

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة باتنة 1

UNIVERSITE DE BATNA 1

معهد العلوم البيطرية و العلوم الزراعية

INSTITUT DES SCIENCES VETERINAIRES ET
DES SCIENCES AGRONOMIQUES



Thèse

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences

Filière : Sciences agronomiques

Option : Sciences forestières

THEME

**Application de la télédétection et du S.I.G. dans la
caractérisation des types de stations forestières dans le
massif de Ouled Yagoub - Algérie**

Présenté par : M. CHAFAI Chaouki

Soutenue le : 17/04/2024

Jury :

Président :	BENMESSAOUD H.	Prof.	Université de Batna 1
Rapporteur :	RABHI K.	Prof.	Université de Tizi Ouzou
Co-Rapporteur :	SGHAIR T.	Prof.	INRGREF-Tunisie
Examineurs :	KERRACHE G.	M.C. (A)	Université de Batna 1
	KHELOUFI A.	M.C. (A)	Université de Batna 2

Année universitaire : 2023/2024



Dédicaces

Au nom de Dieu le tout puissant et le très miséricordieux par la grâce duquel j'ai pu réaliser ce travail que je dédie à :

** Mes chers parents, ma mère et mon père, c'est grâce à eux que je suis arrivé à ce stade. Ils n'ont jamais cessé de m'encourager et de me motiver. Si je dois consacrer toute ma vie pour eux je ne peux rendre ce qu'ils m'ont fait.*

Tous les membres de ma petite et grande famille :

** Ma chère femme Fatima, et mes deux yeux Loujain et Jana*

** Mes chers frères : Chamseddine et Ali*

** Mes chères sœurs : Zineb, Sabah et Meriem ;*

A tous mes amis et collègues à l'université de Batna 2 et à l'école nationale des forêts de Batna

A tous les forestiers du monde

A tous ceux et toutes celles qui me connaissent et qui m'aiment



Chaouki CHAFAI

Remerciements

plus sincères et ma profonde gratitude à :

Feu **M. BENTOUATI A.** *Professeur* à l'institut des sciences vétérinaires et sciences agronomiques, Université de Batna 1, pour avoir proposé ce thème, et m'avoir guidé le long de ce travail, pour sa disponibilité, sa compréhension, sa gentillesse ses conseils et encouragements que je ne vais jamais oublier. Que Dieu ait pitié de lui, lui accorde la bonne fortune et fasse des vastes Paradis sa demeure.

Monsieur **M. RABHI K.** *Professeur* à l'université de Tizi Ouzou, pour m'avoir guidé à achever ce travail, pour ses encouragements, sa disponibilité, sa compréhension, sa gentillesse et ses conseils que je ne vais jamais oublier.

Monsieur **SGHAIER T.**, *Professeur* à l'INRGREF de Tunis, trouve ici ma gratitude et mes remerciements d'avoir accepté de codiriger cette Thèse, ses conseils, orientations et encouragements m'étaient très utiles.

Monsieur **BENMESSAOUD H.** *Professeur* à l'institut des sciences vétérinaires et sciences agronomiques, Université de Batna 1, qui me fait l'honneur de présider le jury.

Monsieur **KERRACHE G.**, *Maitre de conférences -A-* à l'institut des sciences vétérinaires et sciences agronomiques, Université de Batna 1, qui me fait l'honneur d'examiner ce travail, et d'avoir accepté de faire partie de ce jury.

Monsieur **KHELOUFI A.**, *Maitre de conférences -A-* à l'université de Batna 2, qui a accepté d'examiner mon travail, malgré ses nombreuses obligations.

J'exprime ma reconnaissance à Mlle **KHERCHOUCHE D.**, M. **SI BACHIR A.**, M. **ARAR A.**, M. **CHAFAA S.** et M. **BEZZALLA A.** pour m'avoir aidé en matière de consultations, d'orientations et d'encouragements.

Toute ma reconnaissance et mes remerciements à tous les forestiers de la conservation de Khenchela, surtout : **KHELLOUT Y.**, **BOUZEKRI B.**, **ATALLAH R.**, **KHEMISSI, HARRATH M.**, **AIDEL B.**, **YOUCEF** et tous les forestiers de la circonscription d'El **Hamma**, Pour leur aide précieux durant mon travail de terrain.

En guise de reconnaissance, je tiens également à remercier :

toutes les personnes qui, par leurs conseils,

leur soutien moral et leur amitié,

ont contribué à la réalisation de ce travail.

TABLE DES MATIERES

Dédicaces	
Remerciements	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
Introduction générale.....	1
CHAPITRE I : Milieu d'étude.....	4
1.1. Localisation géographique.....	4
1.2. Caractéristiques physiques	4
1.2.1. Relief.....	4
1.2.2. Géologie et pédologie	6
1.2.3. Réseau hydrographique.....	7
1.3. Caractéristiques climatiques	7
1.3.1. Les précipitations moyennes.....	8
1.3.2. Les températures moyennes	9
1.3.3. Synthèse climatique	10
1.3.4. Les autres facteurs climatiques	12
1.4. Les formations forestières	13
CHAPITRE II : Evaluation de la qualité des stations forestières	15
Introduction	15
2.1. Matériel et Méthodes	17
2.1.1. Présentation succincte de la zone d'étude	17
2.1.2. Collecte et traitement des données.....	19
2.1.3. Système d'évaluation des indicateurs.....	21
2.1.4. Critères d'agrégation	23
2.2. Résultats.....	23
2.2.1. Variation de l'indice de qualité en fonction de la distribution spatiale.....	23
2.2.2. Distribution spatiale des évaluations de qualité.....	25
2.3. Discussion.....	28
Conclusion.....	32

CHAPITRE III : Typologie des peuplements forestiers	33
Introduction	33
3.1. Matériel et méthodes	35
3.1.1. Présentation de la série d'étude.....	35
3.1.2. Matériel	36
3.2. Résultats et discussion	41
Conclusion.....	55
CHAPITRE IV : Détection des zones brûlées de la forêt d'Ouled Yagoub	56
Introduction	56
4.1. Matériels, données et approches méthodologiques	57
4.1.1. Données et logiciels	57
4.1.2. Approche méthodologique.....	57
4.1.3. Prétraitements des images satellitaires.....	59
4.1.4. Classification supervisée de l'image Sentinel 2A (2020).....	60
4.2. Résultats et discussions	61
4.2.1. Cartographie des zones brûlées.....	64
Conclusion.....	70
Conclusion générale	71
Recommandations et propositions	73
Perspectives.....	74
Références bibliographiques :	75

Liste des figures

Figure 1 : Carte de localisation de la zone d'étude	5
Figure 2: Variations mensuelles des précipitations (1981-2021).....	8
Figure 3: Régime saisonnier des pluies de la zone d'étude (1981-2021).....	9
Figure 4 : Variations moyennes mensuelles des températures minima et des maxima	9
Figure 5 : Le diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gausсен de la zone d'étude (1981-2021).....	10
Figure 6 : Projection de la zone d'étude dans le Climagramme d'Emberger.....	12
Figure 7 : Carte de situation de la zone d'étude.....	18
Figure 8 . Le processus de construction du système d'indice d'évaluation. (AHP : Analytical Hierarchy Process - Processus d'Analyse Hiérarchique).....	21
Figure 9 : Indice de qualité de station forestière (FSQI) avec distribution spatiale dans la forêt domaniale d'Ouled Yagoub. (1 à 16 : code des parcelles forestières).....	24
Figure 10 : Pourcentages de surfaces en fonction des classes d'indice de qualité de station forestière dans la forêt domaniale d'Ouled Yagoub.	26
Figure 11 : Distribution spatiale des grades de qualité de station forestière dans la forêt domaniale d'Ouled Yagoub.	28
Figure 12 : Carte de localisation de la série Aoures.....	36
Figure 13 : Formulaire de saisie développé sous Microsoft Access.	41
Figure 14 : Répartition des superficies des parcelles par tranches d'altitudes.	42
Figure 15 : Répartition des superficies des parcelles par classes de pentes.	43
Figure 16 : Répartition des superficies des parcelles par exposition	43
Figure 17 : Répartition des superficies des parcelles	44
Figure 18 : Composition colorée (B8-B3-B2) de l'image de l'année 2020.	60
Figure 19 : Carte d'occupation du sol de la zone d'étude en 2020.	62
Figure 20 : Répartition des superficies en (%) des classes d'occupation du sol en 2020	63
Figure 21 : Carte des zones incendiées en 2021.....	65
Figure 22 : Carte d'occupation des zones brûlées avant l'incendie de 2021.	66
Figure 23 : Répartition des surfaces incendiées par type d'occupation	67

Listes des tableaux

Tableau 1 : Profil topographique de la zone d'étude.	6
Tableau 2. Les normes de notation pour les indicateurs d'évaluation de la qualité des stations forestières et leurs classes.	20
Tableau 3 : Matrice de pondération des critères par paires à l'aide du modèle AHP pour l'évaluation de la qualité des stations forestières. (C1 à C8 : critères ou paramètres écologiques)	22
Tableau 4 : Valeurs de pondération pour chaque critère utilisé pour l'évaluation de la qualité des forêts.	23
Tableau 5 : Statistiques descriptives de l'indice de qualité de station forestière (FSQI) des parcelles forestières dans la forêt domaniale d'Ouled Yagoub.	24
Tableau 6 : ANOVA - Comparaison des parcelles selon l'indice de qualité de station forestière (FSQI).....	25
Tableau 7 : Comparaison des parcelles forestières basée sur les valeurs moyennes de l'indice de qualité de station forestière FSQI (Test de Newman-Keuls).....	25
Tableau 8 : Superficie et pourcentages de superficie des parcelles forestières dans la forêt domaniale d'Ouled Yagoub selon les classes de qualité de station forestière.....	27
Tableau 9 : Typologie des peuplements par parcelle.	45
Tableau 10 : Répartition des taux et des surfaces incendiées par type d'occupation.....	67

Liste des abréviations :

%: pourcent

°C : degré Celsius

AHP : Analytical Hierarchy Process

BAI : Burned Area Index

cm : Centimètre

CV : coefficient de variation

Dj : Djebel

FAO : Food an Agricultural Organization

GPS : global positioning system

H. : Humide

ha : hectare

M : Maxima

m : Mètre

m : minima

mm : Millimètre

MNT : Modèle numérique de terrain

O. : Oued

P° : Précipitation

PAHE : printemps automne hiver été

PIR : proche infrarouge

PNUE : Programme des Nations Unies pour l'environnement

RN : route nationale

S.H. : Sub-Humide

SWIR : Short Wave Infra-Red

T° : Température

UNGA : United Nations General Assembly

UTM : Universal Transvers Mercator

µm: micromètre

Introduction générale

Les écosystèmes forestiers du monde entier sont confrontés à de graves menaces, notamment la dégradation de la biodiversité, la déforestation, la désertification et les incendies de forêt. Ces problèmes environnementaux sont devenus des préoccupations mondiales et ont suscité une attention particulière de la part des Nations Unies, qui ont adopté le Plan stratégique des Nations Unies pour les forêts (2017-2030) en 2017, appelant les pays à gérer durablement leurs ressources forestières (U.N.G.A., 2017).

La région nord-africaine, en particulier l'Algérie, abrite des écosystèmes forestiers des zones semi-arides d'une importance cruciale. Ces forêts jouent un rôle vital dans la prévention de l'expansion du désert et la régulation des cycles de l'eau (Benmessaoud, 2009). Cependant, elles sont confrontées à de multiples pressions, notamment la surexploitation des ressources, les incendies de forêt récurrents et les défis climatiques. Entre 2008 et 2021, les incendies de forêt ont touché près d'un quart de la superficie forestière totale en Algérie (D.G.F., 2018 ; E.F.F.I.S., 2022).

La forêt domaniale d'Ouled Yagoub, située dans le nord-est de l'Algérie, revêt une importance particulière. Elle est considérée comme étant l'une des forêts les plus vastes d'Afrique du Nord. Elle abrite une diversité impressionnante d'espèces végétales, notamment le cèdre de l'Atlas, le pin d'Alep, le chêne vert, le genévrier oxycèdre et le frêne dimorphe (B.N.E.D.E.R. 2008). Cependant, cette forêt est soumise à des pressions anthropiques et naturelles, notamment la surexploitation des ressources, les incendies de forêt et le dépérissement des arbres (Abdessemed, 1984-1985 ; Bentouati & Bariteau, 2006 ; Meddour-Sahar & Derridj, 2012 ; Rahmani & Benmessaoud, 2019). Ces menaces ont des conséquences graves sur l'environnement, la société et l'économie (Bedia *et al.*, 2014).

Les stations forestières constituent des unités de base de la classification écologique des milieux forestiers. Elles se définissent comme des espaces homogènes en termes de conditions édaphiques, climatiques et topographiques, qui influencent de manière déterminante la composition floristique et la dynamique des peuplements forestiers (Dhôte, 1997).

La qualité des stations forestières, qui détermine la capacité d'une zone forestière à produire de la biomasse, est un élément essentiel de la gestion forestière (Chen *et al.* 1998). Pour évaluer cette qualité, les systèmes de positionnement mondial (GPS), la télédétection (RS) et les systèmes d'information géographique (SIG) sont devenus des outils indispensables (Wang

et al., 2021). Différentes méthodes, telles que l'analyse multicritère AHP, l'évaluation floue, et l'analyse de corrélation grise, sont couramment utilisées pour évaluer la qualité des stations forestières (Xia *et al.*, 2016 ; Wang *et al.*, 2011 ; Lyu *et al.*, 2015).

Dans ce contexte, notre étude vise à évaluer la qualité des stations forestières dans la forêt domaniale d'Ouled Yagoub en utilisant une approche novatrice basée sur les SIG et l'analyse multicritère AHP. Cette méthodologie, appliquée pour la première fois dans les forêts des zones semi-arides d'Afrique du Nord, tient en compte de huit indicateurs environnementaux, notamment l'altitude, la pente, l'orientation, la matière organique du sol, la profondeur de la couche de sol, la texture du sol, le pH du sol et la dégradation des terres. L'objectif est de fournir des informations aux services forestiers pour élaborer des plans de gestion visant à préserver et à restaurer la qualité des stations forestières.

La série forestière Aoures, faisant partie de la forêt domaniale de Ouled Yagoub, est une composante essentielle de cette région. Cependant, elle est soumise à des pressions similaires, y compris l'exploitation forestière non réglementée et les risques accrus liés aux incendies de forêt (Quézel, 2000).

L'objectif principal de la présente étude est d'améliorer la gestion de la forêt domaniale de Ouled Yagoub plus précisément la série Aoures zone pilote dans la Wilaya de Khenchela, en mettant en œuvre une approche intégrée basée sur les SIG et l'inventaire dendrométrique des peuplements de pin d'Alep dans cette région. Cette approche nous permettra d'obtenir des données précises sur les peuplements forestiers et de mieux comprendre leur structure, contribuant ainsi à une gestion forestière plus efficace.

Enfin, la dégradation continue des forêts algériennes nécessite une surveillance constante et des efforts de préservation. Nous proposons d'utiliser la télédétection, en particulier les images du satellite Sentinel 2A, pour évaluer les changements d'occupation des sols avant et après les incendies de forêt dans la région d'Ouled Yagoub. Cette méthode permettra de délimiter les zones brûlées et de proposer des mesures de conservation pour préserver les espèces végétales et réduire le risque d'extinction.

En somme, cette étude s'inscrit dans le contexte global de la préservation des écosystèmes forestiers en Algérie, en mettant en avant l'importance de l'innovation technologique, de l'analyse spatiale et de la gestion intégrée pour relever les défis actuels de la gestion forestière durable et de la conservation de la biodiversité.

Dans cette optique ; la thèse que nous proposons est basé essentiellement sur 4 aspects complémentaires :

1. Etude du milieu.
2. Évaluation de la qualité des stations forestières par une approche multicritère SIG-AHP.
3. Détermination de la typologie des peuplements forestiers de pin d'Alep par une approche dendrométrique avec une proposition d'opérations à entreprendre au niveau de chaque peuplement en vue d'une gestion durable de ce milieu forestier.
4. Etude d'occupation du sol avant et après l'incendie dévastateur de 2021 avec proposition d'actions pour une meilleur gestion de la situation actuelle de la forêt.

Et enfin une conclusion générale.

CHAPITRE I : Milieu d'étude

1.1. Localisation géographique

La forêt domaniale des Ouled Yagoub est située dans le massif forestier des Aurès, dans le nord-est de l'Algérie, précisément au nord-ouest de la wilaya de Khenchela. Elle est délimitée par les coordonnées géographiques (WGS 1984) suivantes :

Ouest = E 6° 47' 15.6336, Est = E 7° 2' 2.5548

Sud = N 35° 14' 23.7804 , Nord = N 35° 29' 0.1464

Cette région est bordée au nord par la plaine de Kais, à l'est par la commune d'El Hamma et la dépression d'Outa El Meroudj, ainsi que par la limite de la commune de Bouhmama. À l'ouest, le massif est limité par la commune de Chelia (Figure 1).

Elle se trouve sur le territoire de la wilaya de Khenchela et relève des communes de Tamza et Kais. Il est à proximité de cinq grandes agglomérations, à savoir : Batna, Oum El Bouaghi, Ain El Beidha, Kais et Khenchela.

1.2. Caractéristiques physiques

L'analyse du milieu physique de cette forêt se concentre sur différents aspects : relief et ses composantes (pente, exposition et altitude), réseau hydrographique, occupation du sol, géologie et érosion. Nous devons également prendre en compte les facteurs bioclimatiques.

1.2.1. Relief

La forêt domaniale d'Ouled Yagoub présente une topographie très prononcée, avec un relief montagneux caractérisé par une succession de crêtes étroites et discontinues. Elle s'étend dans la même direction SO-NE et est contenue dans un rectangle mesurant 13,5 km de long sur 6,5 km de large, situé à une distance de 17 km de la cédraie de Chelia. Au nord, elle se prolonge en dessous de la route nationale (RN 29) reliant Khenchela à Kais et Touffena.

Cet ensemble montagneux est principalement composé de calcaire et de marnes. Il est constitué de sommets distincts et élevés s'étendant du nord au sud, avec des altitudes comprises entre 1200 m et 2100 m. Parmi ces sommets, on trouve le Djebel Chentgouma, culminant à 2113 m à l'est, ainsi que le Djebel Beker (2080 m), et entre ceux-ci se trouvent des sommets tels que le Dj Bezaz (1941 m), le Dj Aidel (2173 m) et le Dj Feraoun (2093 m).

Cette forêt se caractérise également par des pentes très raides, dépassant les 25 %, ainsi qu'un réseau hydrographique hiérarchisé. Ce réseau façonne le relief par le biais d'une série de cours d'eau qui se rejoignent en aval dans la dépression d'Outa El Merroudj et l'Oued Tamza.

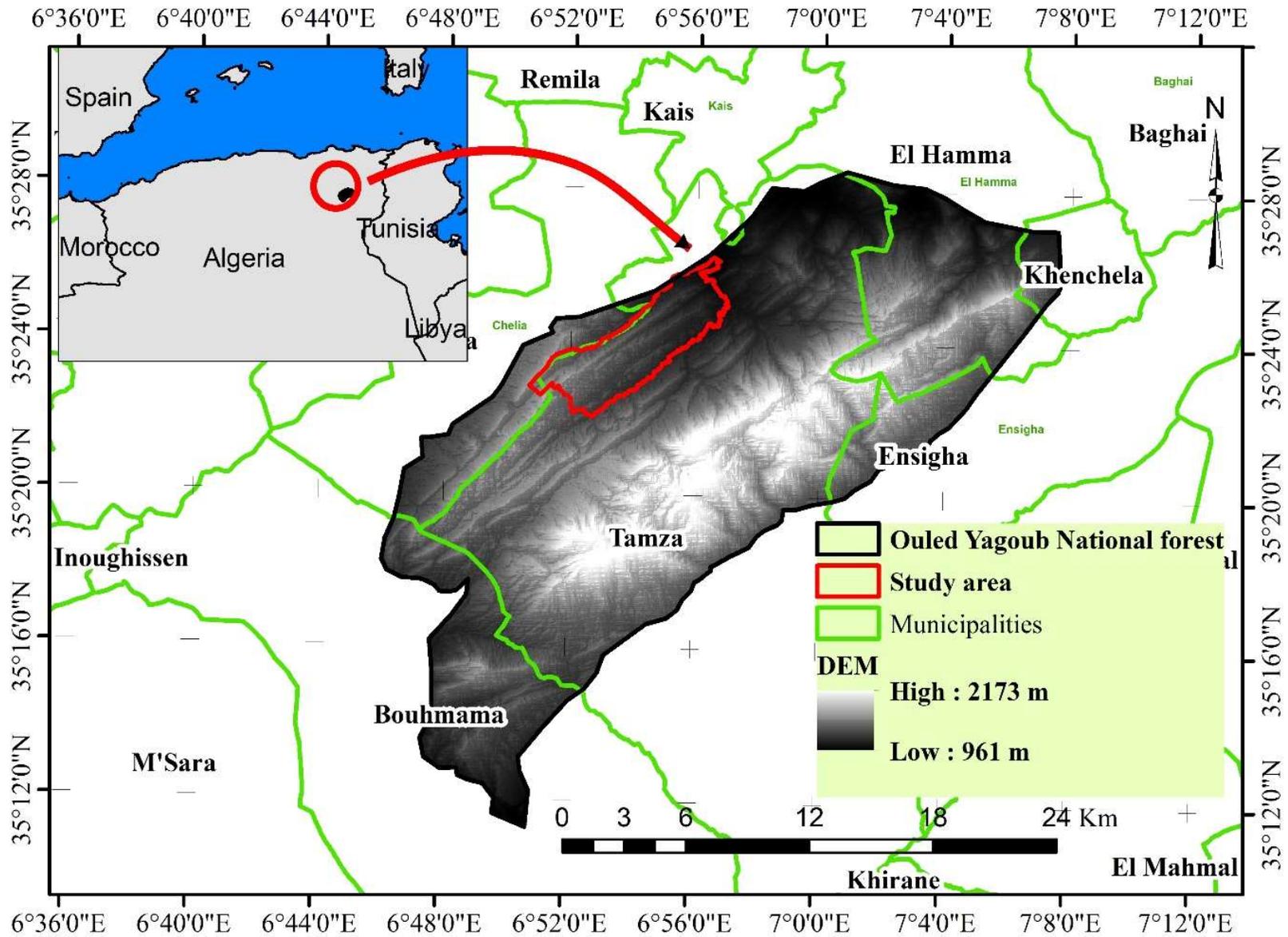


Figure 1 : Carte de localisation de la zone d'étude

Les pentes jouent un rôle significatif dans la dynamique du relief et sont considérées comme l'un des principaux facteurs écologiques. Ainsi, il est essentiel de prendre en compte l'importance des pentes, car elles influencent grandement la stabilité de l'environnement, en particulier dans une zone caractérisée par un relief élevé (Fleurisson, 2001).

Les altitudes ont également un impact sur l'écosystème forestier. Elles interagissent avec de nombreux facteurs tels que le climat, l'organisation en étages et l'adaptation du cèdre à son milieu.

Le tableau suivant présente le profil topographique de la zone d'étude, établi à partir du modèle numérique de terrain (M.N.T.) :

Tableau 1 : Profil topographique de la zone d'étude.

Altitude (m)	% de la surface de la zone	Pente (%)	% de la surface de la zone
1000 à 1200	0.4	0 - 3 %	1.7
1200 à 1400	20.23	3 -12.5 %	13.68
1400 à 1600	31.67	12.5 – 25%	26.25
1600 à 1800	28.58	> 25 %	58.37
1800 à 2000	16.39		
> 2000	2.73		

1.2.2. Géologie et pédologie

La cédraie de Ouled Yakoub repose sur le Crétacé supérieur (Laffite, 1939). Notre zone d'étude est caractérisée par trois formations géologiques en fonction de l'altitude :

Le Barrémien est la formation dominante et se trouve principalement au centre du massif à Djebel Aidel et Ras Boudalène, avec un faciès principalement constitué de grès.

L'Aptien couvre les zones de moyenne altitude, notamment Djbel Beker, Feraoun, Bezez et Chentgouma, avec la présence de calcaire, de dolomie et une prédominance de grès et de marnes.

L'Albien forme une bande plus ou moins régulière autour de la zone d'étude, principalement aux basses altitudes, avec la présence de grès et de marnes rouges associées aux marnes, calcaires et grès.

Du point de vue pédologique, selon l'étude de BNEDER (2010), les sols présents dans la zone d'étude se résument principalement à :

- Les sols brunifiés avec un profil ABC : situés en pied de montagne, ils se développent sur un matériau parental composé principalement de grès et de calcaire. Ces sols se caractérisent par un profil argileux à argilo-limoneux de profondeur moyenne.

- Les rendzines : ils se trouvent à des altitudes plus élevées que les sols brunifiés. Ce sont des sols peu profonds (< 45 cm), à texture argileuse à argilo-limoneuse, très riches en matière organique, notamment dans la couche supérieure.

- Les lithosols : ils dominent les hautes altitudes et sont des sols peu développés, ne contenant que des traces de matières organiques, caractérisés par un profil de type C ou AC.

1.2.3. Réseau hydrographique

Le réseau hydrique dans les hauteurs du massif montagneux de Ouled Yagoub est alimenté par de nombreux talwegs denses sur les sommets abrupts et accidentés, formant des cours d'eau encaissés qui façonnent des versants très pentus (Chafai, 2016).

Les principaux cours d'eau au nord de cette zone sont : Oued Khafadja, O. Bou Barou, O. Boustane, O. Issoual, O. Ibikane, O. Tafrent, O. Tamarsit et O. Tizougas.

Au sud de la zone, les principaux cours d'eau sont : O. Tamza, O. El Houdh, O. Chentgouma, O. Zarif, O. Aziza, O. Maazouz, O. Taguerjoumt, O. Houira et Ighzer Iguechlane.

La nature lithologique des terrains favorise la présence de nombreuses sources qui jaillissent le long des failles, contribuant au réseau hydrographique malgré leur faible débit. De plus, les précipitations relativement importantes dans la région sont dues au facteur d'altitude.

Ces cours d'eau se caractérisent par des écoulements temporaires mais parfois très violents, en particulier ceux des versants sud du massif.

1.3. Caractéristiques climatiques

Le climat joue un rôle essentiel dans la morphologie du relief, la végétation, la genèse et le type des sols, ainsi que dans les activités agro-pastorales.

Les données climatiques de la zone d'étude sont extraites de la plateforme POWER de la NASA, pour la période de 1981 à 2021, consulté le 28/02/2023 à 13 :00 sur le lien suivant :

<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

avec les Metadonnées suivantes :

NASA/POWER CERES/MERRA2 Native Resolution Monthly and Annual

Dates (month/day/year): 01/01/1981 through 31/12/2021

Location: Latitude 35,3569° Longitude 6,9063°

Elevation from MERRA-2: Average for 0,5 x 0,625 degree lat/lon region = 1087,32 meters

T2M MERRA-2 Temperature at 2 Meters (C)

T2M_MAX MERRA-2 Temperature at 2 Meters Maximum (C)

T2M_MIN MERRA-2 Temperature at 2 Meters Minimum (C)

PRECTOTCORR_SUM MERRA-2 Precipitation Corrected Sum (mm)

1.3.1. Les précipitations moyennes

Il s'agit de pluies orographiques dont l'intensité est déterminée par l'altitude et l'exposition des reliefs. Le régime hydrique est de type méditerranéen, avec une pluviométrie caractérisée par une irrégularité saisonnière et interannuelle. La moyenne annuelle cumulée des précipitations est d'environ 379 mm. La figure 2 représente la variation des précipitations moyennes mensuelles à une altitude de 1087 m.

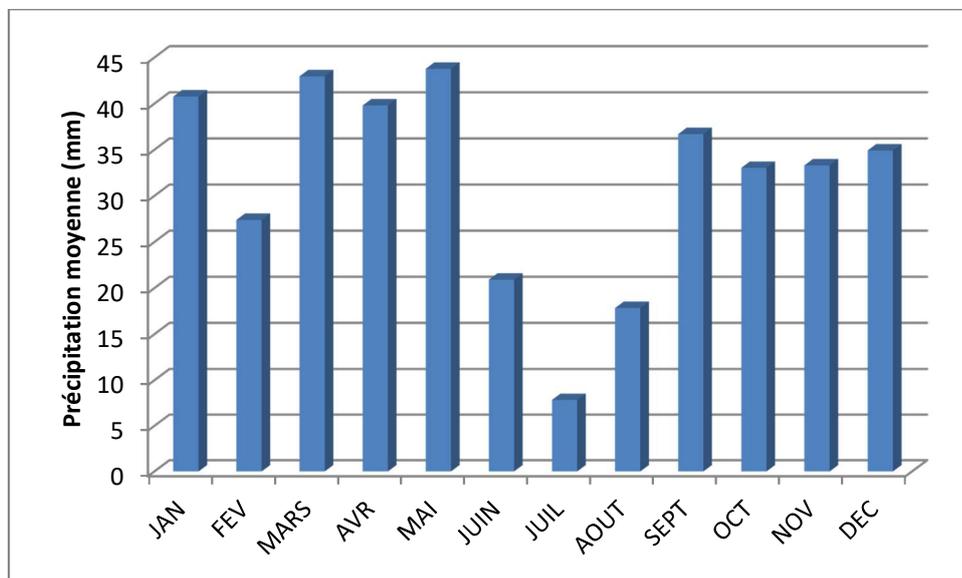


Figure 2: Variations mensuelles des précipitations (1981-2021).

Le régime saisonnier des précipitations dans la forêt domaniale de Ouled Yagoub est de type P.A.H.E. La pluviométrie au printemps représente 34% du total annuel, tandis que celle de l'automne est de 27%. En hiver, elle est de 27%, et enfin, pendant l'été, elle est seulement de 12% (Figure 3).

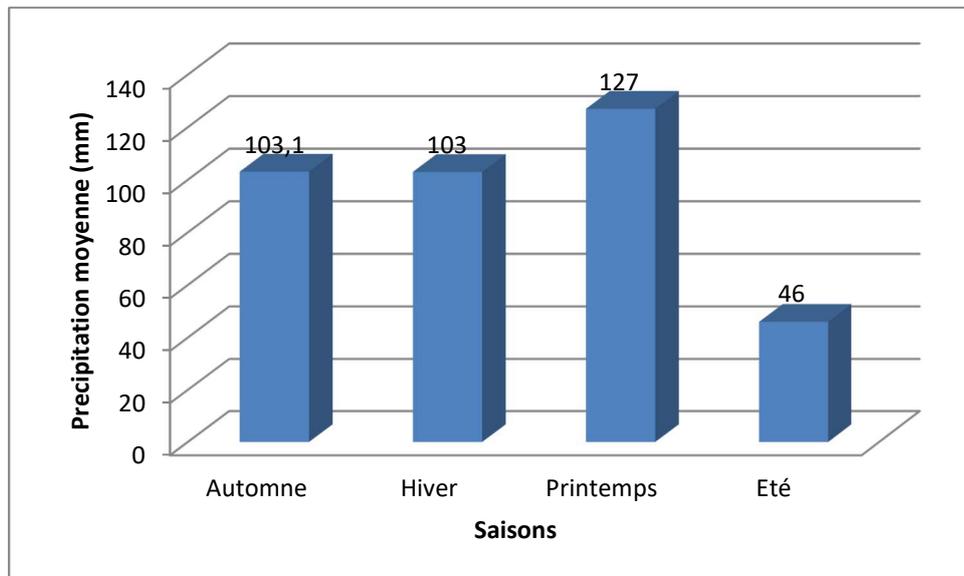


Figure 3: Régime saisonnier des pluies (1981-2021).

1.3.2. Les températures moyennes

Tout comme les précipitations, les températures jouent un rôle dans la répartition des espèces forestières et leur croissance. La forêt domaniale de Ouled Yagoub connaît un régime thermique de type méditerranéen et montagnard, avec des hivers frais. Les mois les plus froids sont janvier et février, avec une température moyenne de 5 °C. Les étés sont chauds, avec le mois de juillet atteignant une moyenne de 26 °C. On observe également une forte amplitude thermique pouvant atteindre 26 °C. La figure 4 illustre la variation des températures maximales et minimales mensuelles.

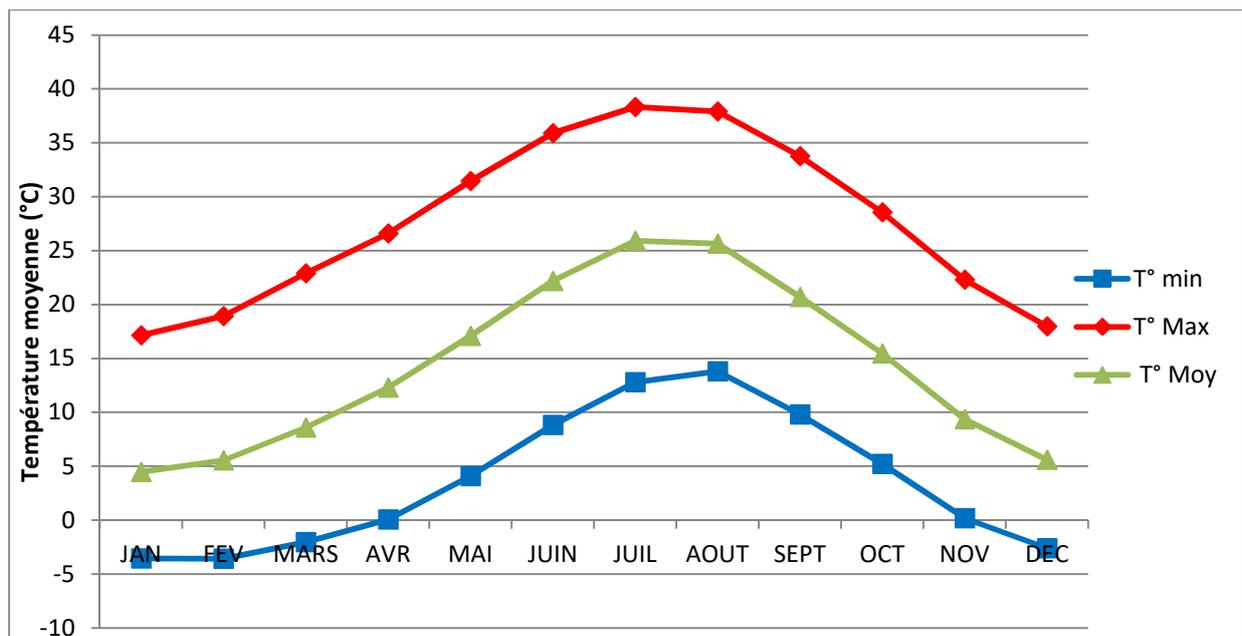


Figure 4 : Variations moyennes mensuelles des températures minima et des maxima

1.3.3. Synthèse climatique

La synthèse climatique est réalisée en combinant les données relatives aux précipitations et aux températures afin d'identifier :

- Les mois présentant un faible niveau de précipitations tout au long de l'année, grâce à l'utilisation du diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausсен.
- Les différents types de bioclimats en utilisant la méthode d'Emberger.

1.3.3.1. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausсен

Le diagramme ombrothermique est une représentation graphique qui superpose les courbes annuelles des précipitations et des températures.

D'après le diagramme présenté ci-dessous (Figure 5) correspondant à la zone d'étude, la période de sécheresse dure environ quatre (04) mois. Cependant, cette durée varie en fonction de l'altitude et de l'exposition géographique. Elle est plus courte et plus tardive pour les zones de haute altitude, tandis qu'elle est plus précoce et plus longue pour les versants Sud par rapport aux versants Nord.

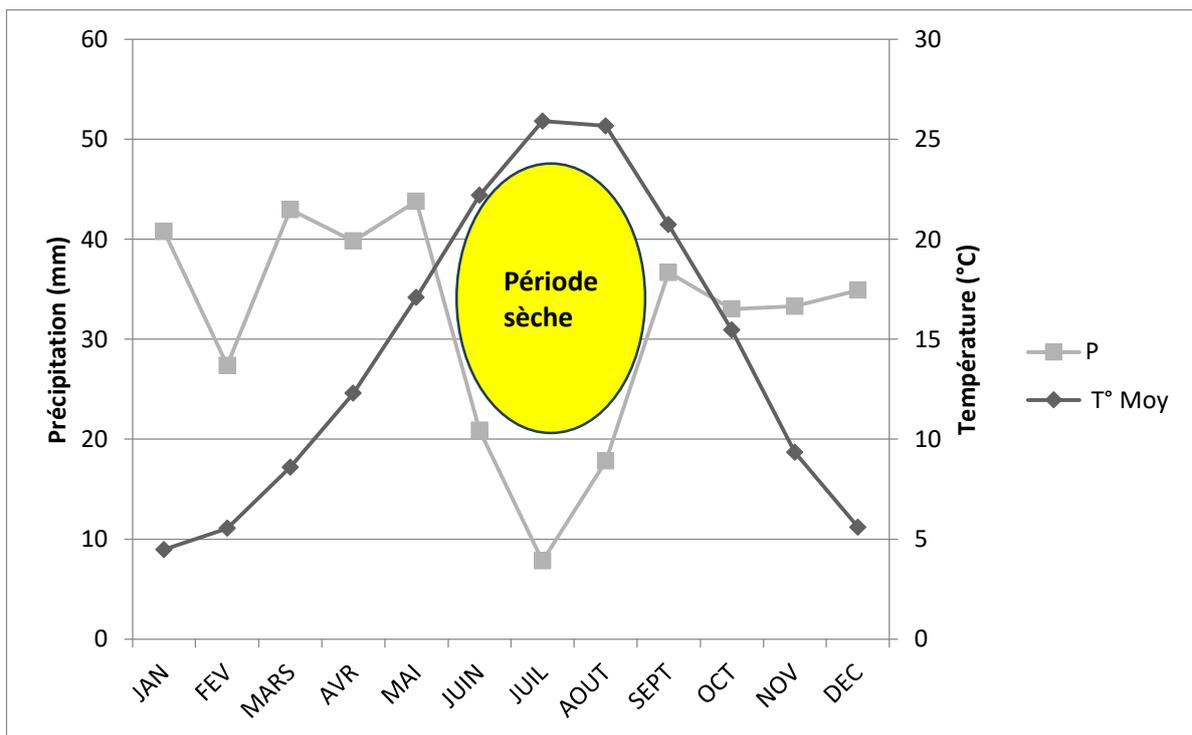


Figure 5 : Le diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gausсен de la station (1981-2021).

1.3.3.2. Climagramme d'Emberger

Le quotient pluviothermique d'Emberger (Q_2) est calculé en utilisant trois paramètres climatiques. Il est défini par la formule (Emberger, 1930) :

$$Q_2 = \frac{2000 \times P}{M^2 - m^2}$$

où :

P: représente la pluviométrie annuelle en mm/an.

M: est la moyenne des températures maximales du mois le plus chaud en degrés Kelvin.

m: est la moyenne des températures minimales du mois le plus froid en degrés Kelvin.

La valeur de $Q_2 = 31.15$ pour la zone d'étude est calculé sur la base des valeurs :

P : Précipitation moyenne annuelle en (mm) = 379

M : Températures maximales du mois le plus chaud en (°C) = 38.3

m : Températures minimales du mois le plus froid en (°C) = -3.6

En utilisant la valeur du quotient pluviothermique d'Emberger (Q_2), et en le reportant sur le climagramme d'Emberger (figure 6), nous pouvons déterminer l'étage bioclimatique de la zone d'étude. Nous constatons que la zone d'étude se situe dans l'étage bioclimatique semi-aride à hivers froids.

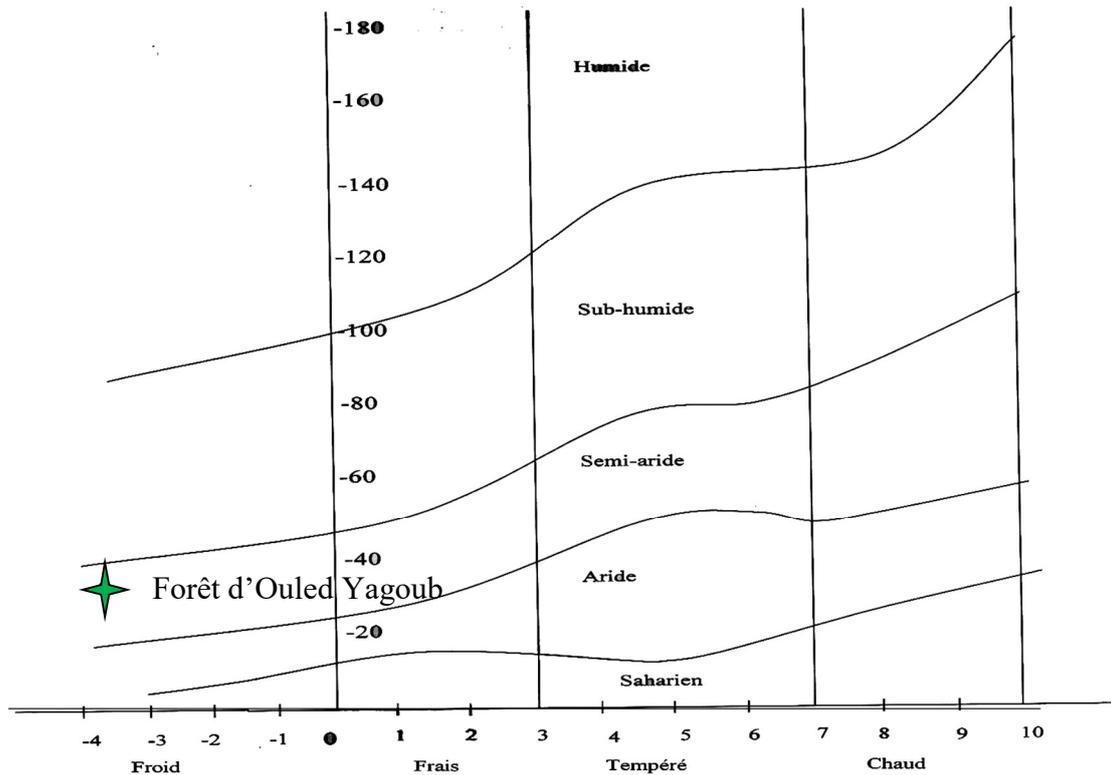


Figure 6 : Projection de la zone d'étude dans le Climagramme d'Emberger.

1.3.4. Les autres facteurs climatiques

Selon BNEDER (2010), les données relatives à ces facteurs climatiques proviennent de la station météorologique de l'O.N.M. de Khenchela (1990/2006) faute de données disponibles dans les autres stations.

La zone connaît en moyenne 4,6 jours de chutes de neige par an concentrées entre décembre et février. Ce phénomène est peu fréquent en basse altitude, mais plus courant en haute altitude, notamment dans les groupements de cèdres.

En ce qui concerne le gel, il se manifeste principalement pendant la saison froide, avec une moyenne de 29,1 jours de gel par an, s'étalant de novembre à avril, avec une fréquence plus marquée en hiver.

Les vents sont influencés par les conditions topographiques locales, ce qui détermine leur vitesse. La vitesse maximale est enregistrée au mois de novembre (4,6 m/s, soit 16,5 km/h). Ces vents maximaux sont souvent accompagnés de fortes pluies.

La grêle est généralement un phénomène localisé, mais elle cause des dommages aux arbres, en particulier aux branches et à l'écorce. Elle a des effets préjudiciables pendant la période de floraison et de fructification des végétaux. Étant donné qu'il s'agit d'une zone forestière en haute altitude, sa fréquence est plus élevée mi-avril et en août, parfois en juin et en août, comme le montrent les données recueillies sur le terrain.

Un autre facteur climatique ayant un impact négatif est la présence d'orages tout au long de l'année, pendant 29,9 jours, mais avec une fréquence plus élevée pendant le semestre chaud (mai à octobre), qui représente 85 % des précipitations orageuses observées (BNEDER, 2010).

Enfin, le sirocco, en tant que phénomène nuisible principalement pour les jeunes plants et la régénération naturelle, est fréquent mi-avril et en août, couramment en période estivale (mois de juin et août).

En conclusion, on peut dire que le climat de la forêt domaniale d'Ouled Yagoub se caractérise par trois facteurs : la sécheresse estivale, le froid hivernal, une pluviosité assez importante, surtout sur le versant nord, et une amplitude thermique élevée. Le printemps est la saison la plus pluvieuse.

1.4. Les formations forestières

Selon BNEDER (2008), la forêt domaniale d'Ouled Yacoub (18 671 ha) se compose à 81 % de véritables forêts et à 19 % de maquis et maquis arborés.

La superficie de la véritable forêt s'étend sur 15 253 hectares et se répartit comme suit :

- 3 926 ha de vieilles futaies de cèdre de l'Atlas, dont 3 049 ha sont denses.
- 1 181 ha de vieilles futaies de cèdre de l'Atlas mélangées avec du chêne vert, dont 933 ha sont claires.
- 638 ha de vieilles futaies denses de cèdre de l'Atlas mélangées avec du chêne vert et du frêne dimorphe.
- 1 179 ha de forêt de chêne vert, dont 196 ha de taillis clair, 735 ha de vieilles futaies claires et 248 ha de taillis denses.
- 993 ha de futaies jardinées claires de pin d'Alep.
- 216 ha de jeunes futaies claires de pin d'Alep.
- 610 ha de forêt claire de pin d'Alep au stade perchis.

- 1 314 ha de futaies jardinées denses de pin d'Alep.
- 1 328 ha de jeunes futaies denses de pin d'Alep.
- 1 849 ha de forêt dense de pin d'Alep au stade de perchis.
- 270 ha de vieilles futaies denses de pin d'Alep.
- 1 684 ha de jeunes futaies claires de pin d'Alep et chêne vert.
- 65 ha de forêt incendiée de pin d'Alep.

Les maquis et maquis arborés couvrent 3 293 ha, comprenant :

- 1 141 ha de maquis clairs à base de chêne vert et genévrier oxycèdre.
- 1 053 ha de maquis denses à base de chêne vert et genévrier oxycèdre.
- 123 ha de maquis denses à base de chêne vert, genévrier oxycèdre et frêne.
- 976 ha de maquis arborés en chêne vert.

La superficie reboisée compte 125 ha au stade gaulis dense (BNEDER, 2008).

Conclusion

Le chapitre I de cette thèse a fourni une vue détaillée du milieu d'étude, la forêt domaniale des Ouled Yagoub, située dans le massif forestier des Aurès en Algérie. À travers l'exploration de la localisation géographique, des caractéristiques physiques, du réseau hydrographique et du climat, nous avons pu dresser un portrait complet de cet environnement forestier.

La topographie escarpée et montagneuse de la région, avec ses crêtes étroites et ses altitudes variant entre 1200 m et 2100 m, crée un paysage unique influençant la biodiversité et les processus écologiques. Les formations géologiques du Crétacé supérieur et les sols diversifiés contribuent à la richesse de l'écosystème forestier.

Le réseau hydrographique, alimenté par les précipitations et les sources souterraines, façonne le relief et impacte la distribution des espèces végétales et animales. Le climat méditerranéen de la région, caractérisé par des précipitations saisonnières et des températures variant entre les saisons, influence directement la dynamique de la végétation et des sols.

En examinant les formations forestières, nous constatons une diversité remarquable, allant des futaies denses de cèdre de l'Atlas aux maquis clairs à base de chêne vert et genévrier oxycèdre. Cette variété reflète la complexité de l'écosystème et souligne l'importance de sa préservation et de sa gestion durable.

En conclusion, ce chapitre établit une base solide pour la compréhension de l'environnement de la forêt domaniale des Ouled Yagoub, mettant en lumière ses caractéristiques uniques et son importance écologique. Ces informations serviront de fondement à l'analyse plus approfondie des stations forestières et des enjeux de gestion des peuplements forestiers abordés dans les chapitres suivants de cette thèse.

CHAPITRE II : Evaluation de la qualité des stations forestières

Introduction

Actuellement, l'une des principales causes du déclin et de l'érosion de la biodiversité est la dégradation des écosystèmes forestiers. L'équilibre de ces écosystèmes est menacé par l'expansion rapide des paysages de plantes naturelles dans les zones arides avoisinantes. En 2017, l'Assemblée générale des Nations Unies a adopté le Plan stratégique des Nations Unies pour les forêts (2017-2030), qui propose un plan d'action mondial pour chaque pays afin de gérer durablement les diverses ressources forestières et d'améliorer la qualité des terres forestières (U.N.G.A., 2017).

Dans la région nord-africaine, les forêts semi-arides de l'Algérie jouent un rôle essentiel en tant que barrière contre le déplacement du sable et l'extension du phénomène de désertification (Benmessaoud, 2009). L'Algérie est un vaste territoire avec une topographie diversifiée et difficile. La grande différence de latitude entre les frontières nord et sud a résulté en une échelle climatique et une géographie physique riches et diversifiées, favorisant les ressources forestières avec une gamme diversifiée d'espèces biologiques et de types de végétation (D.G.F., 2018). La forêt algérienne qui est considérée comme l'une des forêts les plus habitées dans le nord de l'Afrique, présente le plus grand risque d'incendies en raison des conditions climatiques de sécheresse. En effet, les incendies de forêt ont touché 994 555 ha entre 2008 et 2021, ce qui correspond à 24% de la superficie forestière totale en Algérie, principalement dans les régions forestières de l'ouest et du centre (D.G.F., 2018 ; E.F.F.I.S., 2022).

Au nord-est, la forêt domaniale d'Ouled Yagoub, l'une des forêts les plus importantes d'Afrique du Nord est récemment fait l'objet d'un projet de décret de classement comme un Parc national. Les terres forestières de cette vaste région représentent une réserve importante des fonctions écologiques, abritant des espèces endémiques d'Afrique du Nord telles que le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Endl.) (Carrière 1855), le pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) (Miller, 1768), le chêne vert (*Quercus ilex* L. (Linné, 1753)), le genévrier oxycèdre (*Juniperus oxycedrus* L.) (Linné, 1753) et le frêne sauvage/dimorphe (*Fraxinus dimorpha* Cosson) (Durieu, 1855) (B.N.E.D.E.R., 2008). Les formations forestières comprennent des formations denses et claires de cèdres de l'Atlas, des formations mixtes de cèdre de l'Atlas et de chêne, des forêts de pin d'Alep, des maquis de chêne vert et de genévrier oxycèdre, des maquis de chêne et de frêne sauvage, des prairies et des pâturages de montagne (Beghami *et al.*, 2012).

La forêt d'Ouled Yagoub abrite une riche diversité végétale et représente également un habitat de choix pour une faune originale et diversifiée, mais subit de multiples pressions, à la fois naturelles et anthropiques (Schoenenberger, 1970a-1970b ; Abdessemed, 1981-1984-1985 ; Kadik, 1987 ; Ramade, 1997 ; Beghami *et al.*, 2007 ; Benmesaoud *et al.*, 2009). En plus des causes traditionnelles de dégradation, les incendies de forêt récurrents dans la forêt de pins et le dépérissement de la forêt de cèdres constituent les principales causes de la dégradation actuelle de la forêt d'Ouled Yagoub (Abdessemed, 1984-1985 ; Bentouati & Bariteau, 2006 ; Bentouati, 2008 ; Meddour-Sahar & Derridj, 2012 ; Rahmani & Benmessaoud, 2019). L'ampleur de cette situation, qui entraîne non seulement une dégradation environnementale significative mais aussi des pertes sociales et économiques (Bedia *et al.*, 2014), a été peu étudiée, en particulier en utilisant des techniques et des outils modernes (analyse des systèmes d'information géographique et télédétection).

Dans ce dernier contexte, l'état et la condition du terrain se reflètent dans la qualité des stations forestières (Chen *et al.*, 1998). Le type de terrain forestier et ses caractéristiques combinées déterminent la qualité de station forestière, qui est une combinaison de nombreuses qualités (Yu *et al.*, 2009). La qualité de station forestière fait référence à sa capacité inhérente à produire de la biomasse. Elle est l'expression composite de diverses caractéristiques physiques et chimiques d'une zone forestière (Chung, 1978 ; Zhang *et al.*, 2017).

L'utilisation généralisée de l'informatique et de la technologie "3S" (systèmes de positionnement mondial (GPS), télédétection (RS) et systèmes d'information géographique (SIG)) a conduit au développement d'une meilleure caractérisation des forêts, allant de simples descriptions qualitatives à des analyses quantitatives (Wang *et al.*, 2021). Ces outils sont fréquemment combinés avec des approches statistiques pour l'évaluation de la qualité des stations forestières, notamment le poids de l'entropie (EW), l'évaluation floue, la méthode de l'analyse hiérarchique (AHP) et l'analyse de corrélation grise (Wang *et al.*, 2021) sont de nos jours les approches les plus couramment utilisées. L'EW distribue objectivement les poids en fonction des propriétés physiques des données (Ye, 2010). Lorsqu'il s'agit de données multidimensionnelles, l'évaluation floue et l'analyse de corrélation grise sont moins stables (Xia *et al.*, 2016 ; Wang *et al.*, 2011). Lyu *et al.* (2015) ont utilisé le modèle d'indice intégré pour évaluer la qualité des terres forestières en sélectionnant des variables topographiques et de fertilité du sol à l'aide de la méthode Delphi.

Dans le calcul des poids des indices, l'AHP est plus subjectif et moins complexe (Kumar

2006). Cette méthode vise également à aider la prise de décision afin de dégager la meilleure alternative parmi toutes les possibilités en présence de multiples priorités (Chandio *et al.*, 2013). Ainsi, l'impact du changement d'utilisation des terres sur la qualité physico-chimique des sols forestiers a été étudié par Bonilla-Bedoya *et al.* (2017). La méthode d'analyse multicritère AHP a été utilisée par les chercheurs en Algérie et en Afrique du Nord pour choisir les meilleures décisions à prendre dans l'évaluation et la gestion de situations environnementales telles que le suivi de la sécheresse et de la désertification (Boultif & Benmessaoud, 2017 ; Mihi *et al.*, 2022), l'impact humain sur l'écosystème (Bouzekri & Benmessaoud, 2016), et le développement d'un modèle de compatibilité des terres pour les céréales (Koull *et al.*, 2022).

La présente étude vise à évaluer la qualité des forêts et à examiner la répartition des classes de qualité des stations dans la forêt domaniale d'Ouled Yagoub en adoptant une nouvelle approche d'analyse (SIG-AHP), appliquée pour la première fois, à notre connaissance, dans les forêts arides d'Afrique du Nord, caractérisées par des conditions climatiques et environnementales très contraignantes. À cette fin, nous avons élaboré un système d'indicateurs complet d'évaluation de la qualité des stations forestières liés à la topographie et aux conditions édaphiques, en utilisant huit indicateurs environnementaux, notamment l'altitude, la pente, l'orientation, la matière organique du sol, la profondeur de la couche de sol, la texture du sol, le pH du sol et la dégradation des terres. Nous avons utilisé le modèle AHP pour développer un modèle d'évaluation de la qualité des stations forestières. Les classes de qualité des différentes stations forestières qui seront identifiées constitueront un outil d'aide à la décision aux services forestiers de la région pour l'élaboration des plans de gestion et d'aménagement durables des différents peuplements de la forêt de Ouled Yagoub.

2.1. Matériel et Méthodes

2.1.1. Présentation succincte de la zone d'étude

La zone forestière d'Ouled Yagoub fait partie du massif forestier des Aurès ; elle est située dans le nord de l'Algérie, plus précisément dans la Wilaya de Khenchela. L'agencement spatial de cette forêt révèle une topographie très distincte, présentant un aspect montagneux caractérisé par une série de crêtes étroites et discontinues. Elle fait partie d'un rectangle de 13,5 km de long sur 6,5 km de large, à 17 km de la forêt de cèdres de Chélia, et est alignée dans la même direction SO-NE (Figure 7).

La zone d'étude est répartie en trois stades bioclimatiques distincts, semi-arides avec des

hivers frais à basse altitude, et humides et subhumides avec des hivers froids à haute et moyenne altitude. Les précipitations mensuelles moyennes pour cette région vont de 11 mm dans le mois le plus sec (août) à 57 mm dans le mois le plus humide (mars). Le régime saisonnier des pluies est de type "Printemps. Hiver. Automne. Été" (B.N.E.D.E.R., 2010).

Selon le B.N.E.D.E.R. (2008), la forêt domaniale d'Ouled Yagoub se compose à 81 % de forêt propre et à 19 % de maquis et de maquis boisé. La forêt elle-même est divisée en forêts anciennes de cèdres de l'Atlas et de chêne vert ; forêt dense ancienne de cèdre avec chêne vert et frêne dimorphe, forêts de chêne vert, forêt dense et ouverte de pin d'Alep, forêt ouverte de jeune pin d'Alep et de chêne vert, et forêt brûlée de pin d'Alep.

Le choix de cette zone est basé principalement sur la disponibilité des études de gestion forestière précédentes, qui sont des anciennes études de gestion réalisés sur des parcelles dont l'objectif est la production de bois pour certaine et la protection pour d'autres. De plus, nous notons la composition floristique spécifique et diversifiée dominée par la forêt de cèdre de l'Atlas et les caractéristiques topographiques diversifiées du terrain.

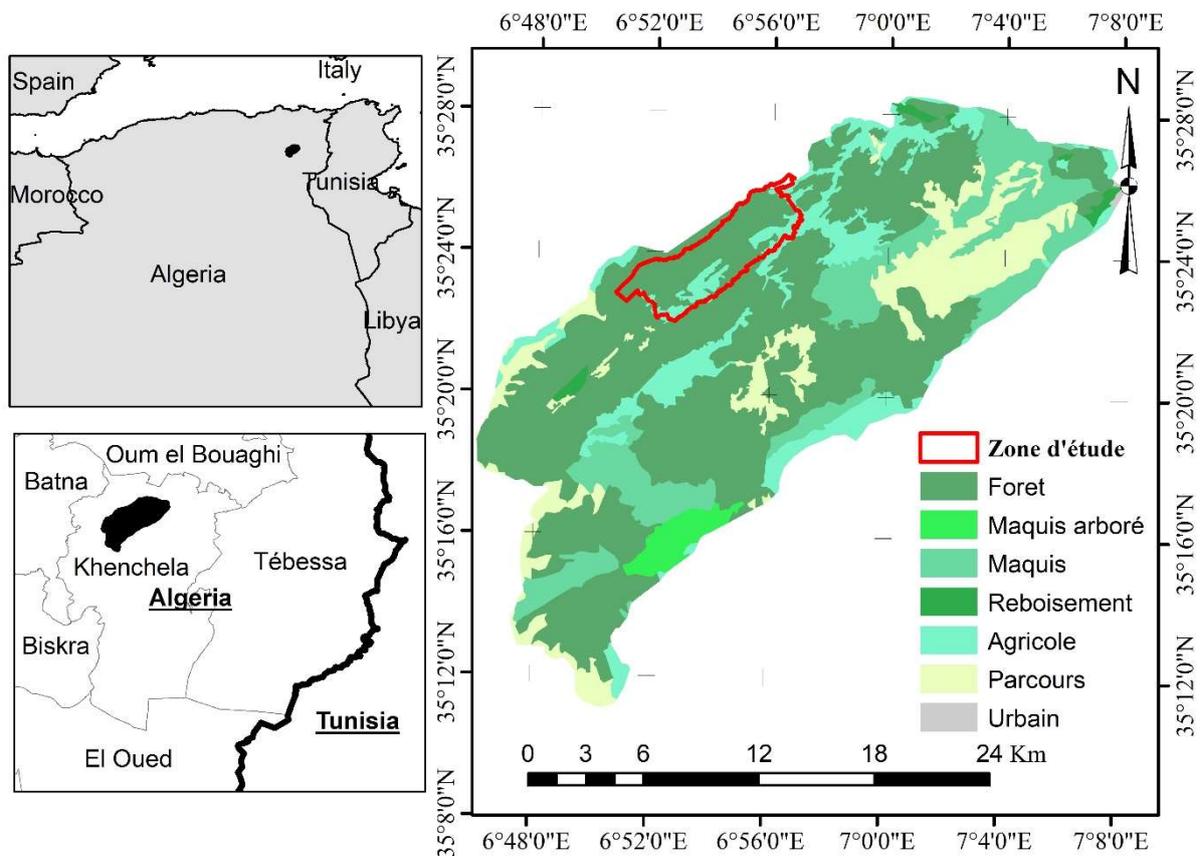


Figure 7 : Carte de situation de la zone d'étude.

2.1.2. Collecte et traitement des données

Divers types de données ont été utilisés dans ce travail, à savoir : des données liées à la topographie et des données édaphiques.

1- Une division spatiale de la forêt en parcelles a été obtenue auprès des services de la conservation des forêts de Khenchela (BNEF, 1984). La zone d'étude est divisée en 16 parcelles, qui constituent une unité de peuplement forestier et de gestion cohérente, considérée dans ce travail comme l'unité d'étude sur laquelle les statistiques ont été effectuées. Chaque compartiment est subdivisé en pixels de résolution de 30 mètres sur lesquels des mesures et des calculs ont été effectués. De plus, la carte de division administrative a été acquise auprès de l'Institut National de Cartographie et de Télédétection (I.N.C.T. Alger) en 2014.

2- Les données liées à la topographie ont été obtenues à partir de l'exploitation de MNT (Modèles Numériques de Terrain), à savoir : la pente (%), l'exposition et l'altitude (m). Le MNT avec une résolution de 30 mètres a été obtenu à partir de la base de données mondiale de modèle numérique de surface ALOS "ALOS World 3D - 30 m (AW3D30)", dont les données sont hébergées sur le site "https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/aw3d30/aw3d30_e.htm" (ALOS 2021).

3- Cinq facteurs édaphiques ont été sélectionnés pour exécuter le modèle, à savoir : la profondeur du sol (m), la texture du sol (%), la matière organique dans le sol (g/kg), le pH du sol et la dégradation du sol. Les données sur le sol ont été obtenues à partir de la base de données africaine "Carte des sols pour l'Afrique" élaboré par « Innovative Solutions for Decision Agriculture Ltd. » dont le lien est "<https://www.isda-africa.com/isdasoil/>" (Innovative Solutions for Decision Agriculture, ISDA 2021).

Nous n'avons pas pris en compte les facteurs climatiques, considérés comme globalement homogènes dans les 16 parcelles.

Les données collectées ont été soumises à une phase de préparation et de finalisation en utilisant le logiciel libre Quantum GIS 2.8 afin de les classer, de les normaliser et de les homogénéiser en termes de format de fichier, de résolution et d'alignement des pixels, ainsi que de leur étendue spatiale.

Pour réduire l'impact de l'échelle des indicateurs d'évaluation, les indicateurs ont été évalués et des scores ont été attribués en fonction de leur impact sur la qualité de la zone forestière. La classe de l'indicateur est utilisée pour déterminer le score de l'indicateur proposé par Wang *et al.* (2021) et modifié dans cette étude pour les plages de données de la zone d'étude de chaque indicateur. Plus le score est élevé, meilleure est la qualité de station forestière (Tableau 2) (Figure 8).

Tableau 2. Les normes de notation pour les indicateurs d'évaluation de la qualité des stations forestières et leurs classes.

Critère	Indicateur	Code	Classes				
			5	4	3	2	1
Topographie	Altitude/m	C6	> 2000	[1400-2000[	[800-1400[	[200-800[	<200
	Pente (%)	C7	<5	[5-15[	[15-25[	[25-35[	≥ 35
	Exposition	C8	Nord	Est	Ouest		Sud
Paramètres de sol (sur une profondeur de 20cm)	Profondeur de sol/cm	C1	≥ 80		[40-80[		< 40
	Texture de sol	C2	Limoneux		Limono-sableux, Sablo-limoneux		Argileux, argilo-sableux
	Matière organique du sol/(g/kg)	C3	≥40	[30-40[	[20-30[	[10-20[	< 10
	pH du sol	C4	[6.0 -7.9[	[5.5 – 6.0[or [7.9 - 8.5[	[5.0 to 5.5[or [8.5 to 9.0[	[4.5 - 5.0[	< 4.5 or ≥ 9.0
	Dégradation des terres	C5		Faible	Modérée	Forte	Très forte

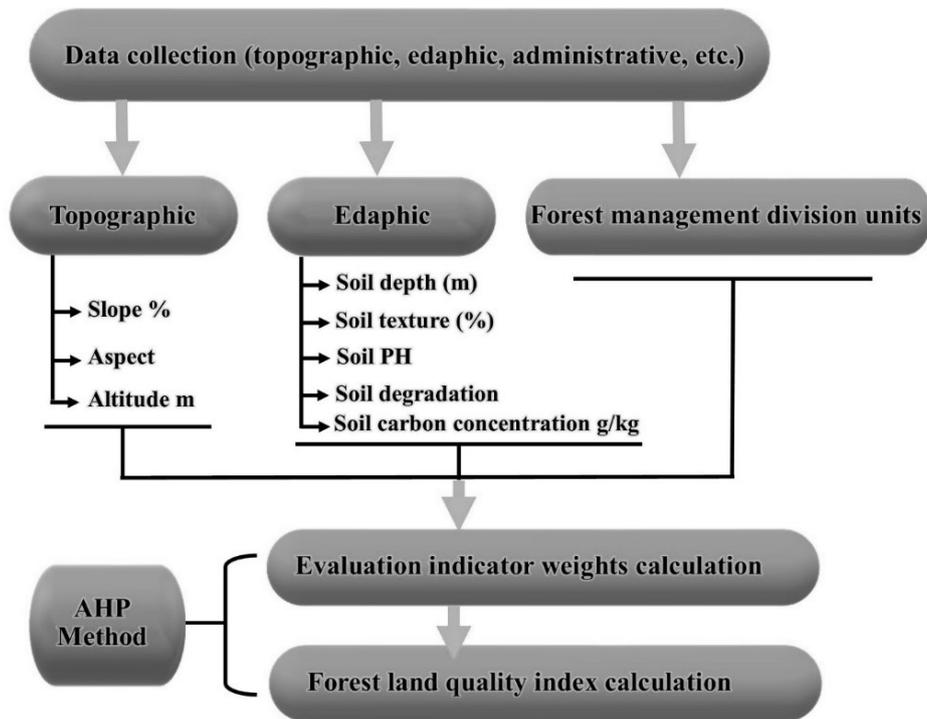


Figure 8 . Le processus de construction du système d'indice d'évaluation. (AHP : Analytical Hierarchy Process - Processus d'Analyse Hiérarchique)

2.1.3. Système d'évaluation des indicateurs

Pour élaborer un système d'évaluation des indicateurs de la qualité des stations forestières, huit facteurs appartenant aux deux groupes des facteurs choisis, à savoir la topographie et l'édaphie, ont été utilisés. Par conséquent, huit couches des facteurs précédemment expliqués ont été utilisées comme critères contrôlant la qualité des stations forestières à l'aide de la méthode AHP. Il s'agit d'un processus multicritère qui nécessite de passer par plusieurs étapes successives selon Saaty (1980), à savoir :

Après avoir déterminé le problème à structurer dans une hiérarchie, nous établissons une matrice de comparaison par paires, qui est une matrice de comparaison des critères par paires, qui consiste à structurer dans une hiérarchie l'évaluation de la qualité. Cette dernière est établie grâce à la construction d'un modèle pour identifier les critères et les alternatives pertinents (DE FSM Russo *et al.*, 2015). Cela signifie que la comparaison se fait entre chaque facteur d'un niveau supérieur, qui doit être comparé à un facteur d'un niveau inférieur par rapport à lui, à travers une échelle pour montrer "combien de fois un élément est plus important ou dominant qu'un autre élément par rapport au critère ou à la propriété par rapport à laquelle ils sont comparés ?" (Saaty 2008). Cette échelle varie de 1 (les deux éléments ont une importance égale) à 9 (signifie plus important que). La cellule de critère préférée dans le tableau (par exemple, la comparaison C1 avec C5) prend la valeur réelle, et la même

comparaison en sens inverse dans l'autre cellule (par exemple, la comparaison C5 avec C1) prend la valeur inverse (1/valeur) (Tableau 3). Le point fort de cette méthode réside dans sa capacité à déterminer un poids relatif pour tous les facteurs du problème à étudier, et à hiérarchiser leur pertinence relative (DE FSM Russo *et al.*, 2015).

Tableau 3 : Matrice de pondération des critères par paires à l'aide du modèle AHP pour l'évaluation de la qualité des stations forestières. (C1 à C8 : critères ou paramètres écologiques)

Criterion Code	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
C1	1.00	0.66	0.33	0.50	2.00	1.00	2.00	0.50
C2	1.50	1.00	0.50	0.75	3.00	1.50	3.00	0.75
C3	3.00	2.00	1.00	1.50	6.00	3.00	6.00	1.50
C4	2.00	1.33	0.66	1.00	4.00	2.00	4.00	1.00
C5	0.50	0.33	0.16	0.25	1.00	0.50	1.00	0.25
C6	1.00	0.66	0.33	0.50	2.00	1.00	2.00	0.50
C7	0.50	0.33	0.16	0.25	1.00	0.50	1.00	0.25
C8	2.00	1.33	0.66	1.00	4.00	2.00	4.00	1.00

Pour valider les résultats de l'AHP, le taux de cohérence (CR) est déterminé à l'aide de la formule : $CR = CI / RI$

(Où : CR - Taux de cohérence ; CI - Indique l'indice de cohérence ; RI - Indique l'indice de cohérence aléatoire)

L'indice de cohérence (CI) est évalué à l'aide de la formule : $CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1)$

Où : λ_{max} - Indique la valeur propre maximale de la matrice de comparaison par paires ; n - Indique le nombre d'éléments comparés.

La dimension de la matrice détermine la valeur de RI (Golden & Wang, 1990), dans ce cas avec 8 dimensions, RI est d'environ 1.3952. Le λ_{max} est égal à 8.019. Ensuite, l'indice de cohérence (CI) est égal à 0.003. Notez qu'un ratio de cohérence inférieur à 0,10 indique que les résultats de la comparaison sont acceptables. Dans ce cas, le ratio de cohérence (CR) est de 0.002, ce qui indique l'acceptabilité des résultats de la comparaison.

Le calcul du vecteur propre de la matrice de comparaison par paires est nécessaire pour estimer le coefficient de pondération. La moyenne géométrique de ces vecteurs propres est calculée en faisant la moyenne de chaque critère pour déterminer leurs valeurs. Le coefficient de pondération de chaque critère est calculé en divisant chaque vecteur propre par sa somme après normalisation. On suppose que la somme des coefficients de pondération est égale à 1 (Tableau 4).

Tableau 4 : Valeurs de pondération pour chaque critère utilisé pour l'évaluation de la qualité des forêts.

Couches d'indicateurs	Code	Weight
Profondeur du sol (cm)	C1	0.087
Texture du sol	C2	0.123
Matière organique du sol (g/kg)	C3	0.273
pH du sol	C4	0.172
Dégradation des sols	C5	0.043
Élévation (m)	C6	0.087
Pente (%)	C7	0.043
Expositions	C8	0.172

2.1.4. Critères d'agrégation

Les couches de critères sélectionnées sont ensuite combinées en utilisant l'approche de la somme pondérée en fonction de leurs poids, ce qui implique de multiplier chaque couche de facteurs standardisée par son coefficient de poids respectif (Koull et al. 2022). Cela nous permet de cartographier la qualité de station forestière en utilisant l'outil de calculatrice raster dans QGIS 2.8 avec la syntaxe suivante :

“("C1@1" * 0.087) + ("C2@1" * 0.123) + ("C3@1" * 0.273) + ("C4@1" * 0.172) + ("C5@1" * 0.043) + ("C6@1" * 0.087) + ("C7@1" * 0.043) + ("C8@1" * 0.172)”

La couche raster du FSQI est ensuite superposée à la couche vectorielle des parcelles, puis les valeurs numériques individuelles des pixels ainsi que les numéros de compartiment sont exportées sous forme de fichier de données textuelles (.csv). En utilisant l'outil (XLstat 2016), ces dernières données ont été soumises à une analyse de variance à un facteur pour étudier les différences entre les parcelles en termes de valeurs du FSQI. Un test de comparaison de moyennes (Newman-Keuls) des parcelles basé sur les valeurs du FSQI au niveau de signification de 0,05 a été réalisé pour identifier des groupes homogènes de parcelles.

2.2. Résultats

2.2.1. Variation de l'indice de qualité en fonction de la distribution spatiale

L'indice de qualité de station forestière (FSQI) varie de 1,640 à 3,148, avec un indice moyen de $2,555 \pm 0,257$ SD, ce qui indique que la qualité globale de station forestière est modérée, selon une échelle de 1 à 5. Le FSQI est plus élevé dans les sections centrales et occidentales de la forêt étudiée et plus bas dans les parties nord-est et sud (Figure 9).

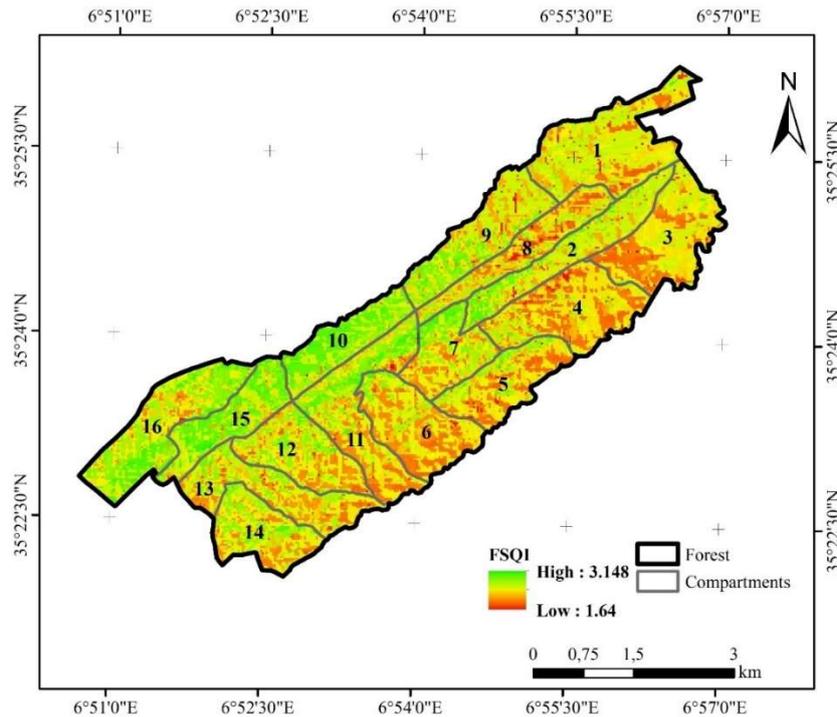


Figure 9 : Indice de qualité de station forestière (FSQI) avec distribution spatiale dans la forêt domaniale d'Ouled Yagoub. (1 à 16 : code des parcelles forestières).

Il y a une certaine hétérogénéité dans les valeurs moyennes du FSQI dans les différentes parcelles, selon les paramètres statistiques du FSQI calculés pour les parcelles étudiées. Selon le coefficient de variation, le FSQI dans la parcelle 12 a connu la plus grande variation, tandis que le FSQI dans la parcelle 10 a fluctué le moins (Tableau 5).

Tableau 5 : Statistiques descriptives de l'indice de qualité de station forestière (FSQI) des parcelles forestières dans la forêt domaniale d'Ouled Yagoub.

Parcelle	minimum	maximum	Moyenne± Er.T
1	1.80	3.03	2.51± 0.20
2	1.80	3.06	2.65± 0.21
3	1.64	3.03	2.43± 0.20
4	1.84	3.06	2.40± 0.21
5	1.80	3.06	2.47± 0.25
6	1.86	3.06	2.43± 0.23
7	1.93	3.06	2.59± 0.26
8	1.86	3.06	2.44± 0.24
9	1.80	3.06	2.61± 0.23
10	1.91	3.06	2.83± 0.19
11	1.86	3.06	2.56± 0.27
12	1.90	3.15	2.54± 0.24
13	1.73	3.15	2.52± 0.23
14	1.93	3.06	2.56± 0.23
15	1.97	3.15	2.79± 0.22
16	1.93	3.15	2.70± 0.23

Les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) montrent que la différence de FSQI entre les parcelles est très hautement significative (Tableau 6).

Tableau 6 : ANOVA - Comparaison des parcelles selon l'indice de qualité de station forestière (FSQI).

Source of Variation	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean of Squares	F-value	P
Parcelle	15	402.061	26.804	512.045	< 0.0001
Residual	29232	1530.210	0.052		
Total	29247	1932.271			

Les valeurs moyennes du FSQI dans les parcelles 2, 9, 10, 15 et 16 sont relativement élevées (Groupes I, J, K et L), mais les valeurs moyennes du FSQI dans les parcelles 3, 4, 5, 6 et 8 sont comparativement basses (groupes A, B et C). Les valeurs moyennes du FSQI sont modérées dans les parcelles 1, 7, 11, 12, 13 et 14 (groupes D, E, F et G) (Tableau 7).

Tableau 7 : Comparaison des parcelles forestières basée sur les valeurs moyennes de l'indice de qualité de station forestière FSQI (Test de Newman-Keuls)

Parcelle	Moyenne	Erreur Standard	Limite Inferieure (95%)	Limite supérieure (95%)	Classement global des parcelles
4	2.405	0.005	2.395	2.414	A
3	2.428	0.005	2.418	2.438	B
6	2.429	0.005	2.419	2.439	B
8	2.454	0.006	2.442	2.465	C
5	2.456	0.006	2.445	2.467	C
1	2.515	0.004	2.506	2.524	D
13	2.518	0.005	2.508	2.529	D
12	2.538	0.006	2.527	2.549	E
14	2.559	0.006	2.548	2.571	F
11	2.563	0.005	2.553	2.572	F
7	2.588	0.006	2.575	2.600	G
9	2.612	0.005	2.602	2.622	H
2	2.639	0.006	2.629	2.650	I
16	2.703	0.005	2.694	2.712	J
15	2.787	0.006	2.776	2.799	K
10	2.827	0.006	2.814	2.839	L

2.2.2. Distribution spatiale des évaluations de qualité

Dans la zone d'étude, la qualité de station forestière est divisée en cinq classes, selon la méthode du point de rupture naturel : du premier au cinquième grade, avec des superficies de 446,42, 721,21, 786,81, 339,31 et 337,33 hectares, respectivement. La plus grande superficie

de qualité de station forestière de troisième grade est de 29,9 %, tandis que la plus petite superficie de cinquième grade est de 12,8 %. La répartition des grades de qualité de station forestière montre que la superficie de qualité de station forestière de premier grade est faible (17 %), la majorité d'entre eux étant concentrée sur les versants nord de la forêt. La superficie de qualité de station forestière de deuxième grade était plus importante (27 %), la plupart d'entre elles étant situées près de la qualité de station forestière de premier grade au bas des versants nord. La qualité de station forestière de troisième grade, principalement répartie sur les expositions sud et est, adjacente à la qualité de station forestière de deuxième grade, occupait une superficie plus grande que les autres grades de qualité de station forestière (30 %). La qualité de station forestière de quatrième grade, principalement sur les expositions sud-est, adjacente aux stations forestières de troisième et de deuxième grade, occupait une superficie plus petite que les autres grades de qualité de station forestière. Les stations forestières de cinquième grade avaient la plus petite superficie et étaient principalement situés près des stations forestières de quatrième grade dans le bas des montagnes du sud-ouest (Figure 10).

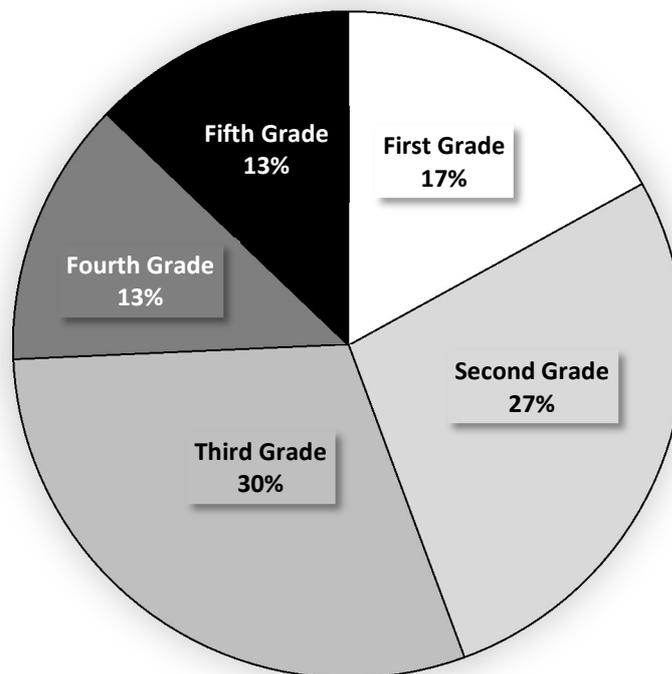


Figure 10 : Pourcentages de surfaces en fonction des classes d'indice de qualité de station forestière dans la forêt domaniale d'Ouled Yagoub.

En conséquence, il existe une certaine hétérogénéité dans la qualité des stations forestières à l'échelle moyenne des parcelles (Tableau 8). Avec une superficie de 18,15 %, 14,61 %, 14,33 % et 10,58 % respectivement, et une superficie totale de 64,6 %. Les stations forestières de

haute qualité se trouvent principalement au niveau des parcelles 16, 10, 15 et 11. Les parcelles 1, 2 et 9 présentaient principalement une qualité de station forestière de deuxième classe, représentant 15,72 %, 11,08 % et 10,81 % de la superficie totale, soit une superficie totale de 37,61 %. Les parcelles 4, 3 et 6 présentaient principalement une qualité de station forestière de troisième classe, représentant respectivement 12,29 %, 10,82 % et 8,77 %. Les parcelles 6, 13, 1 et 12 présentaient principalement une qualité de station forestière de quatrième classe, représentant respectivement 10,95 %, 10,73 %, 10,20 % et 10,18 % de la superficie totale des terres. Les parcelles 4, 3, 5 et 6 présentaient principalement une qualité de station forestière de cinquième classe, représentant respectivement 17,95 %, 16,19 %, 11,49 % et 10,35 % (Tableau 8).

Tableau 8 : Superficie et pourcentages de superficie des parcelles forestières dans la forêt domaniale d'Ouled Yagoub selon les classes de qualité de station forestière.

Compartments	Area (ha)	First Grade		Second Grade		Third Grade		Fourth Grade		Fifth Grade	
		Area (ha)	Proportion (%)	Area (ha)	Proportion (%)	Area (ha)	Proportion (%)	Area (ha)	Proportion (%)	Area (ha)	Proportion (%)
1	244	4	0.85	113	15.72	65	8.25	29	8.53	33	9.73
2	152	27	6.11	80	11.08	20	2.59	19	5.57	5	1.63
3	195	1	0.12	43	5.98	85	10.82	12	3.50	55	16.19
4	204	5	1.17	24	3.33	97	12.29	18	5.19	61	17.95
5	141	8	1.83	30	4.09	54	6.83	10	2.94	39	11.49
6	170	9	1.95	20	2.82	69	8.77	37	10.95	35	10.35
7	119	26	5.92	28	3.88	36	4.54	19	5.49	10	2.99
8	129	7	1.61	29	4.06	45	5.75	20	5.75	27	8.13
9	174	31	6.97	78	10.81	30	3.75	29	8.51	7	2.11
10	122	65	14.61	42	5.79	11	1.42	3	0.93	1	0.19
11	201	47	10.58	36	5.05	61	7.69	35	10.20	23	6.69
12	149	26	5.88	33	4.52	45	5.69	35	10.18	10	3.04
13	165	21	4.67	39	5.45	52	6.64	36	10.73	15	4.48
14	134	23	5.24	30	4.19	48	6.11	19	5.67	11	3.25
15	132	64	14.33	44	6.09	17	2.11	6	1.80	1	0.43
16	205	81	18.15	51	7.14	53	6.74	14	4.06	5	1.36

La qualité globale des stations forestières est plus élevée dans les parcelles 10, 15 et 16. Les stations forestières des parcelles 4, 8, 6, 3 et 5 étaient principalement de mauvaise qualité (Figure 11).

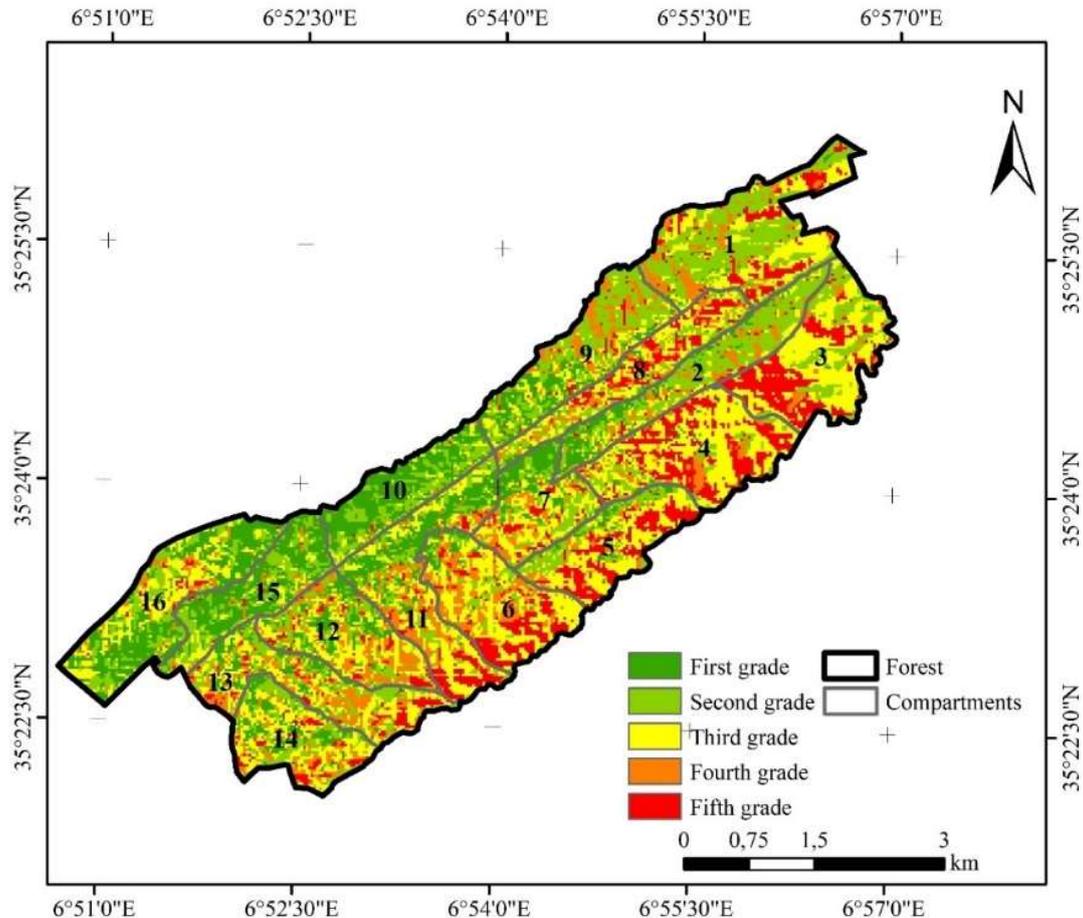


Figure 11 : Distribution spatiale des grades de qualité de station forestière dans la forêt domaniale d'Ouled Yagoub.

2.3. Discussion

Dans ce travail, le modèle AHP a été utilisé pour explorer de nouvelles techniques d'évaluation de la qualité des stations forestières qui n'avaient jamais été étudiées auparavant dans des conditions écologiques contraignantes, à savoir les forêts semi-arides d'Afrique du Nord. Lors de l'évaluation de la qualité des stations forestières dans la forêt domaniale d'Ouled Yagoub par le modèle AHP, nous avons combiné les caractéristiques de la zone d'étude représentées par huit indicateurs écologiques : la topographie (altitude, pente, exposition) et les paramètres du sol (profondeur, texture, pH, matière organique et dégradation des sols). Le modèle développé a montré 5 niveaux de qualité des stations forestières :

- (1) Pour les zones de premier niveau du FSQI, les conditions écologiques des stations forestières sont les plus favorables. La topographie est légèrement accidentée et les conditions du sol sont favorables. Il s'agit d'une texture sableuse-argileuse-limoneuse, d'une couche de

sol profonde, d'une concentration élevée de matière organique dans le sol, et donc de nutriments dans le sol. Ces stations forestières de meilleure qualité bénéficient également d'un climat plus frais en raison de leur altitude élevée. Par conséquent, les excellentes conditions écologiques de la région ont assuré la stabilité et la haute qualité des stations forestières.

(2) Pour les zones de deuxième niveau du FSQI, la topographie a légèrement altéré la qualité de ces stations forestières (basses altitudes). Les conditions écologiques étaient également meilleures, avec un climat favorable sur les versants nord plus arrosés, une pente courte, un type de sol sableux-argileux-limoneux, une épaisseur de couche de sol très épaisse, une teneur en matière organique du sol moyenne à élevée, et un pH neutre.

(3) Dans les zones avec un FSQI de troisième niveau, la pente est moyenne, l'altitude est souvent moyenne et la qualité du sol est faible. En raison de l'emplacement de ces endroits, la profondeur de la couche de sol est plus mince, le taux de matière organique dans le sol est plus faible, la dégradation du sol est plus sévère, et le pâturage est plus intense dans ces endroits. Par conséquent, la qualité des stations forestières dans ces zones est modérée et la topographie est le principal facteur limitant.

(4) Dans les zones de quatrième niveau du FSQI, la pente est très faible et l'altitude est souvent basse à modérée. La teneur totale en matière organique du sol est faible, la dégradation du sol est plus sévère (teneur élevée en pierres) et le pâturage est plus intense dans ces zones. Par conséquent, la qualité de ces stations forestières est faible, et la position topographique et la faible qualité du sol étaient les principaux facteurs limitants.

(5) Les zones du cinquième niveau du FSQI se trouvent à basse altitude, avec de faibles pentes, une faible couverture végétale et donc une érosion significative des sols. La topographie et le sol étaient les principaux facteurs limitant la qualité des stations forestières dans ces endroits.

À l'échelle régionale, les zones de haute montagne présentaient la meilleure qualité des terres forestières, suivies des zones de montagne moyenne, des zones de montagne moyenne à basse, et enfin des zones de basse montagne. Il est démontré que la qualité des stations forestières est directement liée à la topographie, ce qui contredit le modèle spatial de la qualité des stations forestières.

De plus, à l'échelle mésoscopique des parcelles, l'altitude et l'exposition, qui reflètent les caractéristiques topographiques essentielles, ont des effets significatifs sur le climat et les

qualités physiques et chimiques du sol. L'impact de l'altitude sur les précipitations, les nutriments du sol efficaces et le pH du sol est significatif. Avec l'augmentation de l'altitude, les précipitations augmentent, la végétation devient plus dense, les nutriments du sol augmentent, et le pH du sol augmente, ce qui a un impact plus important sur la croissance des arbres forestiers et améliore la qualité des stations forestières (Merabtene et al., 2021). La pente a un impact significatif sur la profondeur du sol, la quantité d'eau dans le sol, la richesse en nutriments, ainsi que la croissance des arbres (Lyu et al., 2015). Plus la qualité de la zone forestière est élevée, plus la croissance des arbres forestiers est meilleure sur une pente plus faible.

La forêt d'Ouled Yagoub est située dans la zone de transition climatique nord-sud, qui est un point chaud du réchauffement climatique. La fréquence des sécheresses et des inondations dans cette région a augmenté depuis le XXe siècle (Kherchouche et al., 2012). Les zones de températures excessives dans la forêt de pins d'Ouled Yagoub au cours des dernières années, selon la NASA-PCDM (2021), étaient situées au sud et à l'ouest, cependant, les indicateurs de précipitations extrêmes dans la vaste région des Aurès ont révélé que les précipitations excessives sont concentrées dans les versants nord et les hautes altitudes. La qualité globale des terres forestières dans la forêt domaniale d'Ouled Yagoub est moyenne, mais il y avait des différences entre les parcelles, et les terres de faible qualité sont principalement réparties dans les régions des versants sud et ouest, avec des aspects, des altitudes et des conditions de sol servant de facteurs limitants, ce qui est conforme aux études précédentes (Abdessemed, 1984 ; Benmessaoud, 2009).

De plus, en raison de l'accès limité aux données, l'évaluation de la qualité des stations forestières demeure un projet de système complexe. Le système d'indicateurs d'évaluation et les critères d'évaluation créés dans ce travail sont sujets à des études et à une validation plus approfondie. Des recherches supplémentaires pourraient combiner des données de télédétection et des données observées à mesure que la technologie progresse pour découvrir des marqueurs plus appropriés et pertinents pour l'évaluation de la qualité des stations forestières.

Les stations forestières de haute qualité se trouvent principalement dans les régions montagneuses du nord, où la topographie reste le principal facteur limitant. Les zones de faible qualité forestière se trouvent principalement dans les régions basses du sud, où la géographie et la fertilité du sol étaient les principaux facteurs déterminants.

D'autres recherches complémentaires sont donc nécessaires pour déterminer comment une gestion et une planification réussies peuvent être mises en œuvre aux stades ultérieurs de la protection des terres forestières, ainsi que la manière dont la trinité de la zonation-échelle-gestion peut être réalisée dans un système de protection des terres forestières.

Les caractéristiques spatiales de la qualité des stations forestières peuvent être intégrées dans la construction de schémas de zonage de protection forestière, élargissant ainsi la portée de ce type de zonage pour les zones classées en tant que parc national des forêts de Chelia-Ouled Yagoub. Pour établir un zonage de protection forestière, il faut également tenir compte de la quantité de terres forestières, et nous suggérons dans ce cas :

- (1) D'exploiter au maximum ce type de station forestière, en augmentant la gestion forestière rationnelle, notamment en contrôlant la densité des peuplements de manière à optimiser l'utilisation de l'espace et obtenir du bois de meilleure qualité.
- (2) D'exploiter au maximum ce type de station forestière. Il convient de mettre en place une gestion forestière telle que des forêts de protection, afin de contrôler la dégradation des sols de ces zones et la perte progressive de la couverture forestière.
- (3) De maintenir la stabilité écologique dans cet environnement où les incendies de forêt étaient plus fréquents dans la région et la dégradation écologique des forêts est plus grave, ce qui a une plus grande influence sur la qualité des stations forestières (Rahmani et Benmessaoud, 2019). Afin de maintenir la stabilité écologique dans cet environnement délicat, d'éviter la dégradation écologique des stations forestières et d'augmenter la fertilité du sol grâce à l'introduction d'espèces végétales résistantes et fixatrices, des mesures strictes de gestion et de protection de ces stations forestières doivent être mises en œuvre.

Conclusion

Les SIG sont utilisés dans le présent travail pour étudier la répartition spatiale de la qualité des stations forestières à l'échelle des parcelles. En utilisant l'indice de qualité des stations forestières comme variable spatiale, basée sur l'évaluation scientifique de la qualité des stations forestières dans la forêt domaniale d'Ouled Yagoub (Aurès, Algérie). En fin, en se basant sur le modèle multicritère AHP, qui combine les facteurs topographiques et les conditions du sol on a évalué la distribution spatiale de la qualité des stations forestières.

La gamme de l'indice de qualité des stations forestières dans la forêt domaniale d'Ouled Yagoub est de 1,64 à 3,148, avec une valeur moyenne de $2,555 \pm 0,257$ (Ecart type), ce qui indique que la qualité globale des stations forestières est moyenne, mais qu'il y avait des variations entre les parcelles, selon cette étude. Les stations forestières de haute qualité se trouvent principalement dans les régions montagneuses du nord, la topographie étant le principal facteur limitant. Les zones de faible qualité forestière se trouvent principalement dans les zones basses du côté du sud, où la géographie et la fertilité du sol sont les facteurs qui affectent négativement la fertilité du sol.

Les caractéristiques spatiales de la qualité des stations forestières peuvent être intégrées dans la construction de schémas de zonage de protection forestière, élargissant ainsi la portée de ce type de zonage pour toutes les zones classées en tant que parc national des forêts de Chelia et Ouled Yagoub. Pour établir une protection des terres forestières, la quantité de terres forestières doit encore être prise en compte. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour déterminer comment une gestion et un aménagement réussies peuvent être mises en œuvre aux stades ultérieurs de la protection des terres forestières, ainsi que la manière dont la trinité zonage-échelle-gestion peut être réalisée dans un aménagement des terres forestières.

CHAPITRE III : Typologie des peuplements forestiers

Introduction

La forêt algérienne, riche et diversifiée sur le plan écologique, est confrontée à une série de défis de dégradation, qui ont été mentionnés et examinés par plusieurs chercheurs au fil des années. Les travaux de Boudy (1950) et les recherches plus récentes menées par Quézel et Barbéro (1990) ont souligné l'ampleur de ces problèmes qui affectent les écosystèmes forestiers algériens en particulier et du nord de l'Afrique en général. Ces problèmes, de natures variées, ont des répercussions négatives directes sur la biodiversité et la santé des forêts. Cependant, il est important de noter que ces effets négatifs peuvent être atténués grâce à une gestion appropriée de ces précieux espaces naturels.

L'une des principales préoccupations de l'administration forestières algériennes est la dégradation des forêts algériennes, notamment en raison de pratiques forestières inadéquates, de la pression anthropique et de la surexploitation des ressources. Boudy (1950) a souligné que ces facteurs ont contribué à la fragmentation des écosystèmes forestiers, réduisant ainsi la capacité des forêts à remplir leurs fonctions écologiques essentielles, telles que la régulation des cycles de l'eau et la préservation de la biodiversité.

Une gestion adéquate de ces écosystèmes forestiers implique diverses mesures, notamment la réalisation d'études d'aménagement approfondies et la mise en œuvre de traitements sylvicoles adaptés. Ces actions sont guidées par les recommandations et les directives élaborées dans le cadre de ces études. Quézel et Barbéro (1990) ont mis en avant l'importance de ces études pour déterminer les zones prioritaires de conservation et les stratégies de restauration.

Parmi les zones forestières sensibles en Algérie, les forêts des Aurès se démarquent par leur vulnérabilité. Situées dans une région fortement touchée par la sécheresse et la désertification, ces forêts font face à divers facteurs de dégradation. Les travaux de Benmessaoud (2008) ont mis en évidence ces défis particuliers auxquels sont confrontées les forêts des Aurès.

Les forêts des Aurès, situées dans la partie orientale de l'Algérie, sont soumises à des pressions environnementales majeures. Le climat semi-aride de la région, combiné à une utilisation non durable des terres, a entraîné une dégradation importante des sols et une diminution de la couverture végétale. Benmessaoud (2008) a noté que la surexploitation des ressources forestières, notamment le bois de chauffage a contribué à la dégradation continue des forêts des Aurès.

La série forestière Aoures, faisant partie de la forêt domaniale de Ouled Yagoub dans la Wilaya de Khenchela, occupe une place spéciale dans le contexte des Aurès. Cette série se caractérise par son équilibre climatique et sanitaire au sein des forêts de pins d'Alep de la région. Toutefois, elle subit également l'influence de facteurs anthropiques qui contribuent à sa dégradation (B.N.E.D.E.R., 2008).

La série Aoures est une composante vitale de la forêt domaniale de Ouled Yagoub, présentant un intérêt particulier en raison de sa biodiversité et de son rôle écologique dans la région. Cependant, elle est soumise à une pression continue en raison de l'exploitation forestière non réglementée, de la collecte de bois de chauffage et d'autres activités anthropiques néfastes. Cette série, par sa situation géographique, est également exposée aux risques accrus liés aux incendies de forêt, un problème de plus en plus préoccupant dans la région méditerranéenne (Barbero et Quézel, 2000).

Pour assurer une gestion forestière efficace et durable de cette série, il est impératif de disposer de données précises concernant les caractéristiques dendrométriques et écologiques des peuplements forestiers. Ces informations sont essentielles pour évaluer le potentiel de croissance et de production ligneuse de ces forêts.

L'objectif principal de cette étude est de contribuer à l'amélioration de la gestion de la pinède de Ouled Yagoub dans la Wilaya de Khenchela. Pour atteindre cet objectif, une étude des peuplements de la série Aoures a été entreprise. L'objectif est d'évaluer correctement le potentiel de production ligneuse de cette région ce qui permet d'identifier les actions nécessaires à mettre en place pour une gestion plus efficace des peuplements de cette série.

Pour caractériser de manière approfondie les parcelles forestières, une approche basée sur les Systèmes d'Information Géographique (SIG) a été utilisée. De plus, une méthodologie d'inventaire dendrométrique basée sur un échantillonnage systématique a été mise en œuvre pour caractériser les peuplements forestiers. Cette approche permettra d'obtenir des données précises sur les arbres et de mieux comprendre la structure de la forêt.

La gestion durable des forêts algériennes, en particulier des zones sensibles comme la série Aoures, repose sur une combinaison de données précises, d'études d'aménagement approfondies, de traitements sylvicoles appropriés et de mesures de conservation. Cette approche holistique est cruciale pour préserver la biodiversité unique de ces écosystèmes et garantir la durabilité des ressources forestières en Algérie. (Abdelfettah, 2014 ; Benabdeli, 2012 ; Ghazi, 2009).

3.1. Matériel et méthodes

3.1.1. Présentation de la série d'étude

La série forestière Aoures, au sein de la forêt domaniale de Ouled Yagoub, revêt une importance capitale dans le contexte forestier de la région nord-est de l'Algérie, plus précisément dans la Wilaya de Khenchela. Localisée dans la commune de Tamza et limitrophe de la commune de Chelia, elle s'étend sur une vaste superficie de 2636 hectares, présentant une silhouette allongée qui s'étire du nord-est vers le sud-ouest. Les limites précises de cette série sont définies selon les coordonnées géographiques (WGS84) au Nord : N 35° 26' 11.17324'', au Sud : N 35° 21' 58.6908'', à l'Est : E 6° 56' 53.4696'', à l'Ouest : E 6° 50' 37.6548'' (comme illustré dans la figure 12) sur la base des limites de l'étude d'aménagement des forêts domaniales des Ouled Yacoub et Beni-Oudjana élaboré par BNEF (1984).

D'un point de vue géologique, cette région est principalement caractérisée par des formations rocheuses constituées en grande partie de calcaires et de dolomies dures, datant du Crétacé supérieur, avec des sous-étages du Cénomaniens et du Danien. La perméabilité de ces roches varie de moyenne à élevée, incluant une perméabilité des fissures. La série Aoures abrite une forêt naturelle de pins d'Alep, un écosystème précieux qui coexiste harmonieusement avec une végétation sous-jacente luxuriante et une régénération abondante. Cet équilibre écologique est d'une importance cruciale et mérite d'être préservé. En outre, cette série comprend également des maquis de chêne vert, des zones dédiées à l'agriculture, ainsi que des zones dépourvues de végétation. Pour une gestion efficace, la série Aoures est subdivisée en 14 parcelles forestières, réparties en fonction des différentes expositions géographiques : Sud (32 %), Est (32 %), Nord (31 %) et Ouest (5 %). Les caractéristiques topographiques présentent des pentes variables, allant de fortes (40 %) à moyennes (26 %), très fortes (21 %) et faibles (12 %).

S'agissant des altitudes, la série Aoures couvre un large éventail de tranches altitudinales, comprenant des zones situées entre 1000 et 1200 mètres, représentant 45 % de sa superficie totale, des altitudes entre 1200 et 1400 mètres, également à hauteur de 45 % de sa superficie, ainsi que des zones s'étendant de 1400 à 1600 mètres, couvrant 10 % de sa superficie.

Il est impératif de souligner que la série Aoures est au cœur de préoccupations environnementales majeures et de recherches scientifiques visant à assurer une gestion durable de ces ressources forestières précieuses. Plusieurs études et rapports scientifiques ont

été réalisés pour évaluer l'importance de son potentiel écologique et économique, ainsi que pour identifier les mesures nécessaires pour une gestion optimale et durable. Les références bibliographiques précédemment citées témoignent de l'engagement continu des chercheurs et de l'état dans la préservation de cet écosystème unique en Algérie.

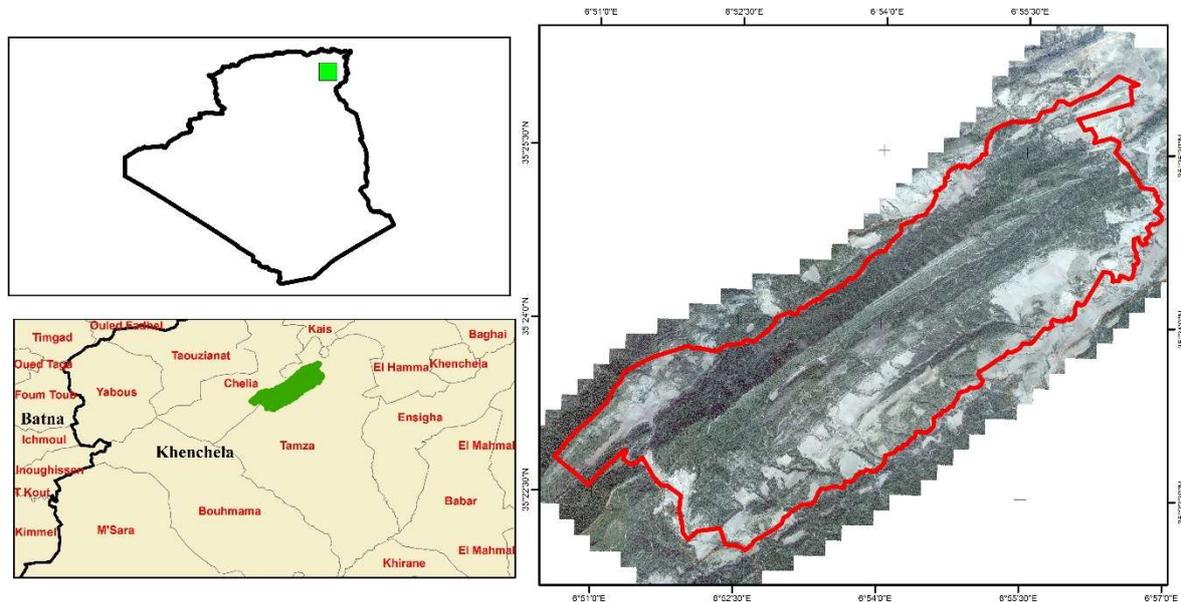


Figure 12 : Carte de localisation de la série Aoures.

3.1.2. Matériel

Dans le cadre de cette étude d'une envergure remarquable, divers matériaux, équipements, logiciels et données ont été mobilisés pour garantir la qualité et la précision des résultats obtenus. Ces ressources étaient essentielles pour la collecte, le traitement et l'analyse des informations relatives à la série Aoures, située au sein de la forêt domaniale de Ouled Yagoub, dans la région nord-est de l'Algérie.

3.1.2.1. Équipements Utilisés sur le Terrain :

1. Un véhicule tout-terrain : Indispensable pour accéder aux emplacements éloignés et pour transporter l'équipe d'inventaire ainsi que le matériel nécessaire.
2. Une boussole pour mesurer les azimuts : Cet instrument permet d'obtenir des données de direction cruciales pour le positionnement des arbres sur le terrain.
3. Un GPS Garmin 76 : Un GPS fiable pour déterminer avec précision les coordonnées géographiques des différentes placettes d'inventaire.

4. Des rubans à mesurer : Utilisés pour mesurer diverses dimensions, notamment la taille des placettes et la distance entre les arbres.
5. Un compas forestier : Un outil essentiel pour déterminer le diamètre des arbres.
6. Un dendromètre de Blume Leiss : Cet instrument est utilisé pour mesurer la hauteur des arbres.
7. Une tarière de Pressler : Utile pour obtenir des échantillons de bois (carottes) pour évaluer l'âge de l'arbre.
8. De la peinture rouge pour le marquage sur les troncs d'arbres et les roches fixes : Le marquage est un moyen efficace d'identifier les placettes sur le terrain.
9. Des sacs imperméables pour les instruments de mesure et les fiches : Indispensables pour protéger le matériel de mesure contre les intempéries.
10. Des piles rechargeables pour le GPS : Fournissent une alimentation continue pour le GPS, garantissant la continuité de la collecte de données.
11. Un appareil photo : Utilisé pour documenter visuellement les placettes et les arbres étudiés.
12. Une carte de localisation des placettes à échantillonner sur fond d'image satellite : Un outil de référence essentiel pour l'orientation sur le terrain.
13. Des chemises plastifiées : Utilisées pour protéger les documents et les fiches de terrain contre l'humidité et l'usure.
14. Un sous-main (planche) pour la prise de notes : Facilite la prise de notes sur le terrain, en offrant une surface stable.
15. Des fiches d'inventaire : Permettent de consigner de manière organisée et systématique les données collectées sur chaque placette d'inventaire.

3.1.2.2. Outils et Logiciels Utilisés au Bureau :

1. Un ordinateur hp ProBook 4530s i5 : Cet ordinateur portable performant a servi de plateforme de travail pour le traitement et l'analyse des données recueillies sur le terrain.
2. Des cartes topographiques : Utilisées pour une meilleure compréhension de la topographie et la réalisation de la carte de localisation de la région d'étude.

3. Des images satellites de Google Earth : Ces images ont permis d'obtenir des informations détaillées sur le terrain.
4. Les logiciels ArcGIS 10.8, Microsoft Word, Excel et Access 2016 : Ces logiciels ont été essentiels pour la création de cartes, la gestion de bases de données, le traitement de texte et l'analyse statistique.
5. Des cartes MNT SRTM3 : Utilisées pour générer des modèles numériques de terrain et caractériser la topographie.
6. Des cartes de l'inventaire forestier national en 2008 : Ces données historiques ont servi de référence pour l'évaluation des changements dans la série Aoures au fil du temps.

3.1.3. Méthodes

Dans le cadre de cette étude, un protocole d'inventaire rigoureux a été élaboré pour collecter des données nécessaires sur la série Aoures, située dans la forêt domaniale de Ouled Yagoub en Algérie. Ce protocole s'appuie sur une méthodologie soigneusement conçue qui couvre tous les aspects de l'évaluation des peuplements forestiers.

3.1.3.1. Planification de l'inventaire

Tout d'abord, une grille carrée systématique de placettes d'inventaire, espacées de 445 mètres, a été préparée sur une carte. Cette étape stratégique a été réalisée en collaboration étroite avec les experts forestiers spécialisés dans la gestion de la région. L'objectif était de garantir une couverture complète de l'ensemble des parcelles de la série Aoures tout en sélectionnant des placettes représentatives des caractéristiques homogènes en termes d'âge et de structure des peuplements. Le taux d'échantillonnage est 1% de la superficie de la série Aoures.

3.1.3.2. Caractéristiques des placettes

Les placettes d'inventaire adoptent une forme circulaire standard et couvrent une superficie de 10 ares chacune. Chaque placette a été précisément localisée à l'aide d'un GPS, permettant l'enregistrement précis des coordonnées latitudinales et longitudinales, exprimées en degrés, minutes et secondes. Au centre de chaque placette, un arbre de la placette ou une roche fixe a été marqué en rouge, sur lesquels le numéro de la placette a été clairement inscrit, facilitant ainsi l'identification de la placette sur le terrain.

3.1.3.3. Données collectées dans les placettes

Dans chaque placette, une série complète d'informations a été collectée et enregistrée sur une fiche d'inventaire. Ces données stationnelles comprenaient des éléments essentiels tels que les

caractéristiques topographiques (altitude, pente, versant, position sur le versant), la qualité du sol (profondeur, potentiel d'érosion, présence de cailloux), la description de la végétation dominante, avec des détails sur les espèces présentes et leurs taux de couverture, ainsi que l'évaluation du potentiel de régénération du pin d'Alep. En outre, toute indication de dégradation, qu'il s'agisse de pâturage, de piétinement, d'incendies, de maladies ou de coupes, a été minutieusement consignée.

3.1.3.4. Mesures dendrométriques

Tous les arbres vivants ayant un diamètre à hauteur de poitrine (DHP) supérieur ou égal à 5 centimètres ont été soumis à des mesures détaillées. Chaque arbre a reçu un numéro d'identification unique, permettant de suivre sa localisation précise dans la placette. Les mesures comprenaient l'espèce, le nombre de tiges, la position dans la placette et le diamètre à hauteur d'homme, mesuré sur deux rayons.

De plus, l'étude a porté sur la détermination de l'arbre dominant et de l'arbre de surface terrière moyenne de chaque placette. Plusieurs paramètres ont été mesurés, notamment la hauteur totale, la hauteur de la première branche, le diamètre de la couronne selon les axes majeur et mineur, ainsi qu'un carottage à 1,30 mètre de hauteur réalisé à l'aide d'une tarière de Pressler pour déterminer l'âge des arbres.

3.1.3.5. Analyse des Données

Au total, 33 placettes d'inventaire ont été établies. Les données recueillies sur le terrain concernant les descriptions des placettes ont ensuite été saisies dans une base de données Microsoft Access. Cette méthode, facilitée par l'utilisation d'un formulaire préconfiguré, a permis d'assurer une saisie efficace et sans erreurs.

Les données relatives aux mesures dendrométriques ont été enregistrées dans une feuille de calcul Microsoft Excel. Une évaluation des volumes individuels des arbres a été réalisée en utilisant un tarif de cubage spécifique au pin d'Alep de la forêt de Ouled Yagoub, basé sur une méthode éprouvée développée par Bentouati en 2005.

Enfin, les volumes et les effectifs d'arbres par classe de diamètre sont classés comme suit (BNEDER, 2008) :

- a. Petit Bois (PB) : arbres avec un DHP compris entre 5 et 25 cm.
- b. Moyen Bois (MB) : arbres avec un DHP compris entre 25 et 40 cm.

c. Gros Bois (GB) : arbres avec un DHP supérieur à 40 cm.

Le pourcentage d'arbres par classe de diamètre permet de définir le type et la structure du peuplement selon les règles suivantes :

- On considère que le peuplement est une futaie jeune de structure régulière si plus de 70% des tiges appartiennent à la classe PB.

- On considère que le peuplement est une futaie adulte de structure régulière si plus de 70% des tiges appartiennent à la classe MB.

- On considère que le peuplement est une vieille futaie de structure régulière si plus de 70% des tiges appartiennent à la classe GB.

Si l'une des trois classes dépasse 50% des tiges du peuplement, ce peuplement est classé comme une futaie correspondant à cette classe, mais de structure irrégulière.

Si aucune des trois classes ne dépasse 50% des tiges du peuplement, ce peuplement est classé comme une futaie de structure irrégulière avec jardinage.

En ce qui concerne la densité, elle est basée sur le nombre de tiges par hectare et est classée comme suit :

- Pour les futaies jeunes (et les futaies jeunes à adultes) :

a) Faible densité : moins de 100 arbres/ha.

b) Densité moyenne : 100 à 200 arbres/ha.

c) Forte densité : plus de 200 arbres/ha.

- Pour les futaies adultes et vieilles :

a) Faible densité : moins de 80 tiges/ha.

b) Densité moyenne : 80 à 150 tiges/ha.

c) Forte densité : plus de 150 tiges/ha.

3.2. Résultats et discussion

Dans ce chapitre, nous exposerons les résultats clés de cette étude, en détaillant les étapes suivies pour parvenir à l'objectif de définir la typologie des peuplements de cette forêt.

Nous avons développé une interface sur Microsoft Access pour la saisie des données descriptives des placettes, qui se présente sous la forme suivante :

The screenshot shows a Microsoft Access form titled "FICHE D'INVENTAIRE" in "Form View". The form is used for entering data for forest plots. The fields are organized into two columns:

Field Name	Value
N° Placette:	105
Système de Coordonnées:	DMS - WGS84
X/long:	6 54 38,75
Y/lat:	35 23 36,01
Position:	Bas de Pente
Potentiel d'érosion:	Faible
Profondeur du Sol:	Modéré
Charge en cailloux:	Faible
Sp1 Végétation:	Ampelodesma mauritanica
Sp1 Type de végétation:	Plante Pérenne
Sp1 % Rec:	15
Sp2 Végétation:	Globularia alypum
Sp6 Type de végétation:	
Sp6 % Rec:	
Sp7 Végétation:	
Sp7 Type de végétation:	
Sp7 % Rec:	
EP1 Essence Principale:	Pinus halepensis
EP1 % Rec:	60
EP1 Régénération:	1
EP2 Essence Principale:	
EP2 % Rec:	
EP2 Régénération:	
ED 1 Essence Dominante:	Pinus halepensis
ED 1 Nbr Rég <50cm:	3

The interface includes a ribbon with tabs for File, Home, Create, External Data, Database Tools, and Help. The Home tab is active, showing options for Filter, Selection, Records, and Text Formatting. The left pane shows "All Tables" with "Description Placettes" selected. The status bar at the bottom indicates "Form View" and "Records: 1 of 58".

Figure 13 : Formulaire de saisie développé sous Microsoft Access.

Une caractérisation des parcelles forestières a été réalisée en utilisant le logiciel ArcGis 10.8. Les limites des parcelles ont été digitalisées en se basant sur la carte de parcellaire établie lors d'une étude d'aménagement forestier réalisée par le Bureau National des Etudes Forestières (BNEF) en 1985.

Les résultats de cette caractérisation écologique sont présentés dans les figures suivantes :

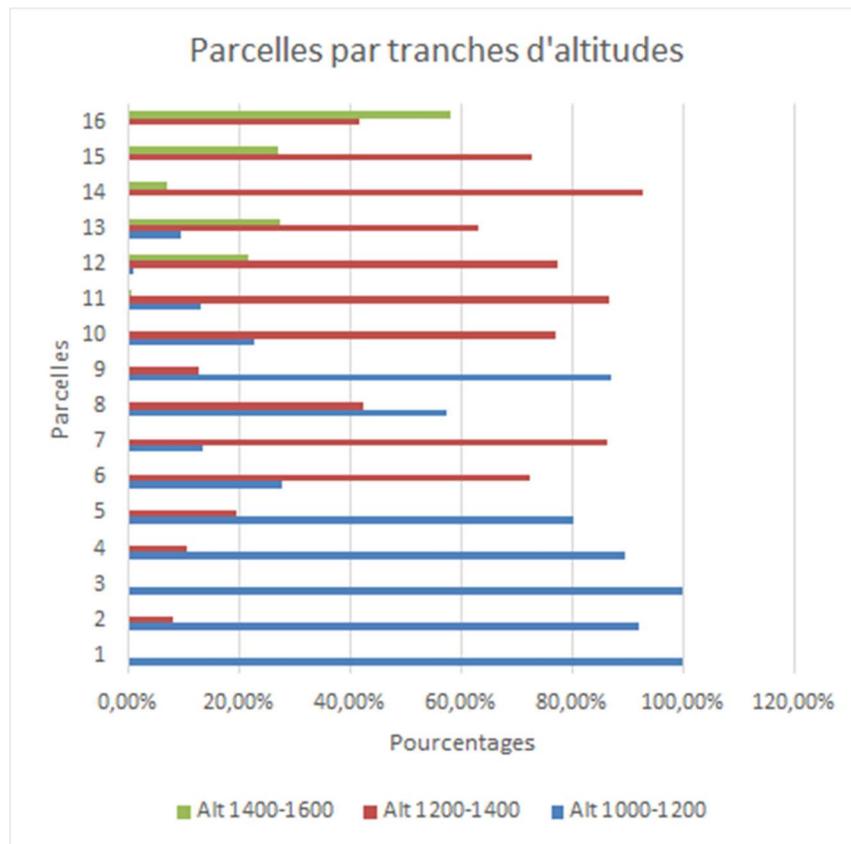


Figure 14 : Répartition des superficies des parcelles par tranches d'altitudes.

D'après la figure 14, il est observé que les parcelles 1, 2, 3, 4, 5, 8 et 9 se caractérisent par des altitudes basses, comprises entre 1000 et 1200 mètres, tandis que les parcelles 6, 7, 10, 11, 12, 13, 14 et 15 présentent des altitudes moyennes, situées entre 1200 et 1400 mètres. En revanche, la parcelle 16 se distingue par une altitude élevée, se situant entre 1400 et 1600 mètres.

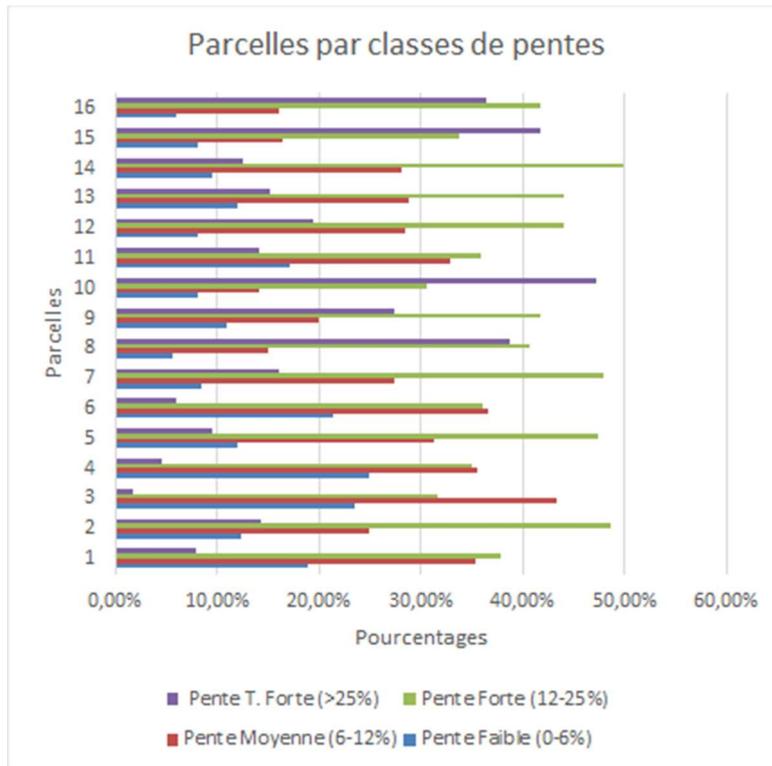


Figure 15 : Répartition des superficies des parcelles par classes de pentes.

La figure 15 présente une prédominance de parcelles (11) au sein de cette série forestière qui se distinguent par des pentes d'intensité moyenne à élevée, et fortes à très fortes pour les parcelles 8, 9, 10, 15 et 16.

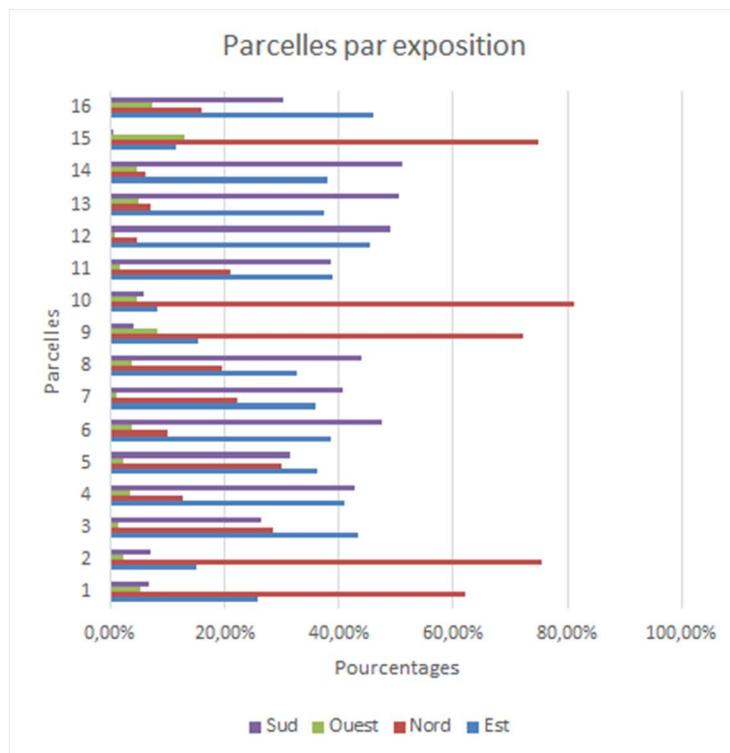


Figure 16 : Répartition des superficies des parcelles par exposition

La Figure 16 présente l'orientation des parcelles dans l'étude. Les parcelles 1, 2, 9, 10 et 15 sont principalement exposées au nord, tandis que les autres parcelles sont principalement exposées au sud et à l'est.

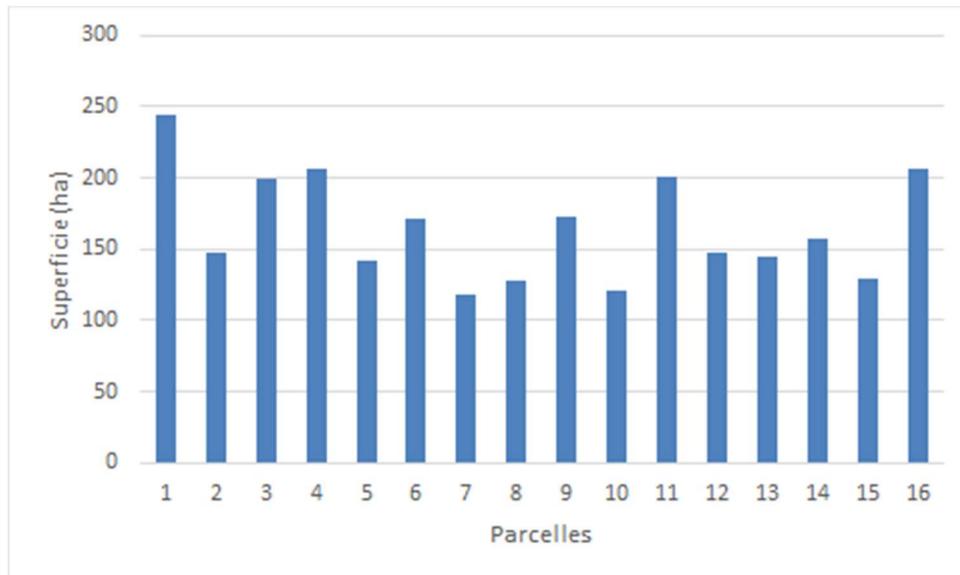


Figure 17 : Répartition des superficies des parcelles

La Figure 17 présente la répartition des superficies des parcelles, qui varient de 120 à près de 250 hectares.

Après avoir effectué l'étape de caractérisation écologique des parcelles forestières de la série Aoures, nous procédons à la caractérisation des peuplements de pin d'Alep recensés. Les données de l'inventaire dendrométrique sont saisies dans Microsoft Excel. Les valeurs individuelles de diamètre sont classées en trois classes de grosseur selon les intervalles mentionnés au paragraphe 3.1.3.5. Le nombre de tiges par classe de grosseur et par placette est comptabilisé, ce qui nous permet de calculer le nombre de tiges par hectare, puis de calculer les pourcentages de tiges par classe de grosseur.

Sur la base des pourcentages des effectifs de tiges par classe de grosseur, nous déterminons le type de peuplement selon les critères mentionnés au paragraphe 3.1.3.5. En fonction de la densité par hectare, nous pouvons attribuer notre peuplement à une classe de densité.

Le tableau suivant synthétise les résultats de la caractérisation des types de peuplements ainsi que les classes de densité, avec les pourcentages des effectifs de tiges par classe de grosseur recensés pour chaque parcelle.

Tableau 9 : Typologie des peuplements par parcelle.

Parcelle	Typologie	Classe de densité	Petit Bois %	Moyen Bois %	Gros Bois %
1	Futaie jeune à adulte de structure irrégulière	forte	48,00%	40,00%	12,00%
2	Futaie Jeune de structure irrégulière	forte	65,79%	34,21%	0,00%
	Jeune futaie, structure régulière	forte	100,0%	0,00%	0,00%
3	Futaie Adulte de structure irrégulière à jardinée	forte	17,24%	65,52%	17,24%
	Futaie jeune à adulte de structure irrégulière	faible	50,00%	50,00%	0,00%
		forte	48,78%	43,90%	7,32%
4	Futaie Vieille de structure irrégulière à jardinée	forte	31,25%	18,75%	50,00%
	Jeune futaie, structure régulière	forte	84,09%	15,91%	0,00%
5	Futaie Jeune de structure irrégulière	forte	63,33%	20,00%	16,67%
	Jeune futaie, structure régulière	forte	91,30%	8,70%	0,00%
6	Futaie adulte à jeune de structure irrégulière	faible	37,50%	62,50%	0,00%
	Futaie vieille (âgée) à adulte de structure irrégulière	forte	5,26%	36,84%	57,89%
7	Futaie Jeune de structure irrégulière à jardinée	moyenne	66,67%	20,00%	13,33%
	Jeune futaie, structure régulière	forte	72,00%	28,00%	0,00%
8	Futaie adulte à jeune de structure irrégulière	moyenne	42,11%	57,89%	0,00%
	Jeune futaie, structure régulière	forte	85,71%	14,29%	0,00%
		moyenne	75,00%	25,00%	0,00%
9	Futaie Adulte de structure irrégulière à jardinée	forte	26,67%	50,00%	23,33%
	Futaie Jeune de structure irrégulière à jardinée	moyenne	66,67%	8,33%	25,00%
10	Futaie de structure irrégulière à jardinée	moyenne	40,00%	26,67%	33,33%
	Futaie jeune à adulte de structure irrégulière	moyenne	57,89%	26,32%	15,79%
11	Futaie adulte à jeune de structure irrégulière	forte	30,00%	66,67%	3,33%
	Futaie de structure irrégulière à jardinée	moyenne	30,77%	30,77%	38,46%
12	Futaie Adulte de structure irrégulière à jardinée	moyenne	15,38%	69,23%	15,38%
	Jeune futaie, structure régulière	forte	80,49%	17,07%	2,44%
13	Futaie de structure irrégulière à jardinée	forte	41,67%	29,17%	29,17%
14	Futaie Vieille de structure irrégulière à jardinée	moyenne	20,00%	13,33%	66,67%
	Vielle futaie, structure régulière	faible	0,00%	0,00%	100,00%
15	Jeune futaie, structure régulière	forte	89,53%	6,25%	4,23%
16	Futaie de structure irrégulière à jardinée	forte	44,44%	44,44%	11,11%
	Futaie Vieille de structure irrégulière à jardinée	faible	25,00%	25,00%	50,00%

À partir du tableau 9, on peut proposer des opérations sylvicoles à entreprendre pour chaque type de peuplement.

Au regard des données relatives à la régénération, il est possible d'envisager des interventions visant à réhabiliter les peuplements dégradés ou à améliorer la gestion des peuplements en régénération.

La proposition d'opérations sylvicoles pour chaque typologie de parcelle de pin d'Alep est basée sur plusieurs paramètres et considérations importantes pour assurer une gestion forestière durable et adaptée à chaque situation. Les principaux paramètres qui sont pris en compte pour ces propositions sont :

1. Typologie de la parcelle : La première considération est la typologie de la parcelle, qui décrit la structure et la densité de la forêt. Il peut s'agir de jeunes futaies, de futaies adultes, de futaies vieilles, de futaies irrégulières, de futaies en jardinée, etc.
2. Densité : La densité de la forêt est un facteur clé. Elle peut être faible, moyenne ou forte en fonction du nombre d'arbres par hectare. La densité influence la compétition entre les arbres et la croissance.
3. Répartition des classes de taille : La répartition des classes de taille des arbres (petit, moyen, gros bois) dans la parcelle est un indicateur important pour décider des opérations nécessaires.
4. Objectifs de gestion : Les objectifs de gestion spécifiques à chaque typologie de parcelle sont pris en compte. Par exemple, certaines parcelles peuvent viser à encourager la régénération, tandis que d'autres cherchent à optimiser la croissance des arbres matures.
5. Régénération naturelle : La capacité de la parcelle à se régénérer naturellement est évaluée. Des coupes sélectives peuvent être recommandées pour favoriser cette régénération.
6. Éclaircies : Les éclaircies, qui consistent à couper certains arbres pour permettre aux autres de croître plus librement, sont souvent recommandées. L'intensité des éclaircies varie en fonction de la densité initiale, de la fertilité de la station et des objectifs de gestion.
7. Coupes sélectives : Les coupes sélectives ciblent les arbres matures ou malades pour encourager la croissance des arbres restants. La fréquence et l'intensité dépendent de la typologie et de l'âge de la forêt.

8. Coupes de jardinage : Les coupes de jardinage sont utilisées pour rajeunir la forêt en retirant des arbres plus âgés et en favorisant la régénération. Elles sont particulièrement importantes dans les futaies en jardinée.

9. Diversification de la structure : La diversification de la structure de la forêt est un objectif important pour favoriser la biodiversité et la résilience. Cela peut nécessiter des coupes sélectives pour créer des zones ouvertes.

Ces paramètres sont évalués en conjonction avec les objectifs à long terme de gestion forestière durable pour chaque parcelle, ce qui permet de formuler des recommandations spécifiques en termes d'opérations sylvicoles. Chaque typologie de parcelle est traitée de manière unique en fonction de ses caractéristiques et de ses besoins particuliers.

En prenant en compte toutes les typologies des parcelles qui contiennent plusieurs typologies, voici des opérations sylvicoles détaillées pour chaque type de peuplement de pin d'Alep avec des pourcentages et des objectifs :

1. Parcelle 1 (Futaie jeune à adulte de structure irrégulière, forte densité) :

- Petit Bois (48%) : Réaliser des éclaircies sélectives pour favoriser la croissance des arbres les plus prometteurs tout en laissant de l'espace pour leur développement.

- Moyen Bois (40%) : Effectuer des éclaircies pour optimiser la croissance des arbres intermédiaires.

- Gros Bois (12%) : Encourager la régénération naturelle et prévoir des coupes sélectives pour exploiter des arbres matures.

2. Parcelle 2 (Futaie Jeune de structure irrégulière, forte densité) :

- Petit Bois (65,79%) : Effectuer des éclaircies pour favoriser la croissance des jeunes arbres les plus prometteurs.

- Moyen Bois (34,21%) : Continuer les éclaircies pour encourager le développement des arbres intermédiaires.

3. Parcelle 3 :

- Typologie 1 (Futaie adulte de structure irrégulière à jardinée, forte densité) :

- Petit Bois (17,24%) : Réaliser des éclaircies douces pour stimuler la régénération naturelle et la croissance des jeunes arbres.

- Moyen Bois (65,52%) : Effectuer des coupes sélectives pour favoriser la croissance des arbres intermédiaires.

- Gros Bois (17,24%) : Prévoir des coupes de jardinage pour rajeunir la forêt et encourager la régénération.

- Typologie 2 (Futaie jeune à adulte de structure irrégulière, faible densité) :

- Petit Bois (50,00%) : Réaliser des éclaircies modérées pour optimiser la croissance des jeunes arbres.

- Moyen Bois (50,00%) : Continuer les éclaircies pour favoriser le développement des arbres intermédiaires.

- Typologie 3 (Futaie jeune à adulte de structure irrégulière, forte densité) :

- Petit Bois (48,78%) : Effectuer des éclaircies pour favoriser la croissance des jeunes arbres.

- Moyen Bois (43,90%) : Continuer les éclaircies pour encourager le développement des arbres intermédiaires.

- Gros Bois (7,32%) : Planifier des coupes sélectives pour les arbres matures.

4. Parcelle 4 :

- Typologie 1 (Futaie Vieille de structure irrégulière à jardinée, forte densité) :

- Petit Bois (31,25%) : Effectuer des éclaircies douces pour favoriser la croissance des jeunes arbres.

- Moyen Bois (18,75%) : Continuer les éclaircies pour optimiser la croissance des arbres intermédiaires.

- Gros Bois (50,00%) : Prévoir des coupes de jardinage pour rajeunir la forêt et encourager la régénération.

- Typologie 2 (Jeune futaie, structure régulière, forte densité) :

- Petit Bois (84,09%) : Effectuer des éclaircies pour favoriser la croissance des jeunes arbres.

- Moyen Bois (15,91%) : Continuer les éclaircies pour encourager le développement des arbres intermédiaires.

5. Parcelle 5 :

- Typologie 1 (Futaie Jeune de structure irrégulière, forte densité) :

- Petit Bois (63,33%) : Continuer les éclaircies pour favoriser la croissance des jeunes arbres les plus prometteurs.

- Moyen Bois (20,00%) : Encourager le développement des arbres intermédiaires par des éclaircies.

- Gros Bois (16,67%) : Planifier des coupes sélectives pour les arbres matures.

- Typologie 2 (Jeune futaie, structure régulière, forte densité) :

- Petit Bois (91,30%) : Effectuer des éclaircies pour favoriser la croissance des jeunes arbres.

- Moyen Bois (8,70%) : Continuer les éclaircies pour encourager le développement des arbres intermédiaires.

6. Parcelle 6 :

- Typologie 1 (Futaie adulte à jeune de structure irrégulière, faible densité) :

- Petit Bois (37,50%) : Réaliser des éclaircies modérées pour optimiser la croissance des jeunes arbres.

- Moyen Bois (62,50%) : Continuer les éclaircies pour favoriser le développement des arbres intermédiaires.

- Typologie 2 (Futaie vieille (âgée) à adulte de structure irrégulière, forte densité) :

- Petit Bois (5,26%) : Effectuer des coupes sélectives pour favoriser la croissance des jeunes arbres.

- Moyen Bois (36,84%) : Continuer les coupes sélectives pour optimiser la croissance des arbres intermédiaires.

- Gros Bois (57,89%) : Prévoir des coupes de jardinage pour rajeunir la forêt, favoriser la régénération et diversifier la structure.

7. Parcelle 7 :

- Typologie 1 (Futaie Jeune de structure irrégulière à jardinée, moyenne densité) :

- Petit Bois (66,67%) : Réaliser des éclaircies modérées pour stimuler la régénération naturelle et la croissance des jeunes arbres.

- Moyen Bois (20,00%) : Continuer les éclaircies pour encourager le développement des arbres intermédiaires.

- Gros Bois (13,33%) : Prévoir des coupes de jardinage pour diversifier la structure de la forêt.

- Typologie 2 (Jeune futaie, structure régulière, forte densité) :

- Petit Bois (72,00%) : Effectuer des éclaircies pour favoriser la croissance des jeunes arbres.

- Moyen Bois (28,00%) : Continuer les éclaircies pour encourager le développement des arbres intermédiaires.

8. Parcelle 8 :

- Typologie 1 (Futaie adulte à jeune de structure irrégulière, moyenne densité) :

- Petit Bois (42,11%) : Effectuer des éclaircies modérées pour favoriser la croissance des jeunes arbres.

- Moyen Bois (57,89%) : Continuer les éclaircies pour optimiser le développement des arbres intermédiaires.

- Typologie 2 (Jeune futaie, structure régulière, forte densité) :

- Petit Bois (85,71%) : Effectuer des éclaircies pour favoriser la croissance des jeunes arbres.

- Moyen Bois (14,29%) : Continuer les éclaircies pour encourager le développement des arbres intermédiaires.

- Typologie 3 (Jeune futaie, structure régulière, moyenne densité) :

- Petit Bois (75,00%) : Réaliser des éclaircies pour favoriser la croissance des jeunes arbres.

- Moyen Bois (25,00%) : Continuer les éclaircies pour encourager le développement des arbres intermédiaires.

9. Parcelle 9 :

- Typologie 1 (Futaie Adulte de structure irrégulière à jardinée, forte densité) :

- Petit Bois (26,67%) : Réaliser des éclaircies pour stimuler la régénération naturelle et la croissance des jeunes arbres.

- Moyen Bois (50,00%) : Effectuer des coupes sélectives pour favoriser la croissance des arbres intermédiaires.

- Gros Bois (23,33%) : Prévoir des coupes de jardinage pour rajeunir la forêt et encourager la régénération.

- Typologie 2 (Futaie Jeune de structure irrégulière à jardinée, moyenne densité) :

- Petit Bois (66,67%) : Réaliser des éclaircies modérées pour stimuler la régénération naturelle et la croissance des jeunes arbres.

- Moyen Bois (8,33%) : Continuer les éclaircies pour encourager le développement des arbres intermédiaires.

- Gros Bois (25,00%) : Prévoir des coupes de jardinage pour diversifier la structure de la forêt.

10. Parcelle 10 :

- Typologie 1 (Futaie de structure irrégulière à jardinée, moyenne densité) :

- Petit Bois (40,00%) : Effectuer des éclaircies modérées pour stimuler la régénération naturelle et la croissance des jeunes arbres.

- Moyen Bois (26,67%) : Continuer les éclaircies pour encourager le développement des arbres intermédiaires.

- Gros Bois (33,33%) : Prévoir des coupes de jardinage pour diversifier la structure de la forêt.

- Typologie 2 (Futaie jeune à adulte de structure irrégulière, moyenne densité) :

- Petit Bois (57,89%) : Réaliser des éclaircies modérées pour favoriser la croissance des jeunes arbres.

- Moyen Bois (26,32%) : Continuer les éclaircies pour encourager le développement des arbres intermédiaires.

- Gros Bois (15,79%) : Planifier des coupes sélectives pour les arbres matures.

11. Parcelle 11 :

- Typologie 1 (Futaie adulte à jeune de structure irrégulière, forte densité) :

- Petit Bois (30,00%) : Réaliser des éclaircies pour favoriser la croissance des jeunes arbres.

- Moyen Bois (66,67%) : Effectuer des coupes sélectives pour optimiser le développement des arbres intermédiaires.

- Gros Bois (3,33%) : Prévoir des coupes de jardinage pour diversifier la structure de la forêt.

- Typologie 2 (Futaie de structure irrégulière à jardinée, moyenne densité) :

- Petit Bois (30,77%) : Effectuer des éclaircies modérées pour stimuler la régénération naturelle et la croissance des jeunes arbres.

- Moyen Bois (30,77%) : Continuer les éclaircies pour encourager le développement des arbres intermédiaires.

- Gros Bois (38,46%) : Prévoir des coupes de jardinage pour rajeunir la forêt et encourager la régénération.

12. Parcelle 12 :

- Typologie 1 (Futaie Adulte de structure irrégulière à jardinée, moyenne densité) :

- Petit Bois (15,38%) : Effectuer des éclaircies pour stimuler la régénération naturelle et la croissance des jeunes arbres.

- Moyen Bois (69,23%) : Continuer les coupes sélectives pour favoriser le développement des arbres intermédiaires.

- Gros Bois (15,38%) : Prévoir des coupes de jardinage pour rajeunir la forêt et encourager la régénération.

- Typologie 2 (Jeune futaie, structure régulière, forte densité) :

- Petit Bois (80,49%) : Effectuer des éclaircies pour favoriser la croissance des jeunes arbres.

- Moyen Bois (17,07%) : Continuer les éclaircies pour encourager le développement des arbres intermédiaires.

- Gros Bois (2,44%) : Planifier des coupes sélectives pour les arbres matures.

13. Parcelle 13 (Futaie de structure irrégulière à jardinée, forte densité) :

- Petit Bois (41,67%) : Effectuer des éclaircies pour stimuler la régénération naturelle et la croissance des jeunes arbres.

- Moyen Bois (29,17%) : Continuer les éclaircies pour encourager le développement des arbres intermédiaires.

- Gros Bois (29,17%) : Prévoir des coupes de jardinage pour rajeunir la forêt et encourager la régénération.

14. Parcelle 14 :

- Typologie 1 (Futaie Vieille de structure irrégulière à jardinée, moyenne densité) :

- Petit Bois (20,00%) : Effectuer des éclaircies douces pour favoriser la croissance des jeunes arbres.

- Moyen Bois (13,33%) : Continuer les éclaircies pour optimiser la croissance des arbres intermédiaires.

- Gros Bois (66,67%) : Prévoir des coupes de jardinage pour rajeunir la forêt et encourager la régénération.

- Typologie 2 (Vielle futaie, structure régulière, faible densité) :

- Gros Bois (100,00%) : Réaliser des coupes sélectives pour rajeunir la forêt et encourager la régénération.

15. Parcelle 15 (Jeune futaie, structure régulière, forte densité) :

- Petit Bois (89,53%) : Effectuer des éclaircies pour favoriser la croissance des jeunes arbres.

- Moyen Bois (6,25%) : Continuer les éclaircies pour encourager le développement des arbres intermédiaires.

- Gros Bois (4,23%) : Planifier des coupes sélectives pour les arbres matures.

16. Parcelle 16 :

- Typologie 1 (Futaie de structure irrégulière à jardinée, forte densité) :

- Petit Bois (44,44%) : Effectuer des éclaircies pour stimuler la régénération naturelle et la croissance des jeunes arbres.

- Moyen Bois (44,44%) : Continuer les éclaircies pour encourager le développement des arbres intermédiaires.

- Gros Bois (11,11%) : Prévoir des coupes de jardinage pour rajeunir la forêt et encourager la régénération.
- Typologie 2 (Futaie Vieille de structure irrégulière à jardinée, faible densité) :
 - Petit Bois (25,00%) : Effectuer des éclaircies douces pour favoriser la croissance des jeunes arbres.
 - Moyen Bois (25,00%) : Continuer les éclaircies pour optimiser la croissance des arbres intermédiaires.
 - Gros Bois (50,00%) : Prévoir des coupes de jardinage pour rajeunir la forêt et encourager la régénération.

Ces opérations sylvicoles sont conçues pour maintenir ou améliorer la santé et la vigueur des peuplements de pin d'Alep tout en préservant leur structure spécifique. Elles sont adaptées à chaque typologie des parcelles, tenant compte de la densité, de la structure et des objectifs de gestion spécifiques à chacune d'entre elles pour assurer une gestion durable et productive de la forêt de pin d'Alep.

Le travail de Rabhi et al. (2023) montre que la sélection d'un itinéraire sylvicole particulier n'affecte pas la production totale de bois en volume. Cette constatation est cruciale car elle suggère que les différents types de gestion sylvicole examinés ne compromettent pas la ressource globale en bois. Cependant, l'impact se manifeste dans la répartition des catégories de diamètre des arbres. Une proportion croissante d'arbres de gros diamètre est favorisée. Cela peut être interprété comme une indication de l'efficacité de certains itinéraires sylvicoles pour promouvoir la croissance d'arbres plus gros, ce qui a des implications positives pour la valorisation économique des peuplements forestiers.

Bentouati et Baritaud (2005) ont identifié un régime sylvicole préconisé pour la pinède d'Ouled Yagoub, qui consiste en une gestion en futaie par parquets de taille limitée. La régénération naturelle par petites trouées est préconisée, et elle semble produire des résultats satisfaisants. L'ajout de pratiques telles que le travail du sol par crochetage ou labour peut encore améliorer cette régénération. Le dépressage, en réduisant la densité d'arbres à l'hectare, prépare le terrain pour des éclaircies ultérieures. Ces éclaircies, recommandées dès l'âge de 20 ans dans les zones les plus fertiles, peuvent contribuer à une gestion forestière durable en favorisant la croissance des arbres de meilleure qualité.

Rabhi et Bentouati (2023) mettent en évidence l'importance de la sylviculture préventive du pin d'Alep dans les Aures. Cette approche vise à réduire le risque d'incendies forestiers et à valoriser davantage les ressources en bois de pin d'Alep. Ces résultats sont significatifs, car ils

soulignent l'importance de la gestion forestière proactive pour la préservation des écosystèmes forestiers et la valorisation économique des ressources forestières.

En conclusion, les résultats de ces études mettent en évidence l'importance de l'itinéraire sylvicole dans la gestion forestière, en montrant comment il peut influencer la répartition des diamètres des arbres. De plus, ils soulignent l'efficacité de certaines pratiques sylvicoles, telles que la régénération naturelle par petites trouées et les éclaircies. Enfin, l'approche de la sylviculture préventive pour le pin d'Alep dans les Aures est une mesure importante pour la conservation des forêts et l'exploitation durable des ressources forestières dans cette région. Ces résultats ont des implications significatives pour la gestion forestière et la conservation des écosystèmes forestiers.

Conclusion

En conclusion de ce chapitre dédié à la typologie des peuplements forestiers dans la série Aoures de la forêt domaniale de Ouled Yagoub, il ressort plusieurs résultats significatifs qui éclairent notre compréhension de cette précieuse ressource naturelle.

Tout d'abord, il est essentiel de reconnaître la diversité des typologies de peuplements présents dans cette série, allant des jeunes futaies de structure irrégulière aux vieilles futaies de structure irrégulière à jardinée. Cette diversité est le reflet des conditions écologiques et historiques variées qui ont façonné la série Aoures au fil du temps.

Les caractéristiques topographiques telles que l'altitude, la pente, et l'exposition ont joué un rôle majeur dans la détermination des qualités de stations forestières ce qui influence les typologies des peuplements forestiers. Par exemple, les parcelles situées à des altitudes plus élevées tendent à présenter des peuplements plus denses de gros bois, tandis que les altitudes plus basses sont associées à des jeunes futaies.

De plus, la gestion forestière dans cette série doit tenir compte de la variabilité de la densité, qui varie de faible à forte en fonction des parcelles. Cette variabilité de densité a des implications importantes pour la régénération, la structure et la productivité des peuplements.

Enfin, il est essentiel de souligner l'importance de la gestion sylvicole adaptée à chaque typologie de peuplement. Les opérations sylvicoles doivent être spécifiquement conçues pour préserver la santé et la vigueur des peuplements tout en préservant leur structure spécifique. Cela garantira une gestion durable de la forêt de pin d'Alep dans la série Aoures, contribuant ainsi à la préservation de cette ressource forestière cruciale en Algérie.

Ce chapitre constitue une base solide pour les futures étapes de gestion et d'aménagement de la série Aoures. Les informations détaillées sur les typologies de peuplements fournies dans cette étude serviront de guide précieux pour l'élaboration de plans de gestion forestière adaptés à chaque parcelle. En outre, elles contribueront à la préservation de la biodiversité unique de la série Aoures et à la durabilité des ressources forestières dans cette région de l'Algérie au potentiel forestier non négligeable.

CHAPITRE IV : Détection des zones brûlées de la forêt d'Ouled Yagoub

Introduction

La forêt algérienne connaît une dégradation significative, avec une régression constante des surfaces boisées par rapport à la période coloniale, comme l'ont montré les travaux de Boudy (1950), Quezel et Barbero (1990), et Bensaid et al. (1998). En effet, près de 30% du patrimoine forestier a disparu en raison d'une exploitation abusive au cours des périodes récentes, notamment pendant la période coloniale française, où des bases militaires, des forteresses et des approvisionnements en bois ont entraîné la disparition d'un million d'hectares de forêt.

Ainsi, en 1950, l'Algérie ne comptait plus que 3,2 millions d'hectares de forêts, selon les statistiques de l'époque (Sari in Bensaid et al., 1998). Cette réduction des surfaces boisées s'est poursuivie jusqu'à nos jours, en raison du surpâturage, des incendies, entraînant une surveillance insuffisante et des coupes illégales (Bensaid et al., 1998).

La forêt des Aurès, comme toutes les forêts algériennes, subit une dégradation marquée, notamment en raison de facteurs historiques et naturels tels que les incendies, les coupes régulières et les délits (Abdessemed, 1984).

La forêt d'Ouled Yagoub est située dans la wilaya de Khenchela, et s'étale sur une superficie de 27.305 ha essentiellement montagneuse avec une population riveraine clairsemée.

Cette zone est classée comme parc naturel d'envergure nationale, mais malheureusement la forêt de pin d'Alep de cette zone a été ravagée par des incendies dévastateurs en 2021.

Par conséquent, nous avons jugé utile de mener une étude diachronique sur le changement d'occupation du sol avant et après l'incendie, pour évaluer en termes de superficie les pertes d'espaces naturels suite à cette catastrophe naturelle.

Nous allons proposer les moyens nécessaires pour préserver la diversité végétale et réduire le risque d'extinction des espèces présentes, surtout après les derniers incendies.

Pour cela, les données de télédétection essentiellement les images du satellite européen Sentinel 2A ont été utilisées pour la réalisation d'une classification supervisée aboutissant à une carte d'occupation des sols avant l'incendie et une carte de l'indice des zones brûlées après l'incendie, ce qui permet une délimitation des surfaces incendiées. Cette méthodologie

est classique et a été employée par de nombreux chercheurs pour estimer les changements d'occupation des sols (Benmessaoud et al. 2009 ; Beghami et al. 2012 ; Garah et al. 2016 ; Kerrache et al. 2019 ; Al-hasn et Almuhammad 2022).

Dans cette optique, notre travail se concentre principalement sur l'étude cartographique d'occupation du sol dans l'espace forestier de la zone d'étude.

4.1. Matériels, données et approches méthodologiques

La méthodologie employée repose sur l'utilisation de techniques de télédétection, de cartographie et d'écologie forestière pour évaluer les changements d'occupation du sol du massif forestier avant et après l'incendie survenue en 2021, en comparant les résultats des traitements des images satellitaires.

La zone d'étude dans ce chapitre est composée par les deux séries forestières de Taghzout et Aoures.

4.1.1. Données et logiciels

Pour cette étude, nous avons utilisé diverses sources de données, notamment :

- Les images Sentinel 2A du 28/09/2020 et du 18/09/2021.
- Des cartes d'occupation du sol de la cédraie de Beni Oudjana et d'Ouled Yagoub (B.N.E.D.E.R., 2010a), de localisation des foyers de dépérissement dans la cédraie du Mont d'Ouled Yagoub (B.N.E.D.E.R., 2010b), et des formations forestières de la Wilaya de Khenchela à l'échelle 1/50 000 dans le cadre de l'inventaire forestier national (B.N.E.D.E.R., 2008).
- Un modèle numérique de terrain (MNT) de type "SRTM3".
- Données de terrain (Regions Of Interest).

Les logiciels utilisés pour le traitement des images comprennent le logiciel libre QGIS 3.22.5 Bialowieza avec l'extension SCP (Semi-Automatic Classification Plugin) (Congedo, 2021) sous Windows.

4.1.2. Approche méthodologique

Cette étude s'appuie sur l'analyse de données satellitaires multibandes entre deux dates, en sélectionnant les images en fonction des critères tels que la couverture, la résolution spatiale, les années et les saisons de prise de vue. Les images Sentinel 2A, à haute résolution spatiale (10m) ont été privilégiées pour couvrir la zone d'étude.

Deux images ont été choisies pour cette étude : une datant du 28/09/2020 et une autre du 18/09/2021, afin de représenter l'état d'occupation du sol de la zone avant l'incendie, et les limites des zones incendiées afin d'estimer les dégâts sur les différents types d'occupation du sol.

La sélection de la date optimale de l'image (Septembre) vise à garantir d'une image sans nuages et à éviter les confusions, notamment entre les classes de végétation, en tenant compte des périodes de végétation.

Les images Sentinel 2A ont été obtenues gratuitement via l'extension SCP et ont subi des corrections géométriques et atmosphériques.

Avant le traitement cartographique, les pixels situés en dehors de la zone d'étude ont été supprimés en se basant sur les limites des séries forestières choisies (Aoures et Taghzout) les plus touchées par le feu. Un masque a été créé pour chaque image traitée pour se concentrer uniquement sur la zone d'étude, simplifiant ainsi les opérations et réduisant les erreurs de classification.

Les différentes bandes spectrales ont été combinées pour établir des relations fiables entre les informations radiométriques et les classes d'objets prédéfinies. La composition colorée des images a permis de mieux discriminer les formations végétales d'intérêt.

Des sorties sur le terrain ont été effectuées pour caractériser 50 points d'échantillonnage, avec des relevés descriptifs de la végétation et de l'état du sol. Ces informations ont été synthétisées pour établir une légende de carte, qui a été vérifiée et codée en fonction des essences dominantes.

Enfin, la classification supervisée a été effectuée en utilisant les données de terrain et les signatures spectrales des classes sur les images. Les résultats ont été exportés en format vectoriel pour les traitements cartographiques ultérieurs avec le logiciel libre QGIS 3.22.5, aboutissant à la création des légendes définitives des cartes.

La délimitation des zones incendiées est faite par télédétection, la méthode repose sur l'analyse d'une image satellite Sentinel 2A couvrant la zone d'étude. L'objectif principal est de créer l'indice des zones incendiées (Burned Area Index) afin de délimiter avec la plus grande précision possible les zones ayant subi un incendie.

L'indice des zones incendiées (BAI) a été calculé à l'aide d'une formule spécifique :

$$\text{BAI} = 1 / ((0,1 - \text{Red})^2 - (0,06 - \text{PIR})^2) \text{ où :}$$

Red = la bande rouge de l'image

PIR = la bande Proche Infra-Rouge de l'image

Ce calcul a été effectué sur la plateforme Sentinel EO Browser.

Enfin, les résultats ont été téléchargés au format TIFF depuis la plateforme et importés dans QGIS 3.22.5. Une répartition en deux classes (présence 1 et absence 0 d'incendie) a été réalisée pour distinguer les zones incendiées des zones non incendiées. Une carte vectorielle a ensuite été élaborée, incluant les superficies des zones incendiées pour chaque série forestière.

Pour définir les superficies touchées par l'incendie par type d'occupation du sol, nous avons utilisé les outils du logiciel QGIS pour la conversion des données du format raster vers le format vecteur type polygones des zones incendiés. Ensuite, on a exploité les limites des zones incendiées vectorielles pour le découpage de la carte d'occupation du sol de 2020 afin d'obtenir la carte des types d'occupation de sols incendiés. Ces cartes nous a permis d'obtenir des statistiques sur les superficies des types d'occupation du sol avant et après l'incendie. Ces données ont été utilisées pour analyser et interpréter la dynamique d'occupation du sol dans la zone d'étude suite à cette perturbation catastrophique.

4.1.3. Prétraitements des images satellitaires

4.1.3.1. Création d'un masque "Mask"

Dans notre cas, le masque créé est de type géométrique, basé sur l'utilisation du vecteur délimitant la zone d'étude. L'intérieur du polygone de la zone d'étude, superposé à l'image multispectrale, a été préservé en le multipliant par 1, tandis que l'extérieur de la zone d'étude a été éliminé en multipliant par 0 le reste de l'image. L'application de ce masque a donné lieu à une image multispectrale de la zone d'étude.

4.1.3.2. Création de composition colorée

Pour la création de composition colorée, nous avons utilisé la technique RGB (Rouge-Vert-Bleu). Dans notre cas, cette composition a été réalisée en superposant les trois canaux Band 8 -PIR (0.842 μm), Band 3- Vert (0.560 μm) et Band 2-Bleu (0.490 μm). Nous avons attribué les couleurs rouge, vert et bleu respectivement aux canaux précédents. Le résultat de cette composition colorée est présenté dans la figure 18.

La création de composition colorée est essentielle pour l'interprétation visuelle des images. Dans la composition colorée de la zone d'étude, les zones de sol nu apparaissent en teintes de bleu clair, de vert clair à blanc, ce qui reflète la signature spectrale des minéraux. Les garrigues sont représentées en rouge clair, les zones agricoles en rouge vif, tandis que les forêts et les maquis arborés sont distingués par des teintes de rouge foncé à rouge-noir. Cette distinction est due au fait que la végétation se caractérise généralement par une très faible réflectance dans les longueurs d'onde correspondant au rouge (0,6 à 0,7 μm) et une réflectance élevée dans le proche infrarouge (0,7 à 0,9 μm).

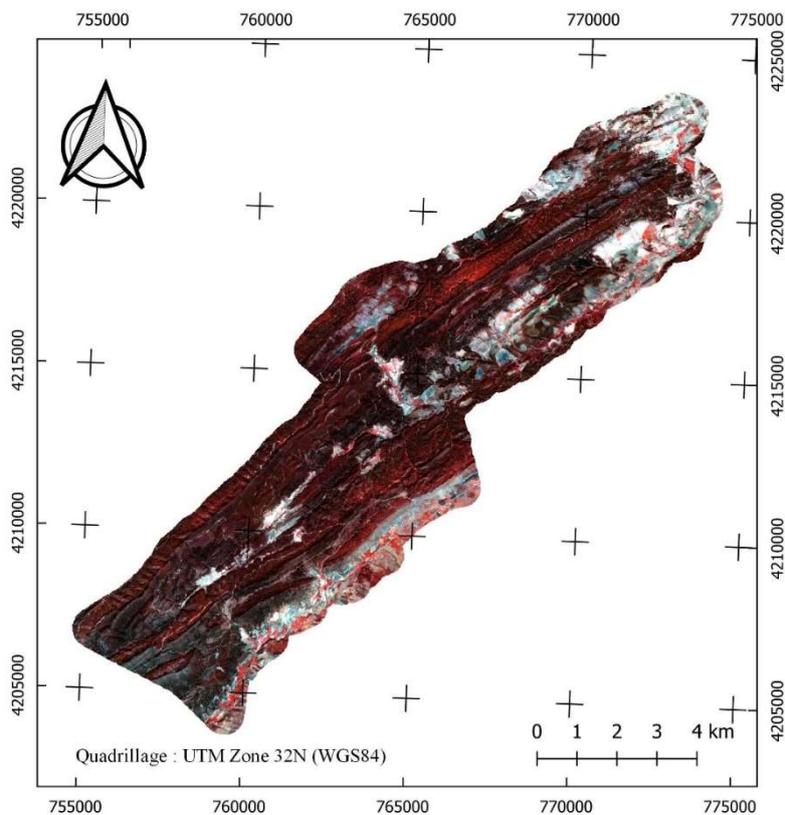


Figure 18 : Composition colorée (B8-B3-B2) de l'image de l'année 2020.

4.1.4. Classification supervisée de l'image Sentinel 2A (2020)

La méthode la plus efficace pour réaliser une classification supervisée nécessite une connaissance approfondie du terrain afin de sélectionner des échantillons de terrain les plus pertinents possibles. Nos missions sur le terrain nous ont permis de caractériser 50 placettes d'entraînement de 10 ares, chacune est représentative d'une zone homogène plus vaste, et étant caractérisée par sa localisation géographique (avec des coordonnées GPS), des photographies, et une description sommaire de son utilisation, de sa végétation, etc. Toutes

ces données se révèlent essentielles et objectivement pertinentes pour lancer une classification supervisée de l'image Sentinel 2A de la zone d'étude.

Les différents traitements appliqués à l'image de 2020 ont conduit à la création de la carte d'occupation du sol de la zone grâce à une classification supervisée basée sur la méthode de maximum de vraisemblance. Les principaux défis rencontrés au cours du processus de classification sont liés à des confusions dues aux similarités de réflectance entre certains objets. Les résultats peuvent comporter une certaine marge d'erreur en raison du choix des zones d'entraînement, qui ont été extraites en se basant sur la signature spectrale des objets de l'image Sentinel.

Dans notre classification, les polygones tests utilisés comprennent les thèmes suivants : (Futaie jeune régulière de pin d'Alep ; Futaie vieille irrégulière de pin d'Alep ; Futaie adulte irrégulière de pin d'Alep ; maquis arboré ; garrigues ; Sol nu et terres Agricoles).

La carte d'occupation du sol (Figures 19) permet d'identifier les différentes composantes de l'espace étudié, de comparer l'état du couvert forestier avant et après l'incendie, et d'analyser la dynamique de l'environnement forestier après la perturbation de l'incendie.

4.2. Résultats et discussions

Les résultats de cette étude se focalisent sur l'analyse de la dynamique d'occupation du sol suite à l'incendie de juillet 2021.

À la suite de l'application de méthodes de traitement numérique d'images satellitaires et d'analyses des données de la réalité de terrain, divers résultats ont été obtenus, et ceux-ci sont présentés ci-après.

Les résultats obtenus sont représentés sous forme de carte qui identifie les différentes composantes de l'espace étudié en 2020 (Figure 19).

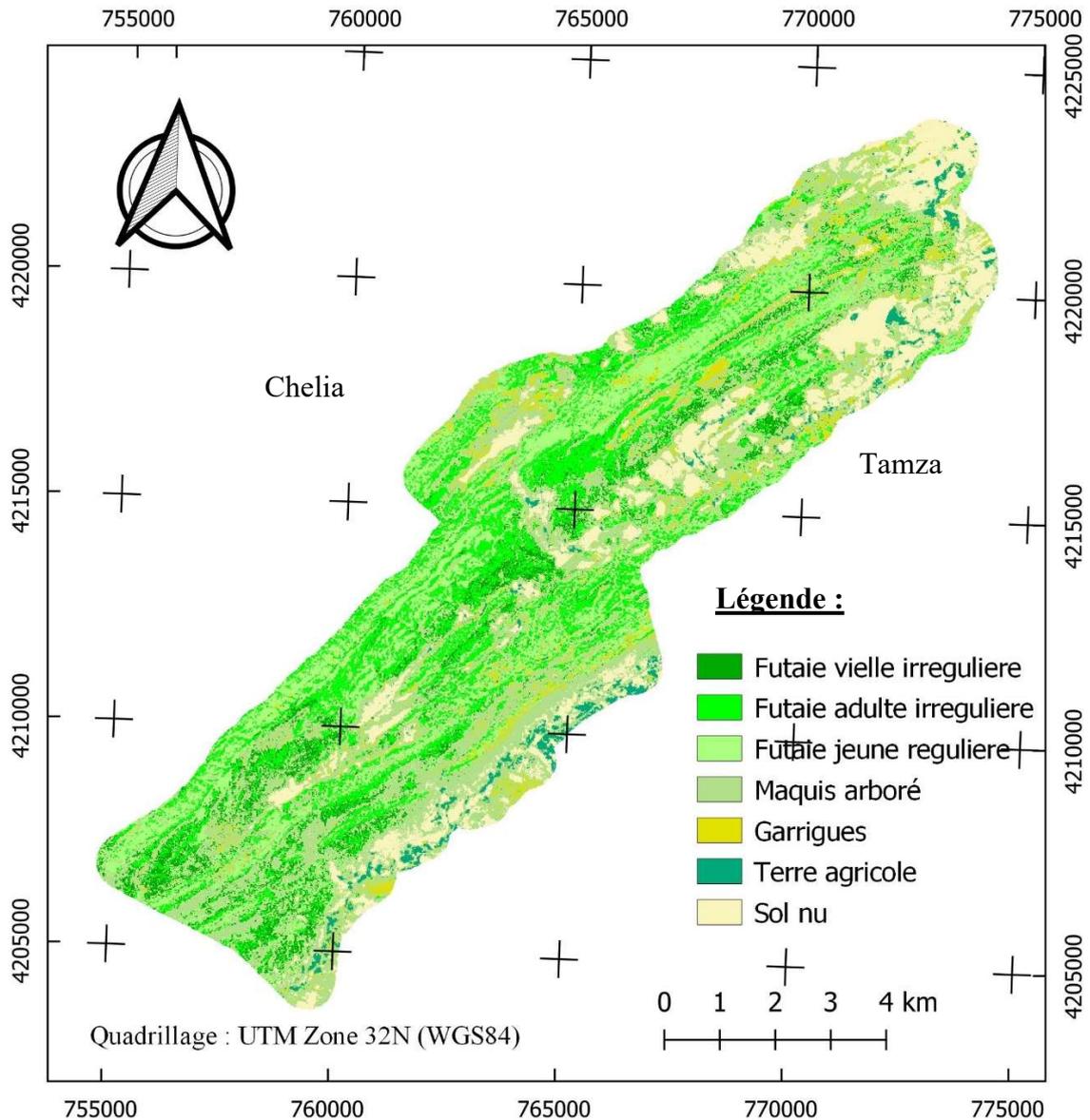


Figure 19 : Carte d'occupation du sol de la zone d'étude en 2020.

La classification supervisée de l'image Sentinel 2A a permis de générer une carte d'occupation du sol mettant en évidence les principales formations végétales présentes. Une analyse préliminaire de la carte obtenue grâce à la méthode du maximum de vraisemblance révèle la répartition des différentes formations, notamment celles composées de forêts de pin d'Alep, maquis de chênes verts arboré, garrigues de chêne vert et de genévrier oxycèdre, terres agricoles et sols nus.

Les futaies de pin d'Alep représentent un taux de 48.6% de la surface de la zone d'étude, repartis essentiellement sur les versants Nord et Nord-Ouest de la zone montagneuse. Les maquis arborés dominent 31% de la superficie, et se répartissent essentiellement sur les versants Sud et Sud Est des reliefs, et constituent la zone périphérique des forêts avant les

terrains nus. Suivis par les garrigues avec seulement 4% de la superficie, et qui se répartissent en taches éparpillées généralement entre les maquis arborés et les sols nus. Les zones de sol nu affichent une couverture faible, principalement dans l'extrême Est et l'extrême Sud de la zone, tandis que les terres agricoles occupent une part très limitée du territoire étudié.

L'évaluation de la précision de la classification implique la comparaison de l'image classée avec des zones de vérification, dont la nature est déterminée par des observations directes sur le terrain lors des sorties d'exploration et de reconnaissance de la zone. Cette comparaison repose généralement sur une matrice de confusion qui identifie les concordances et les discordances entre les ensembles de données. Des confusions sont observées entre certaines classes, tandis que d'autres sont correctement classifiées.

La classification de l'image Sentinel 2A de l'année 2020 a également permis d'estimer les superficies des différentes classes, et ces estimations sont présentées dans la figure suivante :

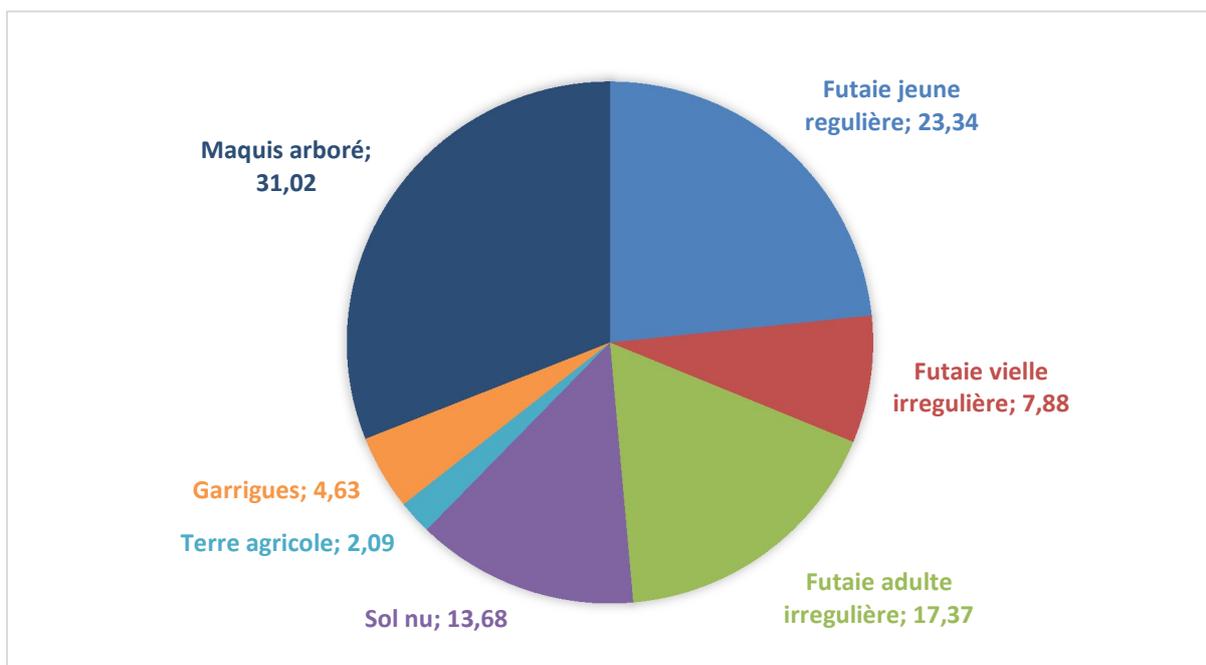


Figure 20 : Répartition des superficies en (%) des classes d'occupation du sol en 2020

Maquis arboré : Cette classe de couverture du sol occupe la plus grande superficie avec 31,02% de la zone totale, ce qui équivaut à environ 2549,96 hectares. Cela suggère que le maquis arboré est la catégorie prédominante dans cette région.

Futaie jeune régulière : La futaie jeune régulière représente 23,34% de la zone totale, soit environ 1919,26 hectares. Cette classe indique la présence de jeunes peuplements forestiers qui se comporte bien avec les conditions du milieu.

Futaie adulte irrégulière : Avec une superficie de 17,37%, soit environ 1427,97 hectares, cette classe de couverture du sol représente une forêt plus mature mais irrégulièrement répartie, ce qui suggère peut-être une gestion forestière moins intensive.

Sol nu : La zone de sol nu occupe 13,68% de la surface totale, équivalant à environ 1124,43 hectares. Cette classe indique des zones sans végétation, ce qui pourrait être dû à des facteurs tels que la déforestation ou l'érosion du sol.

Futaie vieille irrégulière : Cette classe couvre 7,88% de la zone totale, soit environ 647,46 hectares. Elle représente une forêt mature, mais avec une répartition irrégulière, ce qui peut indiquer une gestion forestière moins uniforme.

Garrigues : Les garrigues occupent 4,63% de la surface totale, soit environ 380,96 hectares. Cette catégorie suggère la présence de zones de végétation basse et dispersée, caractéristique des environnements méditerranéens dégradés.

Terre agricole : Les terres agricoles représentent seulement 2,09% de la zone totale, soit environ 171,61 hectares. Cela indique une utilisation limitée des terres pour l'agriculture dans cette région.

4.2.1. Cartographie des zones brûlées

L'application de l'indice BAI a permis de cartographier les zones incendiées avec une grande précision. Les résultats sont présentés sous forme de carte, mettant en évidence les emplacements des zones incendiées. Les zones identifiées comme ayant été touchées par des incendies sont clairement délimitées et mises en évidence sur la carte.

La carte des zones incendiées générée à l'aide de l'indice BAI montre une répartition spatiale des dommages causés par les incendies. Les zones incendiées sont représentées en couleur noire, ce qui permet une visualisation facile et rapide des zones touchées.

La figure 21 montre la carte d'occupation du sol en 2020 avec les zones incendiées (Burned Area Index – B.A.I.) en Septembre 2021, ce qui confirme clairement les zones incendiées qui se situent principalement à l'Ouest de la zone d'étude.

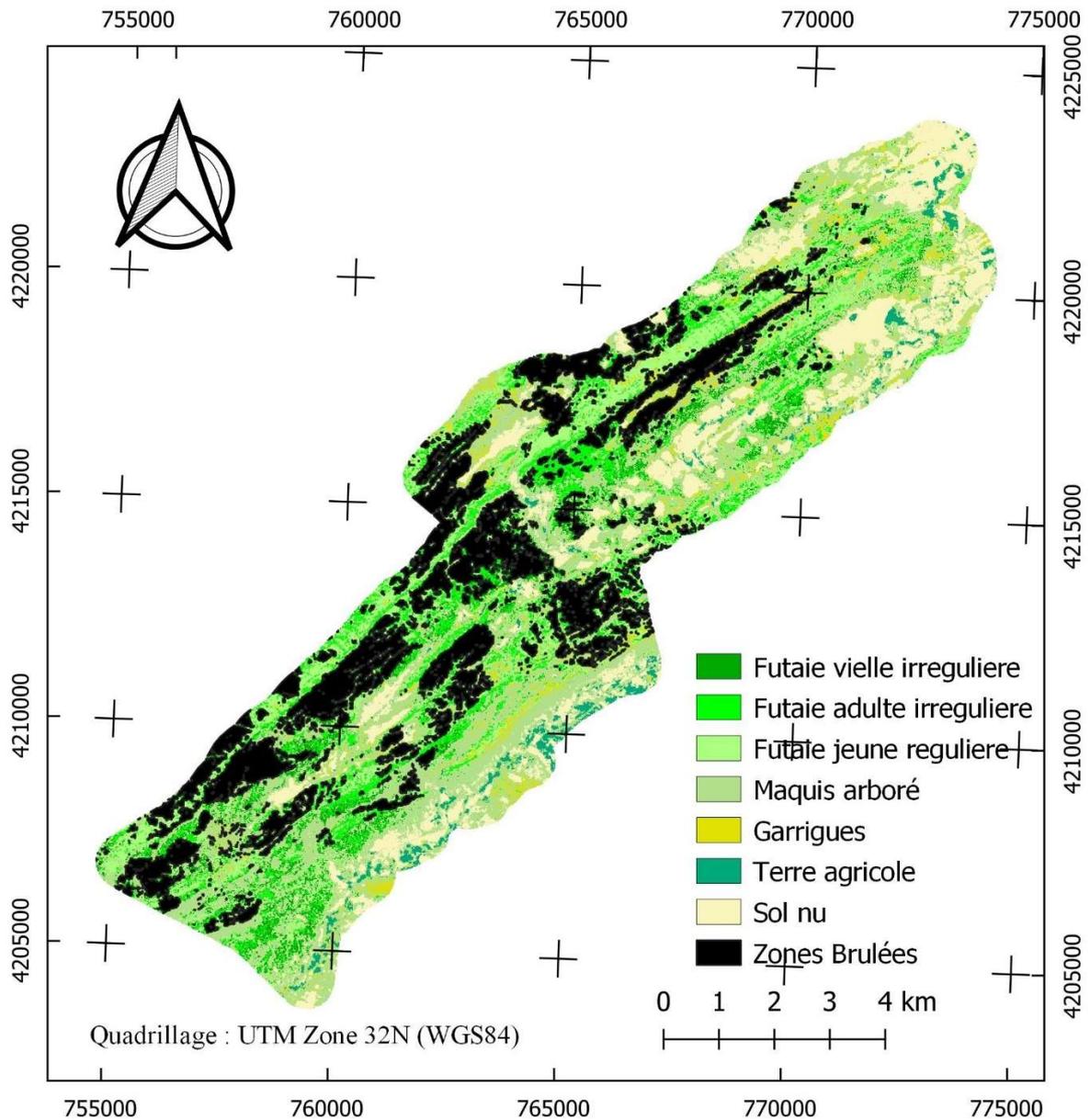


Figure 21 : Carte des zones incendiées en 2021

Les valeurs de l'indice BAI fournissent des informations sur l'étendue des dommages causés par les incendies. Les zones avec des indices élevés indiquant les limites des terres brûlées nécessitent une attention particulière pour la restauration et la régénération de la végétation.

Les résultats de la cartographie des zones incendiées basée sur l'indice BAI sont essentiels pour planifier les activités de restauration de l'écosystème. Cela peut inclure la replantation de la végétation, la prévention de l'érosion ou d'autres mesures de réhabilitation.

La carte des zones incendiées peut servir de référence pour la surveillance à long terme de la régénération de la végétation. Les futurs relevés pourront être comparés à cette carte pour évaluer les progrès de la récupération de l'écosystème.

La figure 22 met en évidence les zones géographiques touchées par les incendies. Les zones colorées indiquent l'état d'occupation des sols initiale des zones brûlées, tandis que les zones non colorées sont restées intactes. Cette identification précise des zones touchées est essentielle pour la gestion post-incendie.

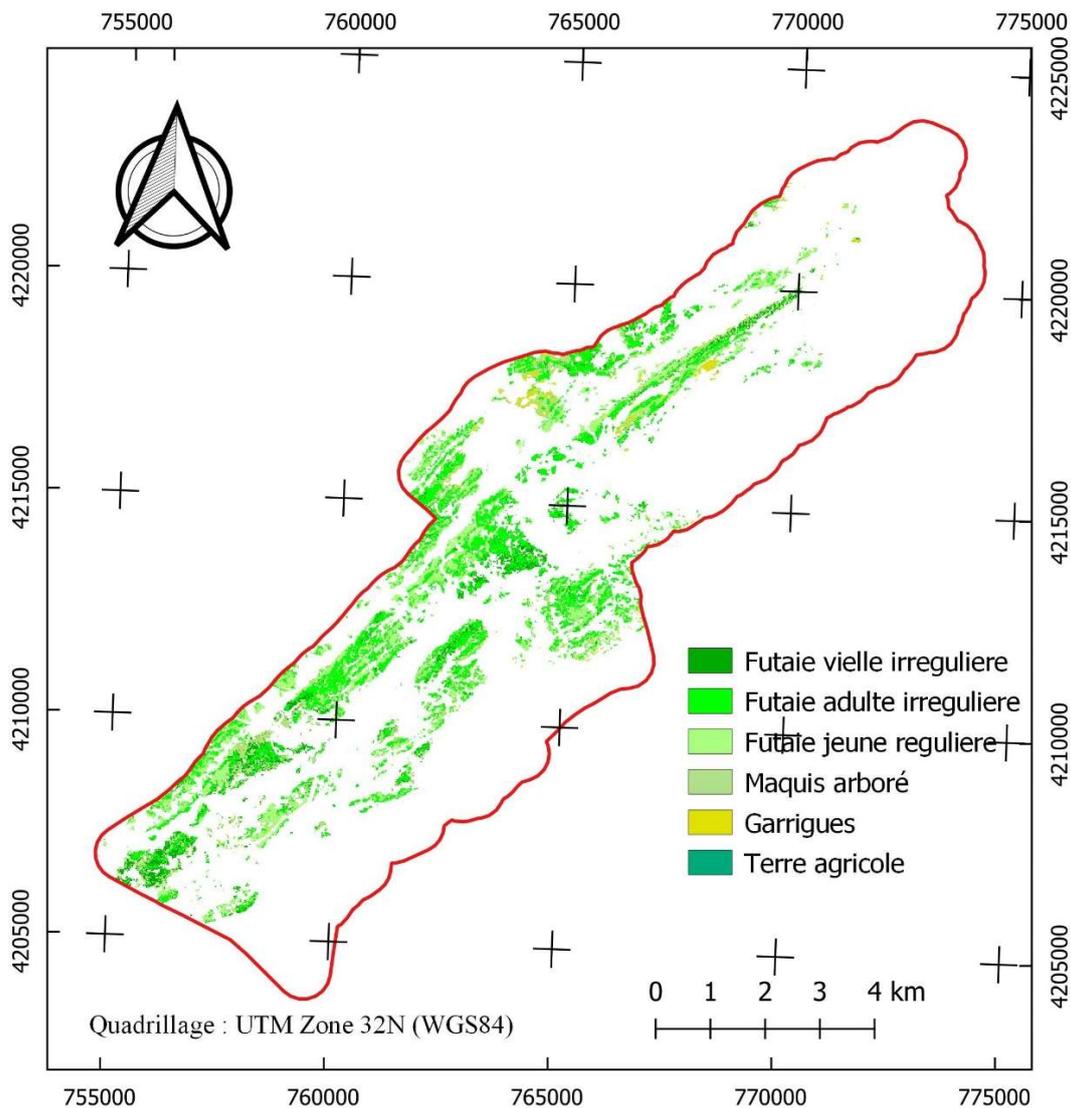


Figure 22 : Carte d'occupation des zones brûlées avant l'incendie de 2021.

Le tableau 10 montre la répartition des taux des surfaces et des surfaces totales, incendiées et non incendiées par type d'occupation du sol de la zone d'étude.

Tableau 10 : Répartition des taux et des surfaces incendiées par type d'occupation

Type d'occupation	Surface totale (Ha)	Surface Incendiée (Ha)	Surface non incendiée (Ha)	Taux de la surface non incendiée par type d'occupation (%)	Taux de la surface incendiée par type d'occupation (%)	Taux de type d'occupation dans l'incendie (%)
Futaie jeune régulière	1919,26	561,29	1357,97	70,75%	36,51%	29,25%
Futaie vieille irrégulière	647,46	155,96	491,5	75,91%	10,15%	24,09%
Futaie adulte irrégulière	1427,97	600,09	827,88	57,98%	39,04%	42,02%
Sol nu	1124,43	0,03	1124,4	100,00%	0,00%	0,00%
Terre agricole	171,61	0,05	171,56	99,97%	0,00%	0,03%
Garrigues	380,96	42,96	338	88,72%	2,79%	11,28%
Maquis arboré	2549,96	176,87	2373,09	93,06%	11,51%	6,94%

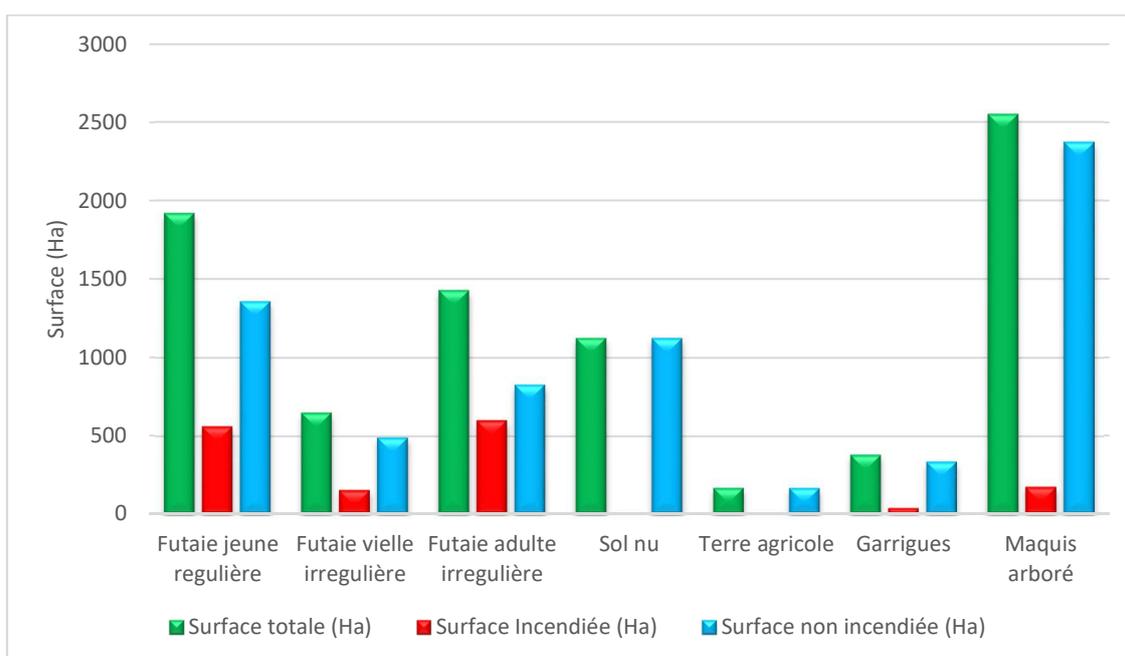


Figure 23 : Répartition des surfaces incendiées par type d'occupation

L'analyse des données du tableau 10 et de la figure 23 révèle des informations essentielles sur la répartition des surfaces incendiées et non incendiées en fonction des différents types d'occupation du sol.

Les types d'occupation du sol sont répertoriés en fonction de la surface totale, de la surface incendiée, de la surface non incendiée, ainsi que des taux correspondants de surface non

incendiée et de surface incendiée par type d'occupation, ainsi que du taux de chaque type d'occupation dans l'incendie.

1. Futaie Jeune Régulière : Cette formation forestière représente une surface totale de 1 919,26 hectares, dont 561,29 hectares ont été incendiés, laissant 1 357,97 hectares non incendiés. Le taux de surface non incendiée est de 70,75%, tandis que le taux de surface incendiée est de 36,51%. Cette formation contribue à hauteur de 29,25% à l'ensemble de l'incendie.

2. Futaie Vieille Irrégulière : Avec une superficie totale de 647,46 hectares, cette formation a connu des incendies sur 155,96 hectares, laissant 491,5 hectares non incendiés. Le taux de surface non incendiée est de 75,91%, tandis que le taux de surface incendiée est de 10,15%. Cette formation contribue à hauteur de 24,09% à l'ensemble de l'incendie.

3. Futaie Adulte Irrégulière : Cette formation s'étend sur 1 427,97 hectares, dont 600,09 hectares ont été incendiés, laissant 827,88 hectares non incendiés. Le taux de surface non incendiée est de 57,98%, tandis que le taux de surface incendiée est de 39,04%. Cette formation représente une contribution de 42,02% à l'ensemble de l'incendie.

4. Sol Nu et Terre Agricole : Ces types d'occupation du sol n'ont subi pratiquement aucun incendie, avec des taux de surface incendiée de 0,00%. Le sol nu couvre 1 124,4 hectares, tandis que la terre agricole s'étend sur 171,56 hectares.

5. Garrigues et Maquis Arboré : Les garrigues ont été partiellement touchées, avec 42,96 hectares incendiés sur une superficie totale de 380,96 hectares. Le taux de surface non incendiée est de 88,72%, et elles contribuent à hauteur de 11,28% à l'ensemble de l'incendie. Le maquis arboré a subi des incendies sur 176,87 hectares de sa surface totale de 2 549,96 hectares, avec un taux de surface non incendiée de 93,06%. Cette formation représente 6,94% de l'incendie total.

Ces données fournissent un aperçu précis de la répartition des dommages causés par l'incendie en fonction des types d'occupation du sol. Elles peuvent orienter les décisions de gestion et de restauration, en mettant en évidence les zones prioritaires pour la régénération et la protection des écosystèmes touchés par l'incendie.

En fonction des données du tableau précédent, les décisions de gestion et de restauration peuvent varier en fonction du type d'occupation du sol. Nous proposons les décisions spécifiques par type d'occupation suivante :

Futaie jeune régulière :

- Envisager une régénération forestière pour rétablir la couverture végétale.
- Surveiller attentivement la croissance des nouvelles plantations.
- Mettre en place des mesures de prévention des incendies.

Futaie vieille irrégulière :

- Prioriser la restauration des zones les plus touchées.
- Effectuer des études sur la biodiversité pour évaluer l'impact sur la faune et la flore.
- Mener des activités de surveillance pour détecter tout signe de dégradation supplémentaire.

Futaie adulte irrégulière :

- Mettre en œuvre des stratégies de restauration, telles que la régénération naturelle assistée.
- Établir des corridors de biodiversité pour favoriser la recolonisation de la faune.
- Évaluer l'efficacité des mesures de prévention des incendies.

Sol nu et terre agricole :

- Renforcer les pratiques de conservation des sols pour éviter l'érosion.
- Réhabiliter les zones éventuellement dégradées pendant l'incendie.
- Mettre en place des mesures de prévention des incendies adaptées aux zones voisines.

Garrigues :

- Réhabiliter les zones touchées pour restaurer la végétation naturelle.
- Surveiller la régénération naturelle et éventuellement effectuer des plantations.
- Mettre en place des pratiques de gestion durable pour minimiser les risques d'incendie futurs.

Maquis arboré :

- Prioriser la conservation des zones à forte valeur écologique.
- Surveiller les espèces végétales et animales rares ou menacées.
- Mener des études sur la résilience de l'écosystème aux incendies.

Ces décisions doivent être prises en concertation avec des experts en gestion forestière, en écologie et en prévention des incendies. Il est essentiel d'adapter les mesures en fonction de la sévérité de l'incendie, de l'état de l'écosystème et des objectifs de conservation spécifiques à chaque zone. Une gestion et une restauration appropriées contribueront à la récupération des écosystèmes touchés par l'incendie et à la réduction des risques d'incendies futurs.

Conclusion

Cette étude présente une analyse d'occupation du sol de la forêt d'Ouled Yagoub (Séries Aoures et Taghzout), en mettant en lumière les changements avant et après un incendie majeur survenu en juillet 2021.

Ce travail a examiné en détail l'occupation du sol dans la forêt d'Ouled Yagoub, un écosystème précieux en Algérie qui a été gravement affecté par les incendies. La dégradation continue des forêts en Algérie, comme indiqué par plusieurs études antérieures, est un problème grave, et la forêt d'Ouled Yagoub n'a pas échappé à ce phénomène préoccupant.

L'incendie de juillet 2021 a eu un impact négatif significatif sur la structure de l'occupation du sol de la région, et cette étude a cherché à quantifier ces changements. En utilisant des données de télédétection, notamment des images satellitaires Sentinel 2A, une classification supervisée a été réalisée pour cartographier l'occupation du sol avant l'incendie, puis une analyse de l'Indice des Zones Brûlées (BAI) a permis de délimiter les zones touchées par l'incendie.

Les principaux résultats de cette étude montrent que la zone d'étude était principalement occupée par des formations forestières, en particulier la futaie jeune régulière de pin d'Alep. Cependant, l'incendie a eu un impact significatif sur ces formations forestières, avec des pertes considérables de superficie forestière.

La gestion future de la forêt doit tenir compte de ces résultats. Des mesures spécifiques de gestion et de restauration doivent être mises en place en fonction du type d'occupation du sol. Il est essentiel de prendre des mesures pour favoriser la régénération des zones touchées, surveiller attentivement la croissance des nouvelles plantations et mettre en œuvre des stratégies de prévention des incendies pour minimiser les risques futurs.

En fin de compte, cette étude souligne l'importance de la gestion durable et réfléchie des forêts et de la conservation des écosystèmes forestiers. Les incendies forestiers constituent une menace grave, mais avec des mesures appropriées, il est possible de restaurer et de protéger ces précieux habitats naturels. Il est également crucial de continuer à surveiller la situation de près et d'ajuster les stratégies de gestion en fonction de la dynamique progressive de la forêt d'Ouled Yagoub.

Conclusion générale

La présente thèse a été menée dans le but d'approfondir la compréhension de dynamique de la croissance et la qualité des stations forestières dans le massif de Ouled Yagoub, en Algérie, en utilisant des techniques avancées de télédétection et de Système d'Information Géographique (SIG). A travers cette recherche, nous avons obtenu des résultats probants qui apportent des réponses claires sur l'état actuel de la forêt d'Ouled Yagoub et sur les méthodes potentiellement efficaces pour sa gestion durable.

Notre première conclusion, basée sur une analyse approfondie des facteurs écologiques influençant la qualité des stations forestières, révèle que la qualité des stations forestières est étroitement liée à la topographie de la région. Plus précisément, nous avons constaté que les stations forestières de haute qualité sont prédominantes dans les régions montagneuses du nord, tandis que les zones de moindre qualité forestière se trouvent principalement dans les régions basses du côté sud. La topographie apparaît comme le principal facteur limitant pour la qualité des stations forestières. Cette conclusion met en évidence l'importance cruciale de prendre en considération la topographie lors de la planification de la gestion forestière et de la conservation dans cette région.

La deuxième partie de notre étude se penche sur la gestion des peuplements forestiers et la variabilité de leur densité dans le massif de Ouled Yagoub. Nous avons observé une diversité significative dans la densité des peuplements, allant de faible à forte, en fonction des parcelles étudiées. Cette variabilité de densité a des implications profondes sur la régénération, la structure et la productivité des peuplements forestiers. Il est clair que la gestion forestière devrait être adaptée en fonction de cette variabilité, avec des stratégies spécifiquement conçues pour préserver la santé et la vigueur des peuplements tout en maintenant leur structure spécifique. Cette conclusion souligne l'importance d'une approche individualisée pour la gestion sylvicole dans le massif de Ouled Yagoub.

La troisième partie de notre recherche porte sur les conséquences dramatiques des incendies de forêt sur la structure de l'occupation du sol dans la forêt d'Ouled Yagoub. L'incendie majeur survenu en juillet 2021 a eu un impact significatif et très négatif sur la répartition des types de couverture du sol. En utilisant des données de télédétection, notamment des images satellitaires Sentinel 2A, nous avons réalisé une classification supervisée pour cartographier l'occupation du sol avant et après l'incendie. Ensuite, nous avons utilisé l'Indice des Zones Brûlées (BAI) pour délimiter précisément les zones touchées par l'incendie. Les principaux

résultats de cette étude montrent que la forêt d'Ouled Yagoub était principalement occupée par des formations forestières, notamment la futaie régulière jeune de pin d'Alep. Cependant, l'incendie a engendré des pertes considérables de superficie forestière, remettant en question la conservation de cet écosystème fragile.

Ces trois parties de la thèse mettent en évidence des éléments cruciaux pour la gestion et la conservation de la forêt d'Ouled Yagoub. Elles soulignent l'importance de l'intégration des données spatiales dans la planification de la gestion forestière, permettant ainsi de cibler plus efficacement les actions de conservation, d'identifier les zones à haut risque et de prendre des décisions éclairées pour la préservation à long terme de cette ressource forestière précieuse.

Cependant, des recherches futures sont nécessaires pour élaborer des stratégies de gestion durable tenant compte de la variabilité de la densité des peuplements et pour déterminer comment mettre en œuvre une gestion et une construction réussies aux stades ultérieurs de la protection des terres forestières. De plus, la superficie totale de terres forestières devrait être prise en compte dans l'établissement de schémas de zonage de protection forestière.

Finalement, cette thèse peut être considérée comme une étude significative à la compréhension et à la gestion des stations forestières dans le massif de Ouled Yagoub, en Algérie. Elle souligne l'importance de la conservation des écosystèmes forestiers face aux menaces de dégradation et d'incendie, et elle fournit des recommandations pour une gestion plus durable de cette ressource pour la biodiversité et l'environnement en Algérie. La télédétection et le SIG se révèlent être des outils essentiels pour cette tâche, et leur utilisation continue devrait être encouragée pour surveiller de près l'évolution de la forêt d'Ouled Yagoub.

Recommandations et propositions

1. Gestion Différenciée des Stations Forestières : Compte tenu des variations significatives de la qualité des stations forestières dans le massif de Ouled Yagoub, il est essentiel d'adopter une approche différenciée de la gestion forestière. Les zones de haute qualité forestière devraient être gérées de manière à favoriser la production de biomasse de haute qualité, notamment en réduisant la densité des peuplements pour obtenir du bois de meilleure qualité. Les zones de qualité inférieure peuvent être désignées comme des forêts de protection pour prévenir la dégradation des sols et la perte de couverture forestière.
2. Prévention des incendies : Les incendies de forêt représentent une menace majeure pour la forêt d'Ouled Yagoub. Des mesures de prévention et de lutte contre les incendies doivent être mises en place de manière proactive. Cela inclut la sensibilisation, la surveillance accrue, la création de pare-feu naturels, et l'élaboration de plans d'intervention d'urgence.
3. Restauration et régénération : Après l'incendie de 2021, il est impératif de mettre en œuvre des programmes de restauration et de régénération des zones touchées. Cela peut inclure la plantation d'espèces résistantes et fixatrices pour restaurer la fertilité du sol et promouvoir la croissance forestière.
4. Suivi continu : La surveillance à long terme est très importante pour évaluer l'efficacité des mesures de gestion et de restauration. Les systèmes de télédétection et les SIG peuvent être utilisés pour surveiller les changements d'occupation du sol, les taux de croissance forestière et la santé générale de la forêt.
5. Collaboration internationale et valorisation des résultats de la recherche : La gestion et la conservation de la forêt d'Ouled Yagoub nécessitent une collaboration internationale. L'Algérie peut tirer parti de l'expertise et des ressources mondiales en matière de gestion forestière durable et de lutte contre les incendies.

Perspectives

1. Recherche additionnelle : Les résultats de cette thèse soulignent la nécessité de poursuivre la recherche dans le domaine de la gestion forestière et de la conservation en Algérie. Des études plus approfondies peuvent être entreprises pour évaluer l'impact des mesures de gestion, la biodiversité forestière, et les tendances à long terme de la couverture forestière.

Comme études complémentaires à ce travail de thèse, on propose :

- L'utilisation d'un modèle de croissance en hauteur ou d'indice de sites pour évaluer le potentiel de production de chaque parcelle.
- L'utilisation d'un tarif de cubage pour évaluer le volume de bois pour chaque parcelle. L'indice de site et le volume du bois fort sur pied peuvent être étudiés en fonction des caractéristiques des placettes (topographie, sol, etc.).
- Le développement d'un modèle de distribution des tiges par classes de grosseur pour les parcelles étudiées.
- La comparaison des données du FSQI et des données dendrométriques pour obtenir des outils d'évaluation de fertilité et de productivités plus puissants et faciles à utiliser.

2. Intégration de la communauté locale : Impliquer les communautés locales dans la gestion forestière peut être bénéfique. Les connaissances traditionnelles et locales sur les forêts peuvent compléter les approches scientifiques.

3. Éducation et sensibilisation : Des programmes éducatifs et de sensibilisation peuvent aider à informer le public sur l'importance de la conservation des forêts et des écosystèmes forestiers.

4. Gestion intégrée des terres : La gestion de la forêt d'Ouled Yagoub doit être intégrée dans une approche plus large de gestion des terres, tenant compte des interactions entre les forêts, les zones agricoles et les zones urbaines.

5. Durabilité à long terme : L'objectif ultime de la gestion forestière dans le massif de Ouled Yagoub doit être la durabilité à long terme, garantissant que cette ressource naturelle précieuse soit préservée pour les générations futures.

En conclusion, cette thèse représente une étape importante dans la compréhension et la gestion des terres forestières dans le massif de Ouled Yagoub en Algérie. Les recommandations, propositions et perspectives formulées visent à contribuer à la préservation de cette forêt et à assurer sa durabilité pour les générations à venir. La gestion forestière efficace et la conservation de la biodiversité sont essentielles pour préserver les écosystèmes forestiers et lutter contre les défis environnementaux auxquels l'Algérie est confrontée.

Références bibliographiques :

1. **Abdelfettah A. (2014)** : Plaidoyer pour la forêt algérienne - Réflexion sur une gestion écologique des forêts algériennes dégradées. Forêt Méditerranéenne, XXXV (4), pp.451-454.
2. **Abdessemed K. (1981)**: Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* (Endl.) Manetti ex Carrière 1855) dans les massifs de l'Aurès et Belezma (Algérie): Étude phytosociologique et problèmes de conservation et d'aménagement. [PhD. Thesis.] Marseille, Université Aix-Marseille.
3. **Abdessemed K. (1984)**: Les problèmes de dégradation des formations végétales dans l'Aurès (Algérie). 1. La dégradation, ses origines et ses conséquences. Forêts Méditerranéennes, 6 (1) : 19-26.
4. **Abdessemed K. (1985)**: Les problèmes de la dégradation des formations végétales dans l'Aurès (Algérie) – les mesures à prendre. Forêt Méditerranéenne, 7 (1) : 43-51.
5. **Al-hasn R., Almuhammad R., (2022)**: Burned area determination using Sentinel-2 satellite images and the impact of fire on the availability of soil nutrients in Syria. J. For. Sci., 68: 96–106.
6. **B.N.E.D.E.R. (2008)**: Rapport sur la caractérisation des formations forestières de la Wilaya de Khenchela. Alger, BNEDER: 25.
7. **B.N.E.D.E.R. (2010)**: Etude de classement de la cédraie de Beni Oudjana et d'Ouled Yagoub en parc national - Phase II : ANALYSE DE L'ETAT DES LIEUX. Alger, Bureau National d'Etudes pour le Développement Rural: 230.
8. **Bedia J., Camia A., Moreno J.M., Gutierrez Herrera S. (2014)**: Forest fire danger projections in the Mediterranean using ensembles regional climate change scenarios. Climatic Change, 122 : 185–199. <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-013-1005-z>
9. **Beghami Y., De Bélair G., Véla E. (2007)**: Les groupements végétaux de la cédraie du massif de Chelia, “Aurès” (Algérie). Actes du colloque géoflore. Bulletin de l'Association des Botanistes Lorrains, Numéro Spécial 1 : 153-159.
10. **Beghami Y., Kalla M., Thinon M., Benmessaoud (H. (2012)**: Spatiotemporal Dynamics of Forest and Mountain Formations in Aurès Area, Algeria. Journal of Life Sciences, 6: 663-669.
11. **Benabdeli K. (2012)** : Identification of prerequisites for the sustainable management of forest ecosystems in Algeria. In the report of the 2nd scientific days of the LRGOF Mascara University, Algeria, March 14-15, 2012.

12. **Benmesaoud H., Kalla M., Dridi H. (2009):** Evaluation de l'occupation des sols et désertification dans le Sud des Aurès (Algérie). *M@ppemonde*, 94 (2) : 1-11. Available at: <http://mappemonde-archive.mgm.fr/num22/articles/art09206.pdf>
13. **Benmessaoud H. (2009).** Etude de la vulnérabilité à la désertification par des méthodes quantitatives numériques dans le massif des Aurès (Algérie). Thèse Doc. Univ. de Batna. 220p.
14. **Bentouati A. (2005).** Croissance, productivité et aménagement des forêts de pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) du massif de Ouled-Yakoub (Khenchela-Aures). Thèse de doctorat d'Etat en Sciences Agronomiques, Université Hadj Lakhdar, Batna, Algérie. 119 p.
15. **Bentouati A. (2008):** La situation du cèdre de l'Atlas dans les Aurès (Algérie). *Forêt Méditerranéenne*, 29, 203-208.
16. **Bentouati A., Bariteau M., (2005):** Une sylviculture pour le pin d'Alep des Aurès (Algérie). *Revue Forestière Française*. T. XXVI-4: 315-321.
17. **Bentouati A., Bariteau M., (2006):** Réflexions sur le dépérissement du cèdre de l'Atlas des Aurès (Algérie). *Forêt Méditerranéenne*, 27 (4) : 317-322.
18. **BNEF (1984) :** Plan d'aménagement de la zone des Ouled Yacoub et des Beni-Oudjana (40.000 ha). Ministère de l'Hydraulique de l'Environnement et des Forêts. Algérie. 62 pages + annexes..
19. **Bonilla-Bedoya S., Herrera-Machuca M.A., Lopez-Ulloa M., Vanwallegem T. (2017):** Effects of land use change on soil quality indicators in forest landscapes of the Western Amazon. *Soil science*, 182 (4): 128-136.
20. **Boudy P., (1950) :** Economie Forestière Nord-Africaine. Tome II : Monographies et traitements des essences forestières, fascicule II. Editions Larose; Paris (Ve). 878 p.
21. **Boultif M., Benmessaoud H. (2017):** Using climate-soil-socioeconomic parameters for a drought vulnerability assessment in a semi-arid region: Application at the region of El Hodna, (M'sila, Algeria). *Geographica Pannonica*, 21: 142-150.
22. **Bouzekri A., Benmessaoud H. (2016):** Using multi-criteria analysis for the study of human impact on agro-forestry-pastoral ecosystem in the region of Khenchela (Algeria). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLI-B8: 779-783.
23. **Chafai, C. (2016).** Contribution à l'étude de la dynamique spatiale et de la biomasse du frêne dimorphe dans la cédraie de Ouled Yagoub W. de Khenchela. Thèse de Magister. Université de Batna. 88p.

24. **Chandio, I. A., Matori, A. N. B., WanYusof, K. B., Talpur, M. A. H., Balogun, A. L., & Lawal, D. U. (2013):** GIS-based analytic hierarchy process as a multicriteria decision analysis instrument: a review. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(8), 3059-3066.
25. **Chen L., Chen X., Shi G., Nzai W.L. (1998):** Study on improving the quality of forest land of larch plantations. *Journal of Northeast Forestry University*, 26(3): 6-11.
26. **Chung I.K. (1978):** Quantitative Forest land productivity survey and the result: Forest land capability classification in South Korea. *Japanese Journal of Forest Environment*, 19: 31–35.
27. **Congedo, L., (2021):** Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *Journal of Open Source Software*, 6(64), 3172, <https://doi.org/10.21105/joss.03172>
28. **D.G.F. (2018):** Les feux de forêts en Algérie - Analyse et perspectives. Alger, Direction Générale des Forêts DGF: 46.
29. **DE FSM Russo, R., & Camanho, R. (2015) :** Criteria in AHP: a systematic review of literature. *Procedia Computer Science*, 55, 1123-1132.
30. **Dhôte J.F., (1997) :** Relations entre le milieu, la structure des peuplements et la croissance – rapport de convention INRA-Cemagref « Relations entre le milieu, la croissance et quantité des chênes indigènes ».
31. **E.F.F.I.S. (2022):** <https://effis.jrc.ec.europa.eu/apps/effis.statistics/estimates/DZA/>, accessed on 13/02/2022.
32. **Fleurisson, J. A. (2001).** Structures géologiques et stabilité des pentes dans les massifs rocheux: description, analyse et modélisation. *Revue française de géotechnique*, (95-96), 103-116.
33. **Garah, K., Chafai C., Bentouati A. (2016) :** Évolution spatiotemporelle des écosystèmes forestiers à Pin d'Alep de l'Aurès oriental (Algérie). *Revue Forestière Française*. 68: 217-229.
34. **Ghazi A. (2009) :** Rapport national de réflexion sur le secteur des forêts. PNUD, Algérie, 17p.
35. **Golden B. L., Wang Q. (1990):** An Alternative Measure of Consistency. In: Golden B. L., Wasil A., Harker P.T., (eds): *Analytic Hierarchy Process: Applications and Studies*. New York, Springer Verlag: 68-81. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-50244-6>.
36. **Kadik B. (1987) :** Contribution à l'étude du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en

Algérie : Ecologie dendrométrie morphologie. Alger, OPU: 580.

37. **Kerrache G., Labani, A., Benabdeli, K., Chafai, C. (2019):** Dynamique de la végétation forestière et impact des travaux du réaménagement forestier dans les monts de Daïa-Saïda (ouest Algérien). *Lebanese Science Journal*, 20: 230-247.
38. **Kherchouche D., Kalla M., Gutiérrez E.M., Attalah S., Bouzghaia M. (2012):** Impact of Droughts on *Cedrus atlantica* Forests Dieback in the Aures (Algeria). *Journal of Life Sciences*, 6: 1262-1269.
39. **Koull N., Helimi S., Mihoub A., Mokhtari S., Kherraze M. E., Hani Amir Aouissi H. A. (2022):** Developing a Land Suitability Model for Cereals in the Algerian Sahara Using GIS and Hierarchical Multicriteria Analysis. *International Journal of Agriculture and Natural Resources*, 49(1): 36-50.
40. **Kumar V.S. (2006):** Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of Operational Research*, 48: 77–80.
41. **Lyu F.Z., Luo H.J., Lyu Y. (2015):** Study on forestland quality indexes and their application. *Journal of Forest and Environment*, 35: 87–91.
42. **Meddour-Sahar, O., & Derridj, A. (2012) :** Bilan des feux de forêts en Algérie Analyse spatiotemporelle et cartographie du risque (période 1985-2010). *Sécheresse*, 23, 133-141.
43. **Merabtene M.D., Faraoun F., Mlih R., Djellouli R., Latreche A., Bol R. (2021):** Forest Soil Organic Carbon Stocks of Tessala Mount in North-West Algeria – Preliminary Estimates. *Frontiers in Environmental Science*, 8 (520284): 1-9.
44. **Mihi A., Ghazela R., Wissal D. (2022) :** Mapping potential desertification-prone areas in North-Eastern Algeria using logistic regression model, GIS, and remote sensing techniques. *Environ Earth Sci* 81, 385. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10513-7>
45. **Quézel P. et Barbero M. (1981).** Contribution à l'étude des formations pré-steppe à Genévriers au Maroc. *Bol. Soc. Bot, ser. 2*, 1137-1160.
46. **Quézel P., (2000) :** Taxonomy and biogeography of Mediterranean pines (*Pinus halepensis* and *P. brutia*). In: Ne'eman G. and Trabaud L. (Eds.), *Ecology, Biogeography, and Management of Pinus halepensis and P. brutia Forest Ecosystems in the Mediterranean basin*. Backhuys Publishers, Leiden, pp. 1–12.
47. **Quezel, P., & Barbero, M. (1990) :** Les forêts méditerranéennes problèmes posés par leur signification historique, écologique et leur conservation. *Acta Botanica Malacitana*, 15, 145–178. <https://doi.org/10.24310/abm.v15i.9300>
48. **Rabhi K., Bentouati A. et Sghaier T. (2023):** Effet de la sylviculture sur les

potentialités de production du Pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) dans l'Aurès algérien. Établissement de tables de production pour deux itinéraires sylvicoles. Revue forestière française, 74(1), 45-62.

49. **Rabhi K., et Bentouati A. (2023):** La Sylviculture préventive: prévenir le risque d'incendie et valoriser la ressource forestière. Cas du pin d'Alep dans l'Aurès. Ann. Rech. For. Algérie 2023, 13(01): 1-4.
50. **Rahmani S., Benmessaoud H. (2019):** Modélisation et cartographie du risque incendie de forêt dans la partie orientale des Aures (Algérie). Forêt méditerranéenne, T. XL (4) : 435-446.
51. **Ramade F. (1997):** Conservation des écosystèmes Méditerranéens : Enjeux et perspectives. Les fascicules du plan bleu 3. Rome, Programme des Nations Unies Pour L'environnement, Economica: 189. (in French)
52. **Saaty T.L. (1980):** The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resources Allocation. 2nd Edition. London, McGraw-Hill: 287.
53. **Saaty, T. L. (2008) :** Decision making with the analytic hierarchy process. International journal of services sciences, 1(1), 83-98. <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>
54. **Schoenenberger (1970a):** Catalogue des espèces vasculaires des massifs forestiers des Beni-Imloul, Chélia, Belezma et S'gag (Aurès). 1st Edition. Alger, CRBT/ONRS: 30p. (in French)
55. **Schoenenberger (1970b):** Etude du couvert forestier de l'Aurès oriental : Tendances évolutive de ce peuplement. 1st Edition. Constantine, F.A.O. Projet Algérie 15: 42. (in French)
56. **U.N.G.A. (2017) :** United Nations strategic plan for forests 2017-2030 and quadrennial programme of work of the United Nations Forum on Forests for the period 2017-2020. United Nations General Assembly New York, USA.
57. **Wang L., Zhou Y., Li Q., Zuo Q., Gao H., Liu J., Tian Y. (2021):** Forest Land Quality Evaluation and the Protection Zoning of Subtropical Humid Evergreen Broadleaf Forest Region Based on the PSO-TOPSIS Model and the Local Indicator of Spatial Association: A Case Study of Hefeng County, Hubei Province, China. Forests, 12(325): 1-25.
58. **Wang Z., Li K.W., Xu J. (2011):** A Mathematical programming approach to multi-attribute decision making with interval-valued intuitionistic fuzzy assessment information. Expert Systems with Applications, 38: 12462–12469.

59. **Xia X., Sun Y., Wu K., Jiang Q. (2016):** Optimization of a straw ring-die briquetting process combined analytic hierarchy process and grey correlation analysis method. *Fuel Processing Technology*, 152: 303–309.
60. **Ye J. (2010):** Multicriteria fuzzy decision-making method using entropy weights-based correlation coefficients of interval-valued intuitionistic fuzzy sets. *Applied Mathematical Modelling*, 34: 3864–3870. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.03.025>
61. **Yu K.Y., Liu J., Lai R.W., Yang Z.Q., Wei Q.G. (2009):** Chinese fir commercial forests forestland productivity in Minjiang watershed based on 3S technologies. *Journal of Forest and Environment*, 29: 326–331.
62. **Zhang Z.Y., Liu P.J., Tang X.M. (2017):** Evaluation of forest land quality based on rough set and C5.0 decision tree. *Journal of Northwest A & F University - Natural Science Edition*, 45: 96–102.

Other sources:

1. AL.O.S. (2021): <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/data/index.htm/>, accessed on 13/11/2021.
2. I.S.D.A. (2021): <https://isda-africa.com/isdasoil/>, accessed on 13/11/2021. (ISDA : Innovative Solutions for Decision Agriculture).
3. NASA-PCDM(2021): <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>, accessed on 13/11/2021.
4. I.N.C.T. Algiers (Institut national de cartographie et de télédétection) 2014.

Résumé

Cette thèse repose sur l'établissement d'un indice d'évaluation de la qualité des stations forestières (FSQI) en utilisant la méthode du processus d'analyse hiérarchique (AHP). Huit indicateurs issus de deux dimensions, la topographie et les conditions du sol, ont été sélectionnés pour cette évaluation. Les résultats de l'analyse ont révélé que la qualité des stations forestières était généralement de niveau moyen, avec une variation significative d'un endroit à l'autre dans la zone d'étude. L'indice de qualité des stations forestières a été calculé et présentait une moyenne de $2,555 \pm 0,257$, avec une gamme de 1,640 à 3,148. Les stations forestières de plus haute qualité étaient principalement situées dans les régions montagneuses du nord, tandis que celles de plus basse qualité se trouvent dans les régions montagneuses du sud.

En outre, une autre partie de cette thèse s'est penchée sur la caractérisation des peuplements forestiers dans la région d'Ouled Yagoub. Une enquête expérimentale basée sur un échantillonnage subjectif a été menée, couvrant une superficie de 2637 hectares répartis sur 16 parcelles. Les résultats de cette étude ont permis de définir dix types différents de peuplements forestiers, fournissant ainsi une base pour le développement d'un modèle de gestion forestière raisonnée.

Enfin, la thèse aborde également les changements dans l'occupation du sol avant et après un incendie majeur qui a frappé la forêt d'Ouled Yagoub en 2021. À l'aide de données de télédétection, notamment des images satellitaires Sentinel 2A, une classification supervisée des sols a été réalisée avant l'incendie, suivie de la cartographie des zones brûlées après l'incendie à l'aide de l'indice des zones brûlées (BAI). Les résultats ont montré que les futaies de pin d'Alep étaient les plus touchées par l'incendie, suivies d'autres formations forestières, tandis que les sols nus et les terres agricoles ont été épargnés.

Cette analyse diachronique a conduit à des recommandations spécifiques pour la gestion et la restauration des différents types d'occupation du sol touchés par l'incendie, avec pour objectif la récupération des écosystèmes affectés et la réduction des risques d'incendies futurs dans la région d'Ouled Yagoub.

Mots clés : qualité, stations forestières, typologie, peuplements, SIG, AHP, télédétection.

Abstract

This thesis is based on the creation of a Forest Site Quality Index (FSQI) using the Analytical Hierarchy Process (AHP) method. Eight indicators from two dimensions, topography and soil conditions, were selected for this assessment. The analysis results revealed that the quality of forest sites generally ranged from moderate, with significant variation from one location to another within the study area. The Forest Site Quality Index was calculated and had an average of 2.555 ± 0.257 SD, with a range of 1.640 to 3.148. Higher-quality forest sites were primarily located in the northern mountainous regions, while lower-quality sites were situated in the southern mountainous areas.

Furthermore, another part of this thesis focused on characterizing forest stands in the Ouled Yagoub region. An experimental survey based on subjective sampling was conducted, covering an area of 2637 hectares divided into 16 forest compartments. The results of this study identified ten different types of forest stands, providing a basis for the development of a rational forest management model.

Finally, the thesis also addresses changes in land use before and after a major fire that struck the Ouled Yagoub forest in 2021. Using remote sensing data, including Sentinel 2A satellite images, a supervised classification of land cover was carried out before the fire, followed by mapping of burned areas using the Burned Area Index (BAI). The results indicated that Aleppo pine forests were the most affected by the fire, followed by other forest formations, while bare soil and agricultural land were spared.

This diachronic analysis led to specific recommendations for the management and restoration of various land cover types affected by the fire, with the goal of recovering the impacted ecosystems and reducing the risk of future wildfires in the Ouled Yagoub region.

Keywords: quality, forest sites, typology, stands, GIS, AHP, remote sensing.

ملخص

تعتمد هذه الرسالة على إنشاء مؤشر جودة المواقع الغابية (FSQI) باستخدام أسلوب تحليل الهرم التحليلي (AHP). تم اختيار ثمانية مؤشرات من بعدين لهذا التقييم ، التضاريس وظروف التربة. أظهرت نتائج التحليل أن جودة المواقع الغابية تتراوح عمومًا من المتوسطة، مع اختلاف كبير من مكان إلى آخر ضمن منطقة الدراسة. تم حساب مؤشر جودة المواقع الغابية وكان متوسطه 2.555 ± 0.257 SD ، مع نطاق من 1.640 إلى 3.148. وجد أن المواقع الغابية عالية الجودة تقع في الغالب في المناطق المرتفعة الجبلية الشمالية، بينما توجد المواقع ذات الجودة المنخفضة في المناطق الجبلية المنخفضة الجنوبية.

علاوة على ذلك، ركز جزء آخر من هذه الرسالة على توصيف أوضاع الغابات في منطقة أولاد يعقوب. تم إجراء جرد تجريبي استنادًا إلى أخذ عينات ذاتية التقدير، والذي شمل مساحة تبلغ 2637 هكتارًا مقسمة إلى 16 قطعة غابية. أظهرت نتائج هذه الدراسة تحديد عشرة أنواع مختلفة من الغابات، مما قدم أساسًا لتطوير نموذج إدارة غابية منطقية ومستدامة.

وأخيرًا، تتناول الرسالة أيضًا التغيرات في استخدام الأراضي قبل وبعد حريق كبير ضرب غابة أولاد يعقوب في عام 2021. باستخدام بيانات الاستشعار عن بعد، بما في ذلك صور الأقمار الصناعية Sentinel 2A ، تم إجراء تصنيف موجه لتغطية الأراضي قبل الحريق، تلاها رسم خرائط للمناطق المحترقة باستخدام مؤشر المناطق المحترقة (BAI) أشارت النتائج إلى أن غابات الصنوبر الحلبي تأثرت أكثر بالحريق، تليها تكوينات غابية أخرى، في حين لم تتضرر التربة العارية والأراضي الزراعية.

أدت هذه التحليلات الزمنية إلى تقديم توصيات محددة لإدارة واستعادة مختلف أنواع استخدام الأراضي المتأثرة بالحريق، بهدف استعادة النظم البيئية المتأثرة وتقليل مخاطر الحرائق المستقبلية في منطقة أولاد يعقوب.

الكلمات الرئيسية: الجودة، المواقع الغابية، التصنيف، الأوضاع، نظام المعلومات الجغرافية، AHP، الاستشعار عن بعد.