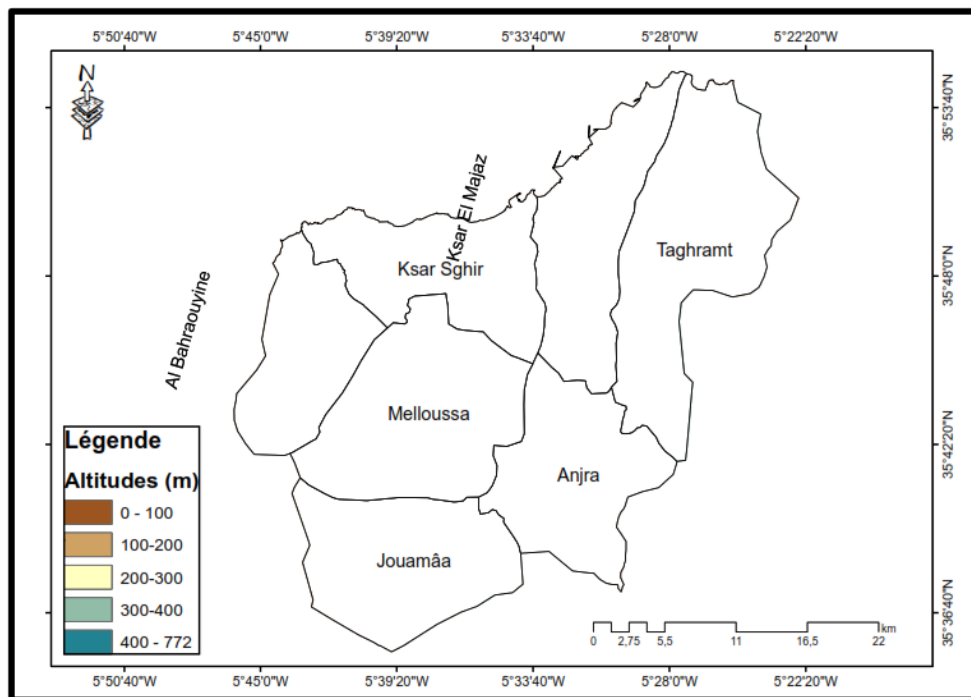


Fig. 3. Les altitudes au sein de la province de Fahs-Anjra (m)

Source: réalisation personnelle à partir du MNT ASTGTM2_N35W006_dem (SRTM V3, Novembre 2016)

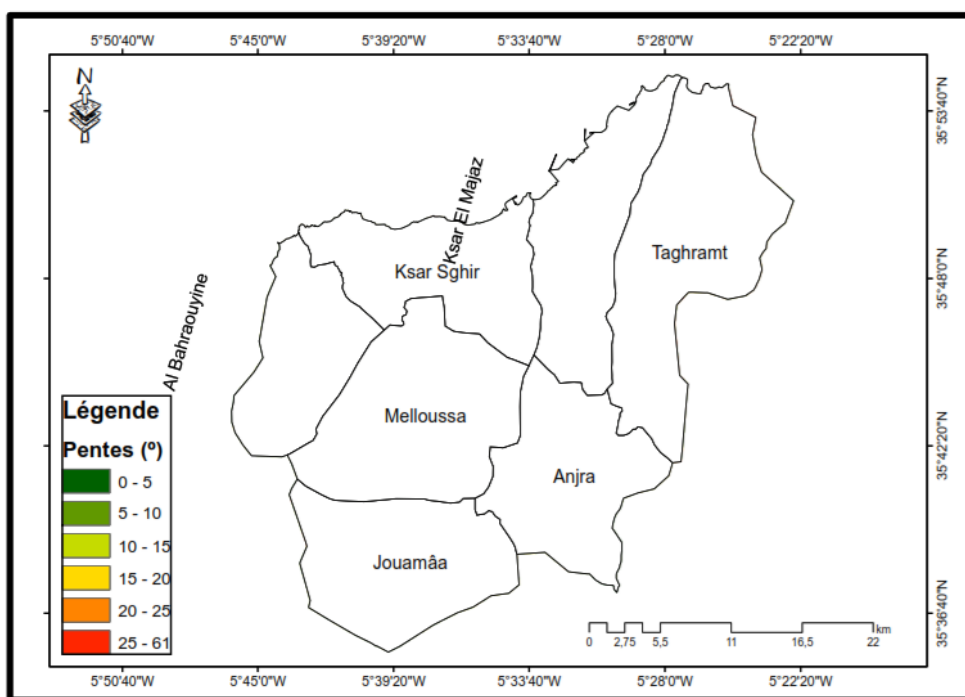


Fig. 4. Les pentes au sein de la province de Fahs-Anjra (degrés)

Source: réalisation personnelle à partir du MNT ASTGTM2_N35W006_dem (SRTM V3, Novembre 2016)

2.4.2 GÉOLOGIE

La province de Fahs-Anjra appartient au domaine rifain et se situe sur le massif d'Anjra, éperon nord-occidental de la chaîne du Rif. Cette chaîne est subdivisée en trois domaines principaux: domaine interne, au nord de l'actuel Rif; domaine externe, au sud; et le domaine de flyschs, correspondant aux couches de flysch, formant un banc entre les deux sillons précédents. A l'intérieur du domaine interne, on distingue trois grands ensembles structuraux: la dorsale calcaire, les Sebtides et les Ghomarides.

2.4.3 HYDROGÉOLOGIE ET RESSOURCE EN EAU

Le réseau hydrographique drainant dans la zone d'étude est dense. Ces ressources en eau de surface constituent l'essentiel des ressources en eau de la province de Fahs-Anjra. En effet, l'abondance des précipitations, la prédominance de faciès peu perméables (schiste, argile, etc.) et les fortes pentes entravent l'infiltration souterraine et entraînent les conséquences suivantes:

- Le ruissellement est important et prédominant dans tous les bassins versants;
- Les rivières ont un régime hydrologique irrégulier avec des débits torrentiels en période de crue et des débits d'étiage très faibles à nuls;
- Les apports mensuels maximaux sont enregistrés entre décembre et février sous forme de crues, qui constituent l'essentiel des apports du fleuve.

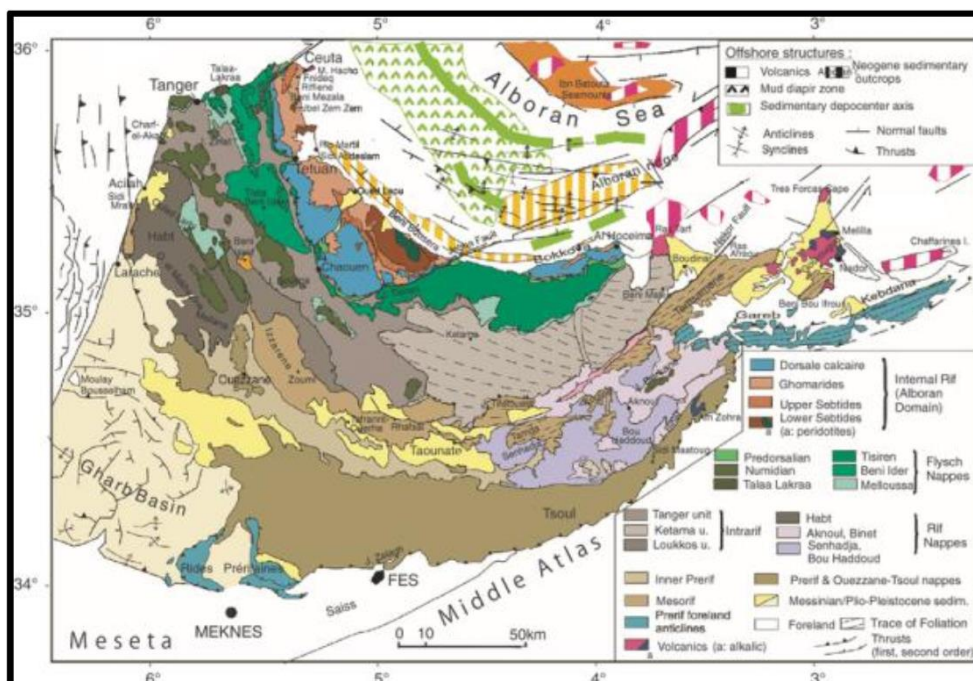


Fig. 5. Carte structurale du Rif (Michard et al. 2008)

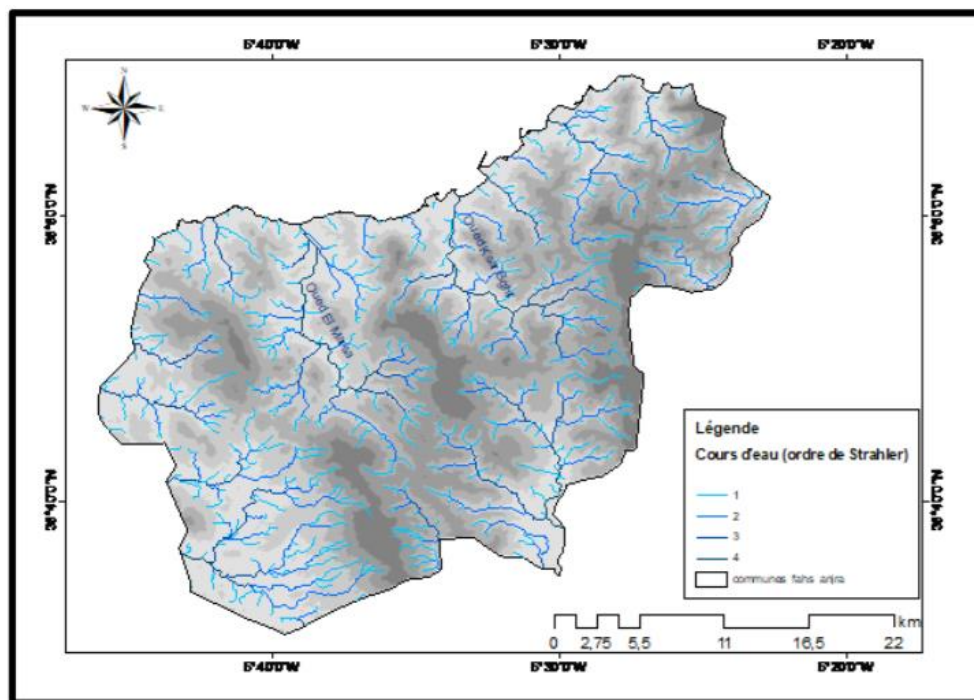


Fig. 6. Carte du réseau hydrographique (classification de Strahler)

Source: réalisation personnelle à partir du MNT ASTGTM2_N35W006_dem (SRTM V3, Novembre 2016)

2.4.4 CLIMAT

La province s'inscrit dans le domaine du climat méditerranéen, mais on ne peut pas se contenter de cette affirmation trop générale. En effet, cette variante du climat méditerranéen présente une grande hétérogénéité, résultat de trois éléments: l'altitude, la latitude et l'océan. Les altitudes influent sur la distribution des précipitations. Placés sous la domination des perturbations de l'anticyclone des Açores, les versants exposés aux vents d'Ouest ou du Sud-ouest, ainsi que les hauts sommets sont bien arrosés alors que ceux orientés vers l'Est ou le Sud-Est forment des espaces semi-arides.

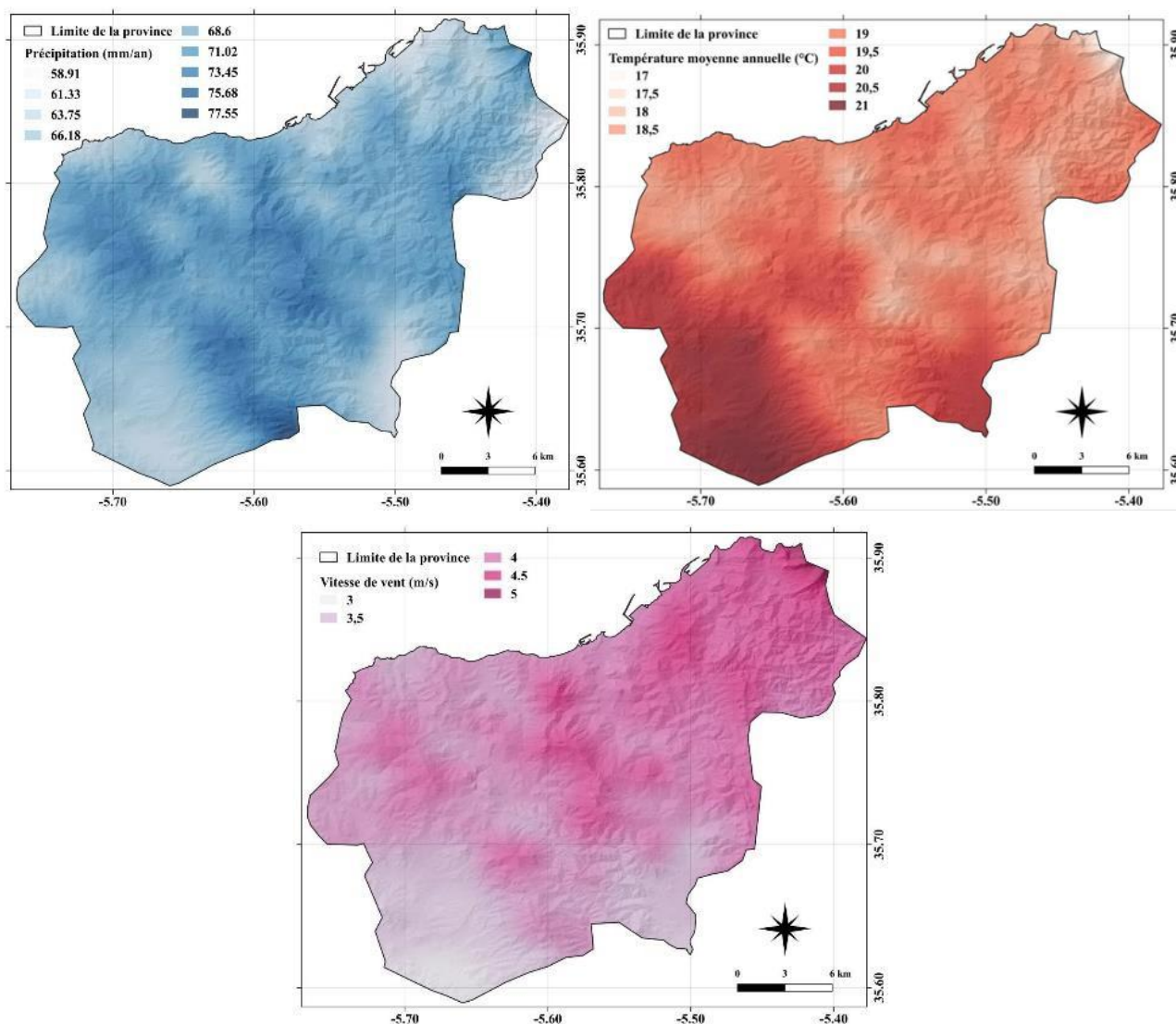


Fig. 7. Carte des précipitations moyennes annuelles (5), Carte des températures moyennes annuelles (6) et carte de la vitesse du vent (7)

Source: réalisation personnelle à partir du MNT

3 ANALYSE DE LA DYNAMIQUE SPATIOTEMPORELLE DU COUVERT VÉGÉTAL DE LA PROVINCE DE FAHS- ANJRA

Pour cette analyse, on a utilisé l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) dont le but de tracer l'évolution du couvert végétal au niveau de la province de Fahs -Anjra. Les objectifs spécifiques consistent dans l'évolution du couvert végétal qui apparaît dans la zone d'étude environ chaque 10 ans; à l'interprétation d'images satellite Landsat et à la mise en évidence des facteurs qui peuvent être responsables de la réduction du couvert végétal à l'échelle de la province de Fahs-Anjra.

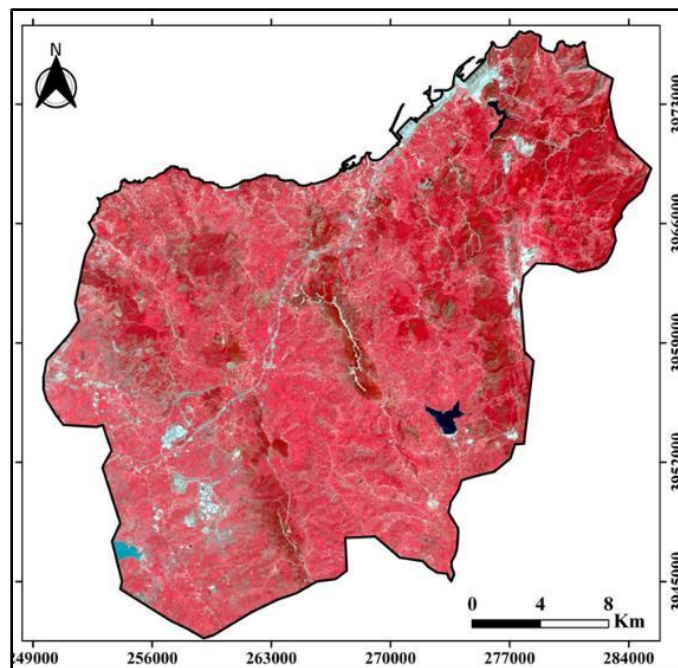


Fig. 8. Carte composite en trois fausses couleurs (R/V/B= Bandes 5/4/3)

Source: Travail personnel réalisé à partir des images Landsat 8 (08/10/2020)

Pour cela, on a utilisé une série des images satellites Landsat depuis 1990 jusqu'à 2020 pour une tentative de comprendre l'évolution spatio-temporelle du couvert végétale à l'échelle de la province Fahs-Anjra. Ainsi, on a essayé de tester à quel point l'indice NDVI peut nous aider à avoir une vision synthétique sur la dégradation des forêts. Pour ce faire, on a choisi quatre images satellites dont leurs détails sont cités dans le tableau 1. Chaque dix ans, l'indice de NDVI a été calculé et cette marge est largement suffisante pour avoir des grands changements de l'état de la végétation à l'échelle de la zone d'étude. Sinon au lieu de choisir une image satellite pendant l'année 2010, celle de 2009 a été pris. Les images prises entre le mois 7 et 12 de l'année 2010 sont couvertes par un fort pourcentage de nuages, surtout sur la zone d'étude.

Tableau 1. Caractéristiques des images Landsat utilisées pour extraire le NDVI

Type de données	Date	Bande utilisée	% Nuages	Résolution spatiale	Projection	Site
Landsat 5 TM	20/09/1990	3, 4	0	30 m	UTM Zone 30	https://earthexplorer.usgs.gov/
Landsat 7 ETM+	05/07/2000	3, 4	10,00	30 m	UTM Zone 30	
Landsat 5 TM	27/11/2009	3, 4	56,00	30 m	UTM Zone 30	
Landsat 8 OLI	08/10/2020	4, 5	0,08	30 m	UTM Zone 30	

$$NDVI = \frac{(Bande 5 - Bande 4)}{(Bande 5 + Bande 4)} \quad NDVI = \frac{(Bande 4 - Bande 3)}{(Bande 4 + Bande 3)}$$

Plus une plante contient des feuilles, plus ces longueurs d'onde de la lumière sont affectées, respectivement. C'est pourquoi, l'utilisation des bandes 4 et 5 (pour Landsat 8) et/ou des bandes 3 et 4 (pour Landsat 4,5 et 7) est très importante pour extraire le couvert végétal via le NDVI (tableau 2).

Tableau 2. Description des bandes spectrales du visible et du proche infrarouge utilisées²

Satellites	Bandes Utilisées	Résolution Spatiale	Description
LANDSAT 8 OLI	Bande 5/Bande 4	30m x 30m	Sensible à la structure des couverts végétaux, distingue bien les résineux des feuillus, les milieux ravagés par le feu et même le trèfle du maïs.
LANDSAT 7 ETM+	Bande 4/Bande 3	30m x 30m	Portion de la lumière utilisée pour la détection de l'activité chlorophyllienne des végétaux; apporte de nettes distinctions entre les zones de végétation et celles qui en sont dépourvues.
LANDSAT 5 TM	Bande 4/Bande 3	30m x 30m	Portion de la lumière utilisée pour la détection de l'activité chlorophyllienne des végétaux; apporte de nettes distinctions entre les zones de végétation et celles qui en sont dépourvues.

D'ailleurs, les données de réflectance issues de capteurs optiques (TM, ETM et OLI) sont intégrées dans une plateforme SIG pour le suivi de la végétation, grâce au calcul de l'indice NDVI. En outre, les images satellitaires utilisées doivent être corrigées géométriquement selon le Système de projection Universal Transverse Mercator (UTM) zone 30, qui coïncide avec la province de Fahs- Anjra. Elles ont également été subies à une correction radiométrique pour éliminer l'effet des aérosols de l'atmosphère, et aussi pour optimiser la qualité visuelle des compositions colorées.

CALCUL DE NDVI

Le NDVI est l'une des méthodes d'analyse des données de télédétection en conjonction avec des données de terrain qui permet de surveiller la dégradation des forêts. Elle est utilisée pour quantifier la végétation et pour comprendre la densité de la végétation et évaluer les changements dans le couvert végétal. Il est construit à partir des canaux rouge (R) et proche infra-rouge (PIR). Il met en valeur la différence entre la bande visible du rouge et celle du proche infrarouge. Cet indice est sensible à la vigueur et à la quantité de la végétation.

Le NDVI est calculé par le biais d'un rapport entre les valeurs rouge (R) et proche infrarouge (NIR) de façon traditionnelle:

$$\frac{(PIR - R)}{(PIR + R)}$$

Pour les données de Landsat 4-7, les bandes 3 et 4 doivent être utilisées, dont l'équation du NDVI est calculée comme suit:

$$NDVI = \frac{(Bande\ 4 - Bande\ 3)}{(Bande\ 4 + Bande\ 3)}$$

Pour les données de Landsat 8, les bandes utilisées pour réaliser l'équation du NDVI sont celles 4 et 5, où:

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

Les valeurs du NDVI sont généralement comprises entre -1 et +1, les valeurs négatives correspondant aux surfaces autres que les couverts végétaux, comme la neige, l'eau ou les nuages pour lesquelles la réflectance dans le rouge est supérieure à celle du proche infrarouge. Pour les sols nus, les réflectances étant à peu près du même ordre de grandeur dans le rouge et le proche infrarouge, le NDVI présente des valeurs proches de 0. Les formations végétales quant à elles, ont des valeurs de NDVI positives, généralement comprises entre 0,1 et 0,5. Les valeurs les plus élevées correspondant aux couverts les plus denses.

En effet, l'indice NDVI est utilisé dans le monde entier pour surveiller la sécheresse, contrôler et prévoir la production agricole, aider à la prévention des incendies et cartographier la désertification. L'indice NDVI est privilégié pour l'observation

globale de la végétation car il permet de compenser les changements de conditions d'éclairage, de pente de surface, d'exposition et d'autres facteurs exogènes.

4 RÉSULTAT ET INTERPRÉTATION DU COUVERT VÉGÉTAL DÉDUIT DU NDVI DURANT 30 ANS (1990 -2020)

Comme mentionné ci-dessus, l'indice NDVI a été calculé chaque 10 ans depuis 1990 jusqu'à 2020, (selon les images satellitaires disponibles), pour suivre l'état du couvert végétal dans province Fahs-Anjra, ce qui nous a aidé à comprendre la dégradation de la végétation à long terme.

Les valeurs du NDVI varient entre -1 et +1. La couverture végétale a des valeurs de NDVI positives, généralement comprises entre 0,1 et 1.0. Les valeurs les plus élevées correspondant aux couverts les plus denses.

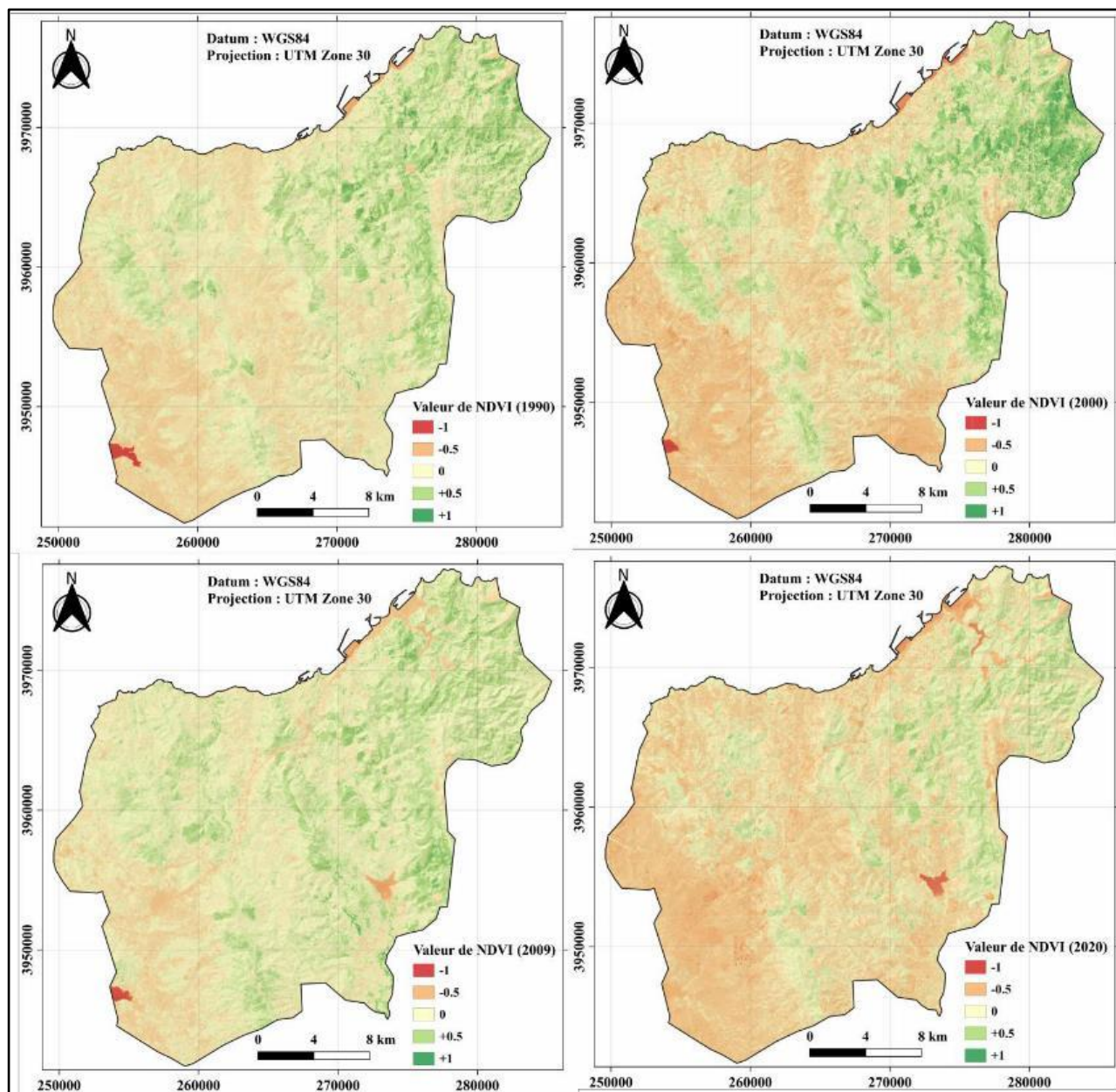


Fig. 9. Carte du résultat du calcul du NDVI pour les différentes dates choisies dans le but de suivre l'évolution du couvert végétal durant les 30 dernières années

Source: réalisation personnelle à partir des différentes images satellites Landsat

4.1 ETAT DU COUVERT VÉGÉTAL DE 1990 À 2020

Le calcul de NDVI nous a permis de déduire de façon générale l'état du couvert végétal en 1990 au sein de la province de Fahs-Anjra. Les formations végétales quant à elles, ont des valeurs de NDVI généralement supérieur à 0,1. On trouve que la surface du couvert végétal en 1990 est environ 2,2.104 ha, soit 220 km². Elle correspond à 66 % de la surface totale de la province. La végétation est généralement plus abondante dans la partie Est de la province.

En 2000, on trouve que la surface du couvert végétal est de 2,15.104, soit 215 km². Elle correspond à 64 % de la surface totale de la province. Elle a abaissé d'environ 500 ha, soit 5 km² depuis 1990, c'est-à-dire que la province a perdu approximativement 2% du couvert végétal pendant 10 ans, avec un taux d'abaissement de 50 ha/an.

En 2009, le couvert végétal déduit de NDVI marque une augmentation de la surface du couvert végétal. Ces résultats doivent être considérés avec prudence parce qu'ils sont en contradiction avec la réalité. De même nous avons remarqué que les images Landsat prises entre 2009 et 2010 montrent un fort pourcentage de nuage arrivant jusqu'à 60%. Malgré que nous fassions une correction atmosphérique, les résultats obtenus restent exagérés. Pourtant, nous présentons ces résultats parce qu'ils donnent une idée sur un retrait du couvert végétal dans la partie Est de la province. On remarque que le couvert végétal est plus ou moins épars dans ce secteur à l'inverse d'état du couvert végétal en 2000 et en 1990. On est tout à fait d'accord au fait que le couvert végétal se dégrade surtout dans la partie Est de la province de Fahs-Anjra, ce qui est concordant avec l'étude menées auparavant sur cette zone.

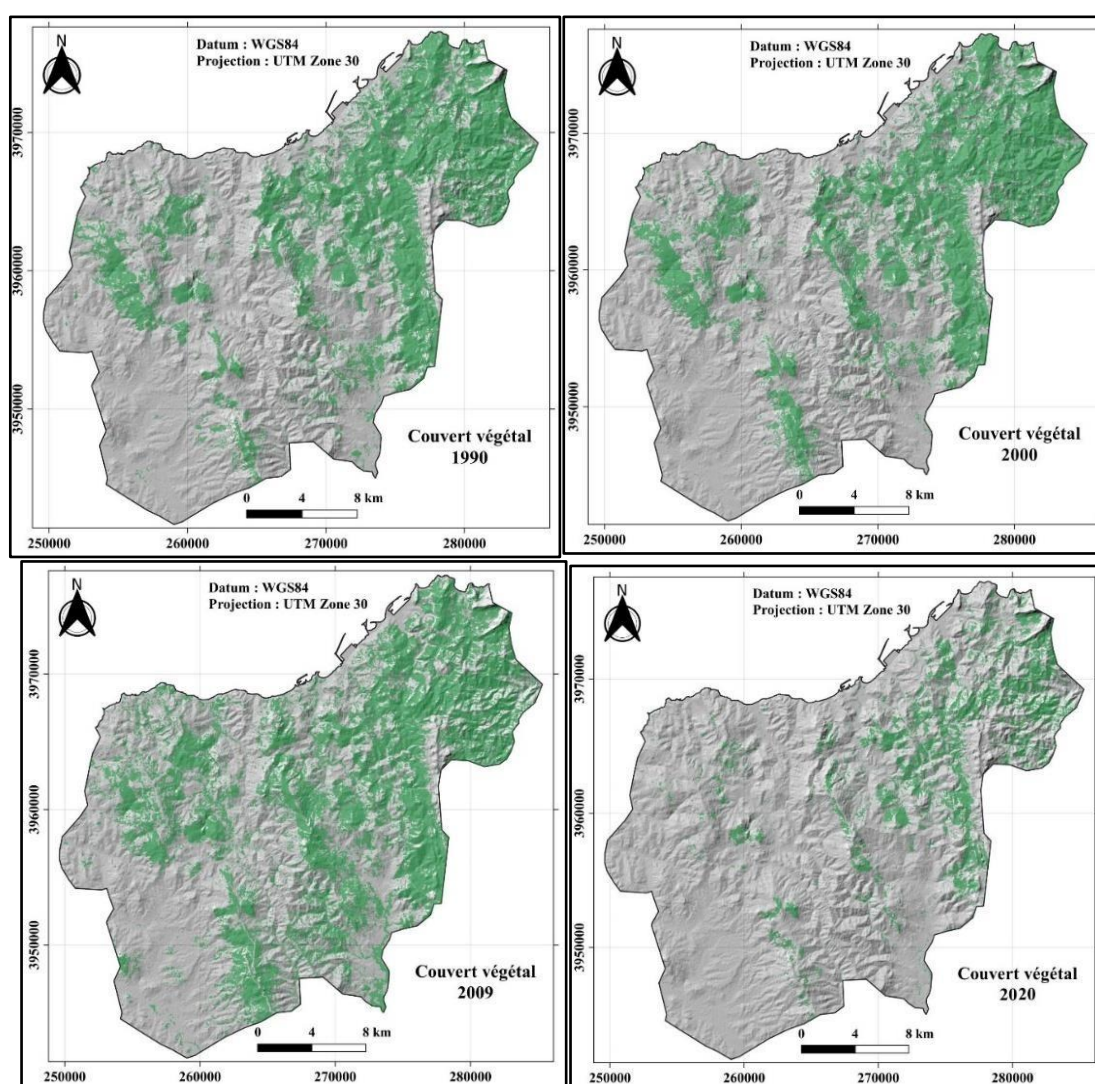


Fig. 10. Carte de la répartition spatiale du couvert végétal extrait du NDVI calculé le long de la période choisie (1990-2020)

Source: réalisation personnelle à partir des différentes images satellites Landsat

La densité de la végétation diminue au cours du temps:

- En 1990, la surface totale de la végétation dense était de l'ordre de 2000 ha, soit 2,7% de la surface totale de la province. La végétation éparsse correspondrait à plus de 20000 ha, soit 28 %. Cette surface de la végétation dense paraît augmenter les dix années qui suivent, alors que la végétation éparsse diminue en surface, cela peut être issu du fait que certaines zones à végétation éparsse ont été détectées en tant que végétation dense. Cette confusion est apparue malgré les corrections atmosphériques de la base de données qui ont été réalisées avant le traitement. De là ressort l'importance d'avoir une base de données de très bonne qualité pour obtenir des meilleurs résultats. Les données Landsat sont caractérisées par une bonne résolution pour un tel genre d'étude, mais parfois on coïncide avec des incertitudes qui peuvent influencer le résultat. Dans ce cas, nous pouvons ne pas tenir en compte les résultats qui semblent être perturbés
- En 2009, nous constatons que la végétation dense déduite de NDVI diminue de façon grave. Elle correspond seulement à environ 1000 ha, soit 1,3 % de la surface totale de la province. En effet, 50% de la surface en végétation dense a été dégradé pendant 19 ans. Cette surface va être diminuée de plus en plus en 2020, de sorte qu'elle occupe 0,2 % de la surface totale, soit 29 ha.

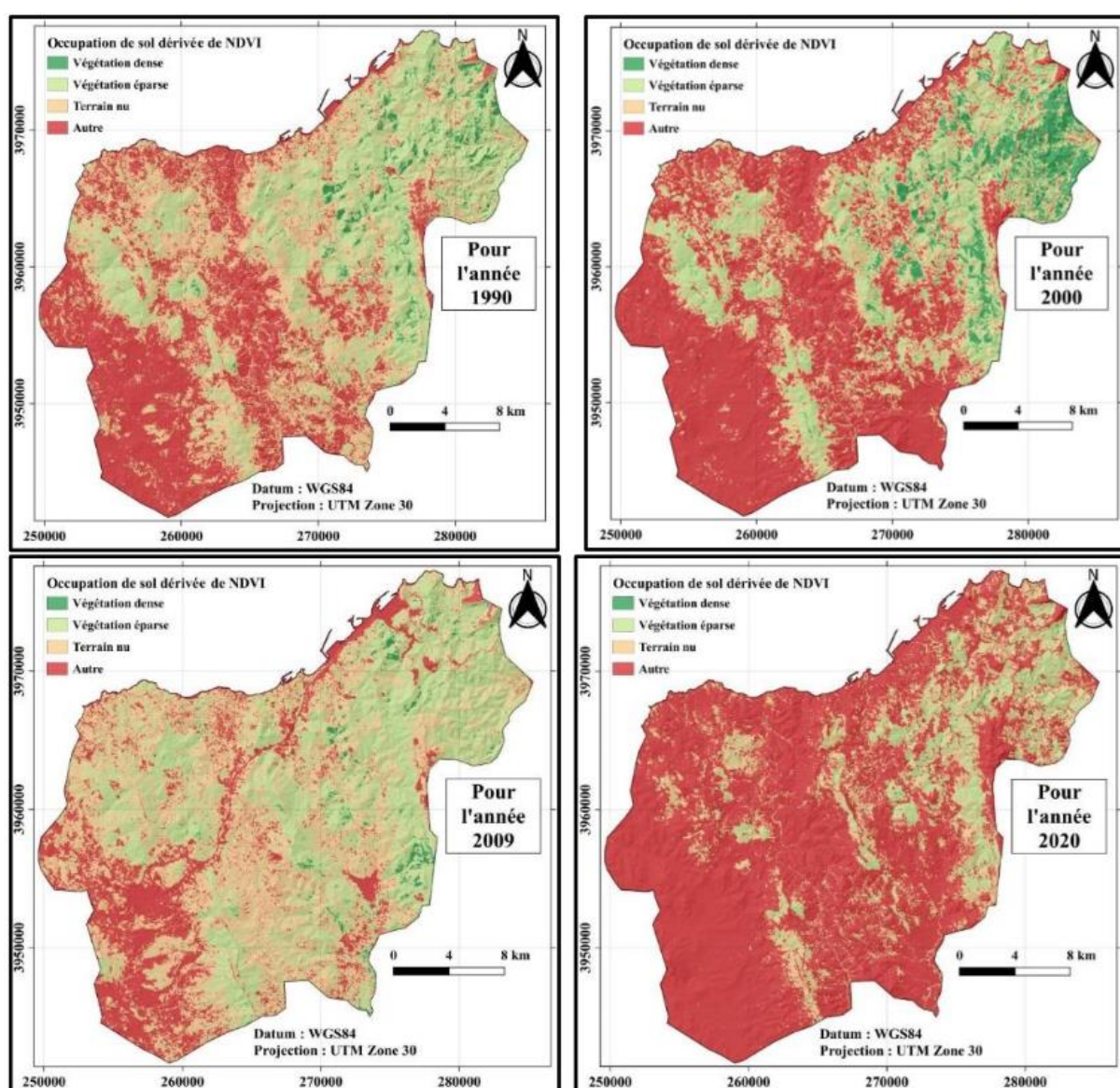


Fig. 11. Cartes de l'occupation du sol en 1990, 2000, 2009 et 2020 déduites à partir de l'indice de NDVI

Source: Travail personnel réalisé par QGIS version 3.4.2; Voir méthodologie

D'après ce qui précède, on peut dire que le NDVI est un outil qui permet de discriminer la distribution spatiale de la végétation. Avec l'existence d'une base de données au cours du temps, il permet d'évaluer la dynamique spatio-temporelle de la végétation ainsi que sa densité. Cependant, la végétation dense ne correspond pas toujours à la forêt, et la végétation éparsse peut correspondre aux forêts ouvertes. Le NDVI fournit donc une vision générale sur la dynamique de la végétation le long de la province Fahs-Anjra, ce qui aide à comprendre aux mieux les caractéristiques phénotypiques de la zone.

L'analyse de la dynamique spatio-temporelle du couvert végétal via le NDVI montre un fort abaissement de la superficie verte à l'échelle de la province de Fahs-Anjra. Entre 1990 et 2020, nous avons constaté qu'une surface de 135 km² a perdu son couvert végétal. Cela vaut dire que le taux de perte de la végétation est plus de 450 ha/an. En fait, le taux de dégradation de la végétation augmente de façon tangible dans les derniers vingt ans. Notre analyse suggère que ce taux était environ de 60 ha/an, de sorte que 590 ha du couvert végétal ont été perdus durant la période qui s'étend de 1990 à 2000. Entre 2000 et 2020, le taux de dégradation dépasse la surface dégradée pendant les dix ans. Il correspond à environ de 650 ha/an, soit 13 km² pendant 20 ans.

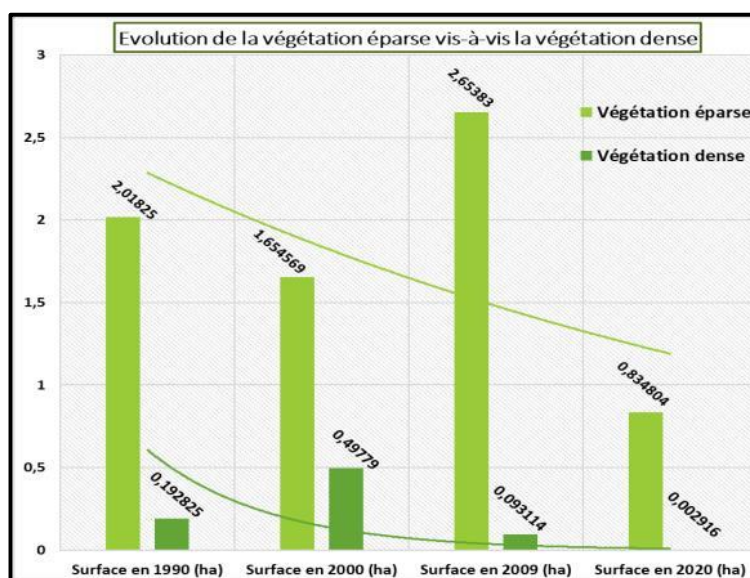


Fig. 12. Histogramme de l'évolution de la végétation dense vis-à-vis de la végétation éparsse, détectée par l'indice NDVI

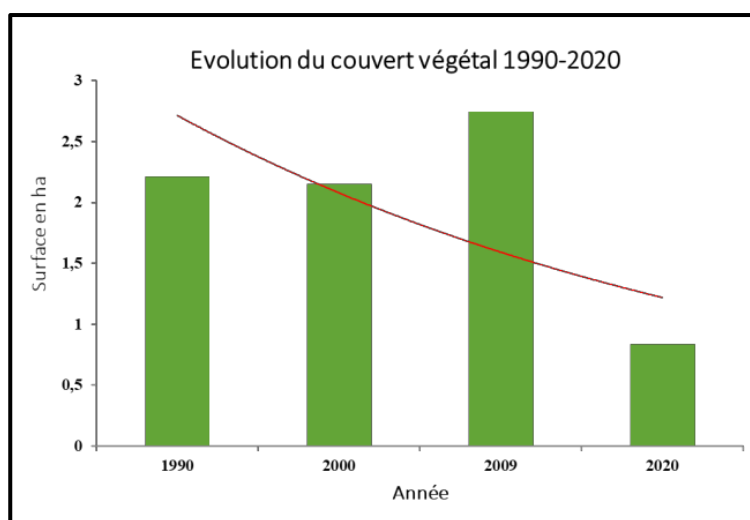


Fig. 13. Evolution temporelle du couvert végétal basée sur l'indice NDVI (1990-2020)

D'ailleurs, la capacité de NDVI à discriminer la végétation dense de la végétation éparsse nous a permis de présenter quelques chiffres qui peuvent donner une idée sur la dégradation du couvert végétal. Nous avons trouvé une tendance descendante indiquant une forte perte de la végétation. Il est déjà visuellement remarquable que la densité de la végétation

diminue au cours des 30 ans analysés. En termes de chiffres, nous constatons que 1900 ha de la végétation dense, qui peut correspondre aux forêts, a été dégradés et/ou transformés en végétation éparses. De là ressort que le taux annuel est de l'ordre de 63 ha/an. Entre 2009 et 2020, ce taux est généralement plus élevé. Il atteint 82 ha/an. La végétation éparses a été aussi dégradée pendant cette période. Nous avons estimé qu'une surface de 11 km² a été disparue ou rarement transformée en surface à végétation dense.

La résolution spatiale d'un capteur correspond à la taille minimum des objets pouvant être identifiés au sol, ce qui correspond en télédétection à la taille des pixels d'une image satellite. La capacité à distinguer deux objets voisins différents dépend donc de la résolution spatiale du capteur. Celle-ci peut varier des centaines de mètres aux quelques mètres, pour des capteurs à résolution spatiale acceptable (tels que Landsat...), utilisés le plus souvent pour des applications météorologiques ou pour cartographier la couverture végétale à l'échelle régionale. Pour cartographier des objets tels que les couverts végétaux la haute résolution spatiale au minimum (résolution égale ou inférieure à 30 mètres) est indispensable. La meilleure résolution disponible pour réaliser ce travail est les différentes images Landsat. La résolution spatiale correspond à 30x30 m et celle temporelle ou répétitivité est généralement haute de sorte que la capacité de revisite d'un capteur sur un même site d'étude est relativement mensuelle. Pourtant, les images Landsat acquises dans le domaine optique, la résolution temporelle est altérée selon les conditions atmosphériques (couverture nuageuse): une image peut être acquise tous les mois (résolution temporelle réelle) mais seulement une image tous les 6 mois peuvent être utilisée (résolution temporelle effective). Nous couplons les images dont le mois d'acquisition est proche, ce qui peut influencer les résultats de NDVI. Cela correspond à l'un des limites d'application de cette approche pour suivre la dégradation de couvert végétal. Or les valeurs NDVI dérivées des images Landsat 8 comparées à celles calculées à partir des données de Landsat 7 et testées au sol montre que le NDVI de Landsat 8 est plus important que celui de Landsat 7 dans les zones à faible couverture végétale, et que la différence devient plus faible au fur et à mesure que la valeur du NDVI augmente⁷⁰. Cela indique que les NDVI de Landsat 7 et de Landsat 8 sont cohérents lorsqu'il s'agit de zones à forte couverture végétale (par exemple, les zones forestières et les prairies à herbes hautes), car la différence entre les NDVI de Landsat 7 et 8 est proche de zéro lorsque la valeur du NDVI est élevée.

5 CONCLUSION

Les feux de forêt, qu'ils soient naturels ou provoqués par l'homme, représentent une menace importante pour la plupart des forêts et des prairies du monde entier. L'étude actuelle a démontré la capacité des techniques de SIG à développer des cartes de susceptibilité aux feux de forêt dans l'une des provinces les plus touchées par les feux de forêt au nord du Maroc. Les résultats et les conclusions de l'étude ont montré que les modèles climatique et topographique et d'autres caractéristiques créent des conditions favorables à l'apparition de feux de forêt à l'échelle de la province de Fahs-Anjra.

La validation des résultats, (égale 75%), souligne l'importance de prendre en compte un large ensemble de critères causaux lors de la réalisation d'une étude de susceptibilité aux feux de forêt. Cette étude conclut que, parmi les techniques statistiques, avec l'avantage d'aborder les caractéristiques floues inhérentes aux ensembles de données géospatiales, le rapport de fréquence a décidé des contributions beaucoup plus spécifiques des couches de critères individuels dans la cartographie finale de la susceptibilité aux feux de forêt.

Dans cette étude, nous avons évalué la capacité de séries temporelles de NDVI estimées à partir d'images satellites optiques à bonne résolution spatiale pour discriminer le couvert végétal le long de la province Fahs-Anjra. Les résultats de classification obtenus montrent que le couvert végétal peut être identifié avec une précision acceptable avec quatre images pour chaque dix ans. De plus, les résultats mettent en évidence une tendance descendante où le couvert végétal a diminué de façon grave depuis 1990 jusqu'à 2020. En outre, ils montrent que l'identification des végétations denses par rapport aux végétations éparses peut varier en fonction de la série temporelle utilisée. Ainsi, nous avons mis en évidence, sur notre zone d'étude, les taux de dégradation du couvert végétal qui semble augmenter dans les derniers 20 ans.

REFERENCES

- [1] Alasli, M. (2019). Static Risk Mapping of Forest Fires in the Case of the Province of Chefchaouen (Morocco), Proc. Int. Cartogr. Assoc., 2, 2.
- [2] Atouabat, Achraf, et al. (2020). «Validating Structural Styles in the Fylsch Basin Northern Rif (Morocco) by Means of Thermal Modeling.» Geosciences, vol. 10, no. 9, Sept. 2020, pp.
- [3] Benabid A., (2002). Le Rif et le Moyen Atlas (Maroc): Biodiversité, menaces, préservation. African Mountains High Summit Conference Nairobi, Kenya.

- [4] Campbell, JB (2007). *Introduction to Remote Sensing*, 4th ed; Guilford Press: New York, NY, USA. Chalvet, M. (2016). « La vulnérabilité de la forêt provençale face aux incendies: naissance d'une notion (fin XIXe siècle) », *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Volume 16.
- [5] Conseil Economique, Social et Environnemental (2022): *Les écosystèmes forestiers du Maroc: Risques, défis et opportunités*, Commission Permanente chargée de l'Environnement et du Développement Durable, Auto-saisine n° 65/2022, p.7. <https://www.cese.ma/media/2023/07/ebook-Avis-e%CC%81cosyste%CC%80mes-forestiers-du-Maroc-VF.pdf>
- [6] Coops and Tooke (2017). *Introduction to Remote Sensing*. In: S.E. Gergel, M.G. Turner (eds.), *Learning Landscape Ecology*, DOI 10.1007/978-1-4939-6374-4_1.
- [7] Dauphiné (2001). *Risques et catastrophes. Observer-Spatialiser-Comprendre-Gérer*. Paris, Armand Colin (Coll. « U Géographie »), 288 p. (ISBN 2-200-25042-8).
- [8] Décret no 2-03-527 du 13 rajab 1424 (10 septembre 2003) modifiant et complétant le dahir no 1-59-351 du 1er jourmada II 1379 (2 décembre 1959) relatif à la division administrative du Royaume», *Bulletin officiel du Royaume du Maroc*, no 5144, 18 septembre 2003, p. 853.
- [9] Direction des inventaires forestiers, Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs Secteur des forêts de Québec (2015). *Guide d'interprétation des mosaïques d'images satellite Landsat*.
- [10] Durand-Delga M., Hottinger L., Marçais J., Mattauer M., Milliard Y. et Suter C. (1960-1962). *Données actuelles sur la structure du Rif*. Livre mem. P. Fallot, M&M. h. -sér. Soc. géol. France, I, 339-422.
- [11] FAO, (2013). *Etat des forêts méditerranéennes 2013*. Rome. E-ISBN 978-92-5-207538-7. www.fao.org/docrep/017/i3226f/i3226f.pdf.
- [12] Forum stratégies de promotion du développement social et la lutte contre la pauvreté via la gestion durable des forêts de la planète et de leurs écosystèmes (2 février 2011): <https://www.un.org/fr/desa/la-degradation-des-forets-mondiales-menace-la-subsistance-de-16-milliard-de-personnes> (date de consultation: 10/10/2023).
- [13] Foody, GM (2008). GIS: Biodiversity applications. *Prog. Phys. Geogr*, 32, 223–235.
- [14] Frank, A.B., et al. (2003). Vegetation indices, CO2 flux, and biomass for Northern Plains Grasslands. *Journal of Range Management*. 56 (4): p. 382-387.
- [15] Girard M C., Girard C M., (1999). « La télédétection appliquée, zones tropicales et intertropicales », Dunod, Ed. Paris, 529 pages plus CD Rom.
- [16] Hinton, JC (1996). GIS and remote sensing integration for environmental applications. *Int. J. Geogr. Inf. Sci*, 10, 877–890.
- [17] Houssni, M., Ennoui, H., Ouallali A., et al. (2020). Evolution du couvert végétal naturel au niveau des massifs forestiers de Mallalyine et Taghramt (Rif Occidental Du Maroc). *European Scientific Journal August 2018 edition Vol.14, No.24*.
- [18] ITTO (2002). *Guidelines for restoration, management and rehabilitation of degraded and secondary tropical forests*. ITTO Policy Development Series No. 13. Yokohama, Japan, International Tropical Timber Organization https://www.itto.int/policypapers_guidelines/.
- [19] Marien J.N., Billand A., (2009). Les systèmes socio-écologiques forestiers méditerranéens face aux changements globaux - Quelques questions posés par la filière bois énergie au Maroc, *Forêt Méditerranéenne – tome XXX – n°4*. pp: 297-300.
- [20] MTDDE (2018). *Les feux de forêt. Dossier Départemental Des Risques Majeurs De l'Aveyron*. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction des Inventaires Forestiers, Secteur des Forêts de Québec (2015): *Guide d'interprétation des mosaïques des images satellite Landsat*, 22p. NASA. (2013). *the Electromagnetic Spectrum*. Retrieved from <http://imagine.gsfc.nasa.gov/>.
- [21] Neary D.G, Ryan K.C, DeBano L.F, (2005). *Fire effects on soil and water*. USDA Forest Service General Technical Report RMRS-GTR-42. Vol. 4. Fort Collins, CO: Rocky Mountain Research Station. 250 p.
- [22] Neveu, E. (1999). *L'approche constructiviste des « problèmes publics », Un aperçu des travaux anglo - saxons*, Étude de communication (en ligne). URL: <http://edc.revues.org/2342>.
- [23] Plan Directeur des Aires Protégées (1996). Volume 3. Les sites d'intérêt biologique et écologique du domaine littoral. BCEOM/SECA, BAD, EPHE, ISR, IB. 166pp.
- [24] Pimiento E (2010). *Shallow landslide susceptibility: modelling and validation*. Dept of Physical Geography and Ecosystem Science—Lund University. Thesis, pp 25–29.
- [25] Tillier S., (2011). *Gérer durablement la forêt méditerranéenne: exemple du parc naturel régional des Alpilles*. Thèse de doctorat en Géographie. Université du Maine. pp: 389.
- [26] WHO (2017). *World Health Organization annual report*. <https://www.who.int/health-topics/wildfires>.
- [27] <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat>.
- [28] <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>.
- [29] <http://www.aveyron.gouv.fr/>