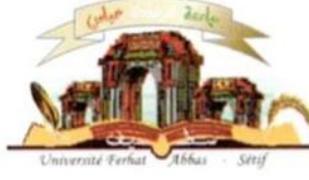


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Université Ferhat Abbas Sétif 1  
Faculté des Sciences de la  
Nature et de la Vie



جامعة فرحات عباس، سطيف 1  
كلية علوم الطبيعة و الحياة

DEPARTEMENT DE BIOLOGIE ET ECOLOGIE VEGETALE

## THÈSE

N°...../SNV/2024

Présenté par

**GHARBI HANANE**

Pour l'obtention du diplôme de

**DOCTORAT 3ème CYCLE**

**Filière :** Ecologie et environnement

**Spécialité :** Ecologie des milieux naturels

## THÈME

**Dynamique spatio-temporelle de la phytodiversité des  
écosystèmes semi-arides : Conservation et aménagement sur  
des bases écologiques et socio-économiques**

Soutenue publiquement le 08 / 02 / 2024

**Devant le jury :**

Président	FENNI Mohamed	Pr. Univ. Ferhat Abbas Sétif 1
Directrice de thèse	CHERMAT Sabah	Pr. Univ. Ferhat Abbas Sétif 1
Examineurs	REBBAS Khellaf	Pr. Univ. Mohamed Boudiaf M'sila
	BOUNAR Rabah	Pr. Univ. Mohamed Boudiaf M'sila
	GHADBANE Mouloud	Pr. Univ. Mohamed Boudiaf M'sila
	BELDJAZIA Amina	MCA. Univ. Ferhat Abbas Sétif 1

Laboratoire : PUVIT

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



## Remerciements

---

Je remercie **ALLAH**, le tout puissant, pour m'avoir donné la force et la patience.

Je tiens, tout d'abord, à remercier **Mme CHERMAT Sabah, professeur à l'université de Sétif 1**, d'avoir accepté de diriger cette thèse malgré ses multiples tâches. Merci de m'avoir donné la liberté de suivre mes propres idées pour élaborer cette thèse. Les mots ne suffisent pas pour vous exprimer ma gratitude. Merci pour votre disponibilité, votre intégrité, votre encouragement, votre confiance et votre précieux soutien tout au long de cette recherche.

J'adresse mes sincères remerciements et ma très vive gratitude à **M. FENNI Mohamed, professeur à l'université de Sétif 1**, pour avoir accepté de présider le jury.

J'exprime aussi ma reconnaissance à **Mme BELDJAZIA Amina, MCA à l'université de Sétif 1**, **M. BOUNAR Rabah, professeur à l'université de M'sila**, **M. REBBAS Khallel, professeur à l'université de M'sila**, et **M. GHADBANE Mouloud, professeur à l'université de M'sila**, pour avoir accepté d'examiner cette thèse, de m'avoir fait part de leurs remarques afin d'améliorer mon manuscrit et de faire partie de mon jury. C'est un très grand honneur d'avoir pu faire vos connaissances et de pouvoir aujourd'hui vous soumettre mon travail.

Je suis très reconnaissante à **M. ARFA Azzedine Mohamed Toufik** et **M. GANA Mohamed**. Ils m'ont initiée à la cartographie et aux logiciels de SIG et de télédétection. Ce travail n'existerait pas sans votre appui technique. Je vous remercie pour votre investissement et disponibilité qui m'ont conduit à la réalisation de cette thèse.

Un grand merci à la conservation des forêts de Sétif et de la circonscription de Ain-Oulmen. J'exprime ma gratitude plus particulièrement à **M. LAZAZEGA Nacer** pour sa disponibilité tout au long de ma thèse et leurs judicieux conseils qui m'ont été très utiles pour la bonne réussite de cette thèse., à **M. ZERROUG, M. SAHNOUNE, M. Halim, M. Zaki** et tous les forestiers pour m'avoir facilité l'accès et le travail sur le terrain et de m'avoir fourni toutes les données dont j'avais besoin.

C'est un grand merci que j'adresse à **M. ALATOU Djamel** et **M. MELIANI Aziz** pour leur précieuse aide, leurs conseils, encouragements, gentillesse et soutien moral.

Merci à tout le staff administratif et pédagogique du département de biologie et écologie végétale de l'université de Ferhat Abbas -Sétif 1- et de Constantine1.

Je remercie mes perles précieuses, mes plus chères **Mère** et **Père**, ma raison d'être pour leur confiance, amour, générosité, patience et pour leur soutien sans faille.

Je remercie chaleureusement mon grand-père **Barket**, qui n'est plus parmi nous, mais il m'a beaucoup soutenu.

Je tiens à remercier ma chère sœur **Ibtissem**, mes chers frères, spécifiquement **Chouaib**, ma chère tante **Fakia**, mes amies et mes collègues, spécifiquement **Maroua**. Merci d'avoir existés dans ma vie. Notamment pendant les moments les plus difficiles, où je me sentais livrée à moi-même et découragée. Merci de m'avoir apporté beaucoup de réconfort.

Merci à toute personne qui, de près ou de loin, a aidé pour que ce travail s'accomplisse.

## *Dédicace* ♥

---

Avec tous mes sentiments de respect, je dédie ce modeste travail à toutes les personnes que j'aime et en particulier :

**Mon paradis, ma source d'amour, de joie et du bonheur, le fil d'espoir qui allume mon chemin, ma moitié et ma lune, MAMAN ;**

**Ma source de vie et d'affection, celui qui m'a fait une femme, mon support qui était toujours à mes côtés pour me soutenir et m'encourager, à mon roi PAPA ;**

**Mon plus cher grand-père Barakat et mon oncle Mohamed (Qu'Allah les accueille dans sa miséricorde) ;**

**Ma chère encadrante Mme Chermat Sabah ;**

**Ma chère sœur IBTISSEM qui n'a pas cessé de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études ;**

**Mes chers frères pour l'amour qu'ils me réservent ;**

**Mes chères nièces Takoua et Racha et mes chers neveux Dhia Eddine et Abd El-Rahmene;**

**Ma chère tante Fakia et sa petite famille ;**

**Membres du groupe coranique Tadj El Ouakar et en particulier la chère responsable Ismahane, mes chères enseignantes Sabrina et Ibtissem et ma chère Salima ;**

**Ma belle-sœur Yasmine, mes amies, en particulier Maroua, et mes collègues ;**

**La famille Gharbi et Boukhalfa ;**

**L'inconnu qui cherchera ma thèse dans le futur ;**

**Je vous dédie mes salutations, mes recherches et mes connaissances ;**

**Je vous donne le fruit de mes études, afin qu'il soit une graine pour votre projet ;**

**Mes enseignants du cycle primaire, moyen, secondaire, universitaire et tous ceux qui m'estiment.**

## ملخص

يعتبر تغيير المناظر الطبيعية في المناطق شبه القاحلة أحد الأبعاد البيئية الأكثر إثارة للقلق. في هضاب سطيف العليا، أصبح تدهور الغطاء النباتي كارثيًا في السنوات الأخيرة. فالسلاسل الجبلية مهددة بإزالة الغابات والحرائق والتصحر ومن اللازم ضمان المتابعة النوعية والكمية لتطور الغطاء النباتي. كما أن دراسة المناخ وديناميكيات النباتات والتنوع النباتي ضرورية لاستكمال دراستنا. وقد أتاح لنا تطبيق المنهجية المطورة لنظام المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد دراسة التطور المكاني والزمني للغطاء النباتي (بين 1996 و2020)، للبيئة المادية وللعوامل المناخية. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها تراجعًا في التكوينات شبه الغابية والغابية لجبل يوسف وجبل بوطالب لصالح الغطاء النباتي الخفيف نحو الأراضي المتدهورة أو العارية. يرجع هذا الانخفاض إلى التأثير المشترك لتغيرات التساقط والحرائق المتكررة والرعي المفرط وقطع الأشجار بشكل غير قانوني. على مدى 24 عامًا، سجلت نباتات جبل يوسف رصيدًا سلبيًا إجماليًا بانخفاض قدره 314.2 هكتار أو 22.6%. وينطبق الشيء نفسه على جبل بوطالب، الذي سجل خسارة قدرها 5517.1 هكتار أو 18.2% من إجمالي المساحة. ستستخدم ونتيح الطبقات الجغرافية المخزنة في قاعدة بيانات جغرافية كأساس للمعلومات اللازمة للإدارة البيئية المستدامة.

## الكلمات المفتاحية

نظم المعلومات الجغرافية. الاستشعار عن بعد. الغطاء النباتي. التغيرات المكانية والزمانية. هضاب سطيف العليا.

## Résumé

L'altération des paysages des régions semi-arides constitue une des dimensions environnementales les plus préoccupantes. Dans les Hautes Plaines Sétifiennes, la dégradation du couvert végétal a pris une ampleur catastrophique ces dernières années. Les massifs montagneux sont menacés par déforestation, incendies et de désertifications. Il est utile d'assurer le suivi qualitatif et quantitatif de l'évolution du tapis végétale. Cependant les études climatiques globaux, la phyto-dynamique et la phytodiversité sont d'une aide précieuse pour compléter notre étude. L'application de la méthodologie développée du Système d'information géographique et de la télédétection, nous a permis d'étudier l'évolution spatio-temporelle du couvert végétal (entre 1996 et 2020), de caractériser le milieu physique et les paramètres climatiques. Les résultats obtenus ont révélé une régression des formations pré-forestières et forestières de Djebel Youssef et Djebel Boutaleb en faveur de végétation claire, dégradées voir des terrains nus. La régression enregistrée au niveau de ces deux massifs est sous l'effet combiné de la variabilité pluviométrique, des feux répétées, du surpâturage et de la coupe illicite du bois. Sur une période de 24ans, la végétation de Djebel Youssef a enregistré un bilan global négatif avec une régression de 314,2 ha soit 22,6%. Même constat pour Djebel Boutaleb qui a enregistré une perte de 5517,1 ha soit 18,2% de la surface totale du massif. Les couches thématiques stockées dans une base de données géographique produite au cours de ce travail, permettent aux gestionnaires et aux décideurs de protéger et aménager le secteur étudié. Ces analyses serviront comme une base d'information nécessaire pour la gestion durable de l'environnement.

### **Mots clés :**

SIG, Télédétection, Couvert végétal, Dynamique spatio-temporelle, Hautes Plaines Sétifiennes.

## **Abstract**

One of the most worrying environmental dimensions is the alteration of landscapes in semi-arid regions. In the High Setifian Plains, the degradation of the vegetation cover has become catastrophic in recent years. Mountain ranges are threatened by deforestation, fires and desertification. It is useful to follow up qualitatively and quantitatively the evolution of the vegetation cover. However, global climate studies, phyto-dynamics and phytodiversity are invaluable to complement our study. The application of the developed methodology of the Geographic Information System and remote sensing allowed us to study the spatial and temporal evolution of the vegetation cover (between 1996 and 2020), to characterize the physical environment and the climatic parameters. The results obtained showed a regression of the pre-forest and forest formations of Djebel Youssef and Djebel Boutaleb in favor of clear vegetation, degraded to bare land. The decline in these two massifs is due to the combined effect of rainfall variability, repeated fires, overgrazing and illegal logging. Over a period of 24 years, the vegetation of Djebel Youssef recorded an overall negative balance with a decrease of 314.2 ha or 22.6%. Same result for Djebel Boutaleb who recorded a loss of 5517.1 ha or 18.2% of the total area of the massif. The thematic layers stored in a geographical database produced during this work, allow managers and decision-makers to protect and adapt the area under study. These analyses will serve as a basis for information needed for sustainable environmental management.

### **Key words :**

GIS, Remote Sensing, plant cover, Spatio-temporal dynamics, High Setifian Plains.

## Liste des abréviations

**2D** : 2 Dimensions.

**3D** : 3 Dimensions.

**BV** : Biovolume.

**CCs** : Changements climatiques.

**CCT** : Centre Canadien de Télédétection.

**CEMAGREF** : Centre national du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et des forêts.

**DEM** : Digital Elevation Model.

**DFCI** : Défense des Forêts Contre l'Incendie.

**ENVI** : ENvironment for Visualizing Images.

**ESRI** : Environmental Systems Research Institute.

**FAO** : Food and Agriculture Organisation.

**GEOTIFF** : Georeferenced Tagged Image File Format.

**GPS** : Global Positioning System.

**GRID** : Grille Informatique.

**HR** : haute résolution.

**IC** : Indice de Continentalité.

**IDF** : Indice de Départ de Feux.

**IDL** : Interactive Data Language.

**IRF** : Indice de Risque de Feux.

**IR** : Infrarouge.

**IRM** : infrarouge moyen.

**IRT** : IR thermique.

**M, Tmax** : moyenne de température maximale du mois le plus chaud.

**m, Tmin** : moyenne de température minimale du mois le plus froid.

**MNE** : Modèle Numérique d'élévation.

**MNT** : Modèle Numérique de Terrain.

**NASA** : National Aeronautics and Space Administration.

**NDVI** : Normalized Difference Vegetation Index.

**NOAA** : National Oceanic and Atmospheric Administration.

**PAR** : Photosynthetically Active Radiation.

**SIG** : Système de l'Information Géographique.

**SRTM** : Shuttle Radar Topography Mission.

**Tmoy** : moyenne mensuelle de la température moyenne.

**THR** : très haute résolution.

**TIN** : Triangular Irregular Network.

**TM** : Thematic Mapper.

**TPF** : Tranchées Pare-feux.

**UNESCO** : United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

**USGS** : United State Geological survey.

**WGS 84** : World Geodetic System 1984.

## Liste des figures

Figure	Titre	Page
01	Processus de la télédétection.	14
02	Spectre électromagnétique.	15
03	Les différentes résolutions spatiales.	20
04	Variations de la signature spectrale en fonction de l'état physiologique de la végétation.	22
05	Réflexion d'une végétation saine et végétation stressée.	23
06	L'étude de la végétation par la télédétection.	25
07	Les types de données géographiques (raster/vecteur).	28
08	La différence entre MNT et MNE.	29
09	Localisation géographique de Djebel Boutaleb.	34
10	Carte des classes et d'exposition des pentes de Djebel Boutaleb.	35
11	Carte de réseau hydrographique de Djebel Boutaleb.	36
12	Carte des grands bassins versants de Djebel Boutaleb.	36
13	Carte des sous bassins versants de Djebel Boutaleb.	37
14	Carte de visibilité du massif forestier de Boutaleb.	37
15	Carte de la quantité du rayonnement solaire annuel de Djebel Boutaleb.	38
16	Carte géologique de Djebel Boutaleb.	39
17	Les grands types de sols de Djebel Boutaleb.	41
18	Localisation géographique de Djebel Youssef.	43
19	Carte des classes et d'exposition des pentes de Djebel Boutaleb.	44
20	Carte de réseau hydrographique de Djebel Youssef.	45
21	Carte des grands bassins versants de Djebel Boutaleb.	45
22	Carte des sous bassins versants de Djebel Boutaleb.	45
23	La quantité du rayonnement solaire annuel de Djebel Youssef.	46
24	Carte géologique de Djebel Youssef.	46
25	Moyennes des précipitations annuelles en mm (1985 -2009).	49
26	Régimes saisonniers des précipitations de la wilaya de Sétif (1984-2018).	50

27	Nombre de jours de neige (station de Sétif) (1985-2009).	51
28	Nombre de jours moyen des gelées (1985-2009).	53
29	Fréquences des vents (Rose des vents).	54
30	Moyennes des précipitations mensuelles des deux massifs (1984-2018).	56
31	Moyennes des précipitations mensuelles des deux massifs (1984-2018) en moyenne altitude.	57
32	Carte des précipitations annuelles de Djebel Boutaleb (1970 – 2000).	58
33	Carte des précipitations annuelles de Djebel Boutaleb (1970 – 2000).	59
34	Régimes saisonniers des précipitations de Dj. Boutaleb et Dj. Youssef (1984-2018).	59
35	Carte de la moyenne de maxima de températures du mois le plus chaud de Djebel Youssef.	62
36	Carte de la moyenne de minima de températures du mois le plus chaud de Djebel Youssef.	62
37	Carte de la moyenne de maxima de températures du mois le plus chaud de Djebel Boutaleb.	63
38	Carte de la moyenne de minima de températures du mois le plus chaud de Djebel Boutaleb.	63
39	Vitesse moyenne du vent dans le massif de Boutaleb (1970-2000).	64
40	Vitesse moyenne du vent dans le massif de Boutaleb (1970-2000).	64
41	Quotient pluviothermique (Q2) de Djebel Youssef (1970-200).	68
42	Quotient pluviothermique (Q2) de Djebel Boutaleb (1970-200).	68
43	Comparaison entre la résolution spatiale d'une image THR et Landsat-8 OLI.	73
44	Le versant Nord-Ouest de Djebel Youssef de l'année 1996.	74
45	Téléchargement des images satellites avec Sas Planet.	77
46	La digitalisation avec l'outil Editor dans le logiciel ArcMap (cas de Djebel Youssef).	78
47	Exemple de localisation des zones "teste" de Djebel Boutaleb (image Landsat de 08 août 2020).	83

48	Analyse topographique de feux de forêts entre (1982-2020).	86
49	Modèle d'analyse des feux de forêts par type de formations forestières (1982-2020).	87
50	Modèle d'analyse des feux de forêts en fonction d'occupation humaine et de pistes forestières.	87
51	Modèle de calcul de l'indice de combustibilité de Djebel Boutaleb.	90
52	Occupation du sol de Djebel Boutaleb.	92
53	Occupation du sol de Djebel Youssef.	92
54	La forêt de <i>Pinus halepensis</i> Mill.	94
55	La forêt de <i>Cedrus atlantica</i> Manetti.	94
56	Matorral de <i>Quercus ilex</i> L., / Mélange de <i>Quercus ilex</i> L., <i>Pinus halepensis</i> Mill. et <i>Cedrus atlantica</i> Manetti.	95
57	<i>Juniperus oxycedrus</i> L., <i>Juniperus phoenicia</i> L., <i>Phillyrea angustifolia</i> (L.) Rouy., et <i>Acer monspessulanum</i> L.	96
58	<i>Pistacia lentiscus</i> L.	97
59	Formations basses de Djebel Boutaleb.	98
60	Quelques formations steppiques de Djebel Boutaleb.	99
61	<i>Thymaelea hirsuta</i> (L.) Endl., et <i>Calicotome spinosa</i> L.	100
62	Répartition de la végétation de Djebel Boutaleb.	102
63	Reboisement de <i>Pinus halepensis</i> Mill.	103
64	Carte de l'NDVI de Djebel Boutaleb en 1996, 2008 et 2020.	104
65	Carte d'occupation du sol de Djebel Boutaleb en 1996.	105
66	Carte d'occupation du sol de Djebel Boutaleb en 2008.	106
67	Carte d'occupation du sol de Djebel Boutaleb en 2020.	106
68	Changements de l'occupation du sol de Djebel Boutaleb entre 1996 et 2008.	108
69	Répartition des différents types d'occupation du sol de Djebel Boutaleb en 2008 et en 2020.	109
70	Carte des changements de l'occupation du sol de Djebel Boutaleb entre 2008 et 2020.	110
71	Répartition des différents types d'occupation du sol de Djebel Boutaleb en 2008 et en 2020.	111

72	Changements de l'occupation du sol de Djebel Boutaleb entre 1996 et 2020.	112
73	Carte de l'NDVI de Djebel Boutaleb en 1996, 2008 et 2020.	114
74	Carte d'occupation du sol de Djebel Youssef en 1996.	114
75	Répartition des différents types d'occupation du sol de Djebel Youssef en 1996.	115
76	Carte d'occupation du sol de Djebel Youssef en 2008.	115
77	Répartition des différents types d'occupation du sol de Djebel Youssef en 2008.	115
78	Carte d'occupation du sol de Djebel Youssef en 2020.	116
79	Répartition des différents types d'occupation du sol de Djebel Youssef en 2008.	116
80	Carte des changements de l'occupation du sol de Djebel Youssef entre 1996 et 2008.	118
81	Répartition des différents types d'occupation du sol de Djebel Boutaleb en 1996 et en 2008.	118
82	Carte des changements de l'occupation du sol de Djebel Youssef entre 2008 et 2020.	119
83	Répartition des différents types d'occupation du sol de Djebel Boutaleb en 2008 et en 2022.	120
84	Carte des changements de l'occupation du sol de Djebel Youssef entre 1996 et 2020.	121
85	Les superficies de chaque classe d'occupation du sol en 1996, 2008 et 2020.	122
86	La surface parcourue par les feux vue par le satellite Landsat 8-OLI le 20-08-2020.	123
87	Effet du feu de forêts dans le massif de Djebel Boutaleb.	124
88	L'impact d'érosion sur la végétation de Djebel Boutaleb.	127
89	Balai de sorcière sur un pin d'Alep.	129
90	Sujets de pin d'Alep dépéris (Djebel Youssef), Symptômes de dépérissement de pin d'Alep.	130
91	Evolution des types biologiques sur djebel Youssef.	131
92	Les carrières de Djebel Youssef.	132

93	Fréquence horaire de feux de forêts de Djebel Boutaleb (1982-2020).	135
94	Fréquence mensuelle de feux de forêts de Djebel Boutaleb (1982-2020).	136
95	Fréquence annuelle de feux de forêts de Djebel Boutaleb (1982-2020).	136
96	Répartition du nombre de feux de forêts en fonction de l'altitude.	137
97	Répartition des surfaces de feux de forêts en fonction de l'altitude.	138
98	Répartition du nombre de feux de forêts en fonction des classes des pentes.	138
99	Répartition des surfaces de feux de forêts en fonction des classes des pentes.	139
100	Répartition du nombre de feux de forêts en fonction d'orientation des pentes.	139
101	Répartition des surfaces de feux de forêts en fonction d'orientation des pentes.	140
102	Répartition des surfaces de feux de forêts par type de formations forestières.	140
103	Répartition du nombre de feux de forêts en fonction de pistes forestières.	141
104	Répartition des surfaces des feux de forêts en fonction de pistes forestières.	141
105	Répartition de nombre de feux de forêts en fonction d'occupation humaine.	142
106	Répartition de surface de feux de forêts en fonction d'occupation humaine.	142
107	Carte de risque de départ de feux de forêts de Djebel Boutaleb.	143
108	Répartition du nombre de feux de forêts suivant les classes de risque IDF.	144
109	Echelle d'équivalence entre les valeurs de l'NDVI et du biovolume.	144
110	Carte du biovolume de Djebel Boutaleb.	145
111	Carte de risque de combustibilité de Djebel Boutaleb.	145

112	Répartition des niveaux du risque de combustibilité pour chaque formation forestière de Djebel Boutaleb.	146
113	Carte de Risque feux de forêt de Djebel Boutaleb.	147
114	Répartition du nombre de feux suivant les classes de risque IRF.	148
115	Schéma d'aménagement pour la gestion des feux de forêts de Djebel Boutaleb.	152

## Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
01	Domaines de la télédétection.	24
02	Les domaines d'application de SIG.	31
03	Les principaux Oueds de Djebel Boutaleb.	35
04	Caractéristiques de la station de Sétif (Ain Arnet).	48
05	Moyennes mensuelles de précipitations de Sétif (mm).	49
06	Moyennes mensuelles de la température de l'air dans la wilaya de Sétif.	51
07	Moyennes mensuelles de la température du sol.	52
08	Vitesses moyennes mensuelles du vent.	53
09	Humidité moyenne mensuelle – Sétif.	54
10	Coefficients de correction de la pluviométrie (Selon Seltzer 1946).	56
11	Coefficients de correction de la pluviométrie (Selon Chermat 1999).	57
12	Extrapolation des températures mensuelles de Djebel Youssef.	60
13	Extrapolation des températures mensuelles de Djebel Boutaleb.	60
14	Extrapolation des températures mensuelles de Djebel Boutaleb selon le gradient de Chermat (1999).	61
15	Extrapolation des températures mensuelles de Djebel Youssef selon le gradient de Chermat (1999).	61
16	Sous types de climat selon l'indice de continentalité de Rivas-Martinez (2002).	66
17	Les quotients pluviothermiques calculés pour les deux massifs	67
18	Caractéristiques générales des satellites Landsat.	71
19	Les bandes spectrales et leurs applications.	72
20	Caractéristiques des images Landsat utilisées dans le travail.	80

21	Répartition des formations végétales de Djebel Boutaleb en (ha) et (%).	102
22	Les indices de précisions de la classification des images Landsat pour la période (1996, 2008 et 2020).	107
23	Taux de changement d'occupation du sol de Djebel Boutaleb entre 1996 et 2008.	109
24	Changements de l'occupation du sol de Djebel Boutaleb entre 1996 et 2008.	109
25	Taux de changement d'occupation du sol de Djebel Boutaleb entre 2008 et 2020.	111
26	Taux de changement d'occupation du sol de Djebel Boutaleb entre 2008 et 2020.	111
27	Taux de changement d'occupation du sol de Djebel Boutaleb entre 1996 et 2020.	113
28	Changements de l'occupation du sol de Djebel Boutaleb entre 1996 et 2020.	113
29	Les indices de précisions de la classification des images Landsat pour la période (1996, 2008 et 2020).	117
30	Taux de changement d'occupation du sol de Djebel Youssef entre 1996 et 2008.	118
31	Changements de l'occupation du sol de Djebel Youssef entre 1996 et 2008.	119
32	Taux de changement d'occupation du sol de Djebel Youssef entre 2008 et 2020.	120
33	Changements de l'occupation du sol de Djebel Youssef entre 2008 et 2020.	120
34	Taux de changement d'occupation du sol de Djebel Youssef entre 1996 et 2020.	121
35	Changements de l'occupation du sol de Djebel Youssef entre 1996 et 2020.	122
36	Fréquence horaire de feux de forêts de Djebel Boutaleb (1982-2020).	135

37	Fréquence mensuelle de feux de forêts de Djebel Boutaleb (1982-2020).	136
38	Fréquence annuelle de feux de forêts de Djebel Boutaleb (1982-2020).	137

# Sommaire

Titre	Page
Introduction.	1
<b>Partie I : Synthèse bibliographique</b>	
<b>Chapitre I : Dynamique du couvert végétal</b>	
1. Utilité du couvert végétal.	4
2. Evolution du couvert végétal.	4
2-1. Notion de succession.	5
2-2. Séries évolutives.	5
3. Rôles de la flore et la végétation en Algérie.	6
4. Les causes de dégradation de la végétation en Algérie.	6
4-1. Changements climatiques.	6
4-2. Erosion et désertification.	7
4-3. Maladies et parasites.	8
4-4. Les actions anthropiques.	8
4-4-1. Le surpâturage.	8
4-4-2. Les incendies.	9
4-4-3. Les coupes du bois.	11
5. Impacts des changements du couvert végétal sur la biodiversité.	11
6. Le besoin d'un outil de suivi de l'évolution de la végétation.	12
<b>Chapitre II : Avantages des Outils géomatiques pour étudier la dynamique de la végétation</b>	
1. Apport de la géomatique.	13
2. Apport de la télédétection.	13
2-1. Définition de la télédétection.	13
2-2. La télédétection spatiale : rayonnement électromagnétique.	15
2-3. L'imagerie satellitaire.	15
2-3-1. Avantage des images satellitaires.	16

2-4. Type des données satellites.	17
2-4-1. Les données à haute résolution et très haute résolution spatiale.	17
2-4-2. Les données à basse résolution spatiale.	18
2-4-3. Les données à moyenne résolution spatiale.	19
2-5. Analyse des images.	20
2-5-1. Classification non supervisée.	21
2-5-2. Classification supervisée.	21
2-6. Signatures spectrales des principales surfaces naturelles.	21
2-6-1. Signature spectrale des sols.	21
2-6-2. Signature spectrale de la végétation.	22
2-7. Les indices de végétation.	22
2-7-1. Le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).	23
2-8. Domaine de la télédétection.	24
2-9. L'application de la télédétection pour l'étude de la végétation.	25
2-10. L'application de la télédétection dans le domaine de la foresterie.	25
3. L'apport de Système d'Information Géographique (SIG).	26
3-1. Définition du SIG.	26
3-2. Fonctions d'un SIG.	26
3-3. Architecture d'un SIG.	26
3-3-1. Composantes d'un SIG.	26
3-3-2. Les données géographiques (raster/vecteur).	27
3-3-3. Les conversions (Vecteur-raster ou vice-versa).	28
3-3-4. Les trois volets d'un SIG.	28
3-4. La troisième dimension.	29
3-4-1. Le modèle numérique de terrain (MNT).	29
3-4-2. Format de MNT.	30
3-4-3. Application du MNT dans la foresterie.	30
3-5. Les domaines d'application de SIG.	30
3-6. Application des SIG à la recherche environnementale.	31

3-7. Le SIG et la télédétection.	32
<b>Partie II : Matériel et méthodes</b>	
<b>Chapitre I : Contexte territorial de la zone d'étude</b>	
1. Cadre physiographique du site d'étude.	33
1-1. Djebel Boutaleb.	33
1-1-1. Situation géographique.	33
1-1-2. Relief.	33
1-1-3. Pente et exposition.	34
1-1-4. Réseau hydrographique et bassins versants.	35
1-1-5. La visibilité.	37
1-1-6. Rayonnement solaire.	38
1-1-7. Géologie.	38
1-1-8. Pédologie.	39
1-1-9. Flore et végétation.	41
1-1-10. Les étages de végétation.	41
1-2. Djebel Youssef.	42
1-2-1. Situation géographique.	42
1-2-2. Relief.	43
1-2-3. Pente et exposition.	43
1-2-4. Réseau hydrographique et bassins versant.	44
1-2-5. Rayonnements solaires.	46
1-2-6. Géologie.	46
1-2-7. Pédologie.	47
1-2-8. Flore et végétation.	47
1-2-9. Les étages de végétation.	47
2. Climat et bioclimat.	48
2-1. Caractéristiques et origine des données climatiques.	48
2-2. Régime pluviométrique.	48
2-2-1. Répartition spatiale de la pluviométrie.	49

2-2-2. Les régimes pluviométriques mensuels.	49
2-2-3. Régime pluviométrique saisonnier.	50
2-3. Enneigement.	50
2-4. Le régime thermique.	51
2-4-1. Température de l'air.	51
2-4-1. Température du sol.	52
2-5. Les gelées.	52
2-6. Le vent.	53
2-7. L'humidité.	54
2-8. Extrapolation des données pluviométrique et thermique.	55
2-8-1. La correction du gradient pluviométrique.	55
2-8-1-1. Moyennes des précipitations mensuelles des deux stations.	55
2-8-2. Modélisation des données de précipitations.	58
2-8-3. Détermination du régime pluviométrique saisonnier de Djebel Boutaleb et Djebel Youssef.	59
2-9. Extrapolations des données de températures.	60
2-10. Modélisation des données de température.	61
2-11. Modélisation des données du vent.	63
2-12. Synthèse bioclimatique.	65
2-12-1. Indice de continentalités simple de Rivas-Martinez 2002.	65
2-12-2. Diagramme ombrothermique de Bagnaules et Gausson (1957).	66
2-12-3. Le quotient pluviométrique d'Emberger (1930).	66
2-12-3-1. Modélisation des données du quotient pluviométrique.	67
<b>Chapitre II : Matériel et données utilisés</b>	
1. Les logiciels utilisés.	69
1-1. ArcGIS (10.2).	69
1-2. ENVI (5.1).	69
1-3. Google Earth.	69
1-4. Sas Planet.	69
2. Les Outils de Prospection.	70

2-1. L'appareil photos numérique.	70
2-2. Le G.P.S (Global Positioning System).	70
3. Les données utilisées.	70
3-1. Les images satellites.	70
3-2. Les images à Très Haute Résolution (Google Earth).	72
3-3. Le Modèle Numérique de Terrain (MNT).	73
3-4. Les photographies aériennes.	74
3-5. La base de données climatique WorldClim.	74
<b>Chapitre III : Approche méthodologique</b>	
1. Traitement de Modèle Numérique de Terrain (MNT).	76
2. Modélisation des données climatique.	76
3. Traitement des images THR.	77
3-1. Acquisition des images THR.	77
3-2. La digitalisation.	77
3-2-1. Carte d'occupation du sol.	78
3-2-2. Pistes forestières.	78
3-2-3. Réseau de défense des forêts contre les incendies (DFCI).	79
3-3. L'analyse visuelle.	79
4. Traitement des images satellitaires.	79
4-1. Critères de choix et acquisition des images satellitaires.	79
4-2. Prétraitement des images Landsat.	80
4-2-1. La correction atmosphérique et géométrique.	80
4-2-2. La composition colorée.	80
4-2-3. Calcul de l'NDVI.	81
4-3. Traitement des images.	81
4-4. Acquisition de données terrain.	82
4-5. Validation de la classification.	83
4-6. Cartographie des changements.	85
5. Gestion des feux de forêts.	85

5-1. Analyse temporelle.	86
5-2. Analyse topographique.	86
5-3. Analyse des feux de forêts par type de formations forestières.	86
5-4. Analyse spatiale des feux de forêts en fonction d'occupation humaine et de pistes forestières.	87
5-5. Modélisation du risque de départ de feux.	87
5-6. Modélisation de la combustibilité.	88
5-7. Modélisation du risque feux de forêts de Djebel Boutaleb.	90
5-8. Analyse de l'efficacité du réseau DFCI face aux incendies.	90
<b>Partie III : Résultats et discussion</b>	
1. Intégration des images THR pour la valorisation des ressources naturelles dans Djebel Boutaleb et Djebel Youssef.	91
1-1. Apport des images THR pour la cartographie détaillée de site d'étude.	91
1-2. Etude de la végétation.	93
1-2-1. Formations végétales de Djebel Boutaleb.	93
1-2-2. Formations végétales de Djebel Youssef.	99
1-2-3. Répartition géographique de la végétation naturelle de Djebel Boutaleb.	101
2. Dynamique spatio-temporelle de la végétation dans les massifs de Boutaleb et Youssef entre 1996 et 2020.	104
2-1. Djebel Boutaleb.	104
2-1-1. Évolution de l'activité chlorophyllienne aux trois dates.	104
2-1-2. L'état de l'occupation du sol en 1996, 2008 et 2020.	105
2-1-3. Validation de la classification.	106
2-1-4. Détection des changements.	108
2-2. Djebel Youssef.	113
2-2-1. Évolution de l'activité chlorophyllienne aux trois dates.	113
2-2-2. L'état de l'occupation du sol en 1996, 2008 et 2020.	114
2-2-3. Validation de la classification.	116
2-2-4. Détection des changements.	117
3. Discussion de la dynamique spatio-temporelle de la végétation dans les massifs de Boutaleb et Youssef entre 1996 et 2020.	123

4. Apport de SIG et de la télédétection dans la gestion des feux de forêts de Djebel Boutaleb.	134
4-1. Réseau de Défense des Forêts Contre les Incendies (D.F.C.I) de Djebel Boutaleb.	134
4-2. Localisation des départs de feux déclarés au niveau de Djebel Boutaleb entre 1982 et 2020.	134
4-3. Analyse temporelle des feux de forêts entre 1982 et 2020.	134
4-3-1. Fréquence horaire des feux de forêts.	134
4-3-2. Fréquence mensuelle des feux de forêts.	135
4-3-3. Fréquence annuelle des feux de forêts.	136
4-4. Analyse topographique de feux de forêts entre 1982 et 2020.	137
4-4-1. Classes d'altitude des feux de forêts.	137
4-4-2. Classes des pentes des feux de forêts.	138
4-4-3. Classes d'orientation des pentes des feux de forêts.	139
4-5. Analyse des feux de forêts par type de formations forestières entre 1982 et 2020.	140
4-6. Analyse spatiale des feux de forêts en fonction d'occupation humaine et de pistes forestières.	141
4-6-1. Analyse spatiale des feux de forêts en fonction de pistes forestières.	141
4-6-2. Analyse spatiale des feux de forêts en fonction d'occupation humaine.	142
4-7. Modélisation du risque de départ de feux au niveau de Djebel Boutaleb.	143
4-7-1. Carte de risque de départ de feux de forêts.	143
4-7-2. Modélisation de la combustibilité de Djebel Boutaleb.	144
4-7-3. Modélisation du risque feux de forêts de Djebel Boutaleb.	147
4-8. Analyse de l'efficacité du réseau DFCI face aux incendies.	148
5. Discussion de l'apport de SIG et de la télédétection dans la gestion des feux de forêts de Djebel Boutaleb.	150
Conclusion.	153

# INTRODUCTION

## **Introduction**

La problématique de la gestion des ressources forestières occupe une place centrale dans les débats sur l'environnement dans le monde (Solly *et al.*, 2020). De graves menaces pèsent sur la biodiversité soumise d'une part à l'effet des changements climatiques et d'autres part aux impacts des actions anthropiques (Sanda Gonda, 2010).

Les forêts algériennes, en général, et les Hautes plaines Sétifiennes, en particulier, ont subi, au cours du temps, de nombreuses agressions anthropiques qui menacent leur pérennité ; soit volontairement et par besoin, soit involontairement persuadés que les ressources qu'elles leur offrent sont inépuisables. Ces actions menacent souvent les ressources forestières et naturelles, soumises au surpâturage, à l'expansion de l'agriculture, aux incendies, à la déforestation, au défrichement et à la forte demande en bois. La multiplication et l'amplification de ces actions conduisent à la destruction du milieu forestier, accentuant ainsi les effets négatifs des facteurs naturels précités.

Cette agressivité multiforme, à l'origine de l'altération du paysage conduit les écosystèmes vulnérables à une menace permanente, menant parfois jusqu'à des situations d'irréversibilité lorsque les sols sont complètement érodés.

L'expression de la dynamique du couvert végétal forestier est évoquée pour désigner l'évolution spatiotemporelle du couvert végétal forestier, basée sur la variation spatiotemporelle de l'indice de Végétation (Zida, 2020).

La présente étude analyse l'évolution du couvert végétal de Djebel Boutaleb et Djebel Youssef et les facteurs responsables de leur dynamique. La télédétection et le système d'informations géographiques (SIG) constituent à cet égard un moyen efficace d'identification, de caractérisation et de suivi des changements paysagers. Ils permettent de couvrir une zone donnée en peu de temps, de réduire les coûts, de décrire visuellement une situation donnée et son évolution dans le temps, mais aussi d'évaluer rétrospectivement les changements afin de définir les politiques futures de l'aménagement et la préservation, en intégrant les données multi sources et créant une base de données géographique nécessaire à la cartographie des massifs pour faciliter leurs gestions (Pain-Orcet *et al.*, 1998 ; Solly, 2020).

Jusqu'au début des années 2000 et malgré son importance, le thème de "l'occupation et utilisation" du sol a été rarement traité dans les études en Algérie et surtout avec les moyens et les outils de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques (SIG).

Dans les Hautes Plaines Sétifiennes plusieurs travaux floristiques et de phytoécologie qui ont été réalisés sur le massif de Djebel Boutaleb, parmi lesquels on cite : celles de Le Houerou *et al.* (1975), Merikhi (1987, 1995), Madoui (1987, 1995), Sedjar (2012), Zerroug (2012, 2020) et Gharbi *et al.*, (2022). Concernant Djebel Youssef, nous citons l'étude phytosociologique et pastorale de Chermat (2013.a) et ses études diachroniques Chermat (2013.b et 2016) à travers l'analyse de l'évolution du couvert végétal et son dynamique régressive. Aucune étude spatio-temporelle n'a été conduite dans la région de Sétif jusqu'à présent en utilisant les systèmes d'information géographique et la télédétection spatiale.

Pour combler ces lacunes nos objectifs principaux dans cette thèse visent :

- La réalisation d'une étude spatiotemporelle de la dynamique de la végétation sur une longue période en répondant aux questions suivantes :
  - ↪ Et est-ce que les images Landsat ont la potentialité de révéler ces changements dans le temps et dans l'espace ?
  - ↪ Quels est l'apport du système d'informations géographiques et de la télédétection dans la gestion des massifs montagneux des Hautes plaines Sétifiennes ?
- Suivre la dynamique du couvert végétal forestier de Djebel Boutaleb et djebel Youssef sur une période de vingt-quatre ans allant de 1996 à 2020 par l'outil de la télédétection et SIG en utilisant des images Landsat.
  - ↪ La cartographie des paramètres du milieu physique et des cartes climatiques.
  - ↪ Evaluer la capacité des images satellitaires de très haute résolution (THR) pour l'extraction de certains aspects physiographiques tels que : La végétation, les routes, les pistes, les TPF, l'habitat rural et les carrières.

Pour mieux aborder les différents aspects de la problématique posée, notre étude s'articule autour de trois parties :

- ⇒ La première partie, avec deux chapitres, est consacrée aux notions et concepts de la dynamique du couvert végétal et l'apport des outils géomatiques.
- ⇒ La deuxième partie, subdivisée en trois chapitres, traite le contexte territorial de la zone d'étude, la méthodologie et les outils utilisés dans le traitement des données.

⇒ La troisième partie s'adresse principalement à l'examen des résultats obtenus et leurs discussions. Et à l'intégration des images THR pour la valorisation des ressources naturelles dans les Hautes Plaines Sétifiennes avec des réflexions de réhabilitation, de pratiques de conservation et de protection.

**PARTIE I : SYNTHÈSE  
BIBLIOGRAPHIQUE**

## **Chapitre I :**

### **Dynamique du couvert végétal**

## 1. Utilité du couvert végétal

Recouvrant une très grande partie des continents et premier maillon de la chaîne alimentaire en tant que producteur de matière organique, la végétation est un élément fondamental des écosystèmes terrestres. Les couverts végétaux régulent les échanges d'énergie et de matière à l'interface sol-végétation-atmosphère. Ils puisent l'eau et les éléments minéraux nécessaires à leur développement et leur croissance dans le sol et produisent l'oxygène, via le processus de photosynthèse, indispensable à la vie sur terre (Abdelbaki, 2012).

Le rayonnement solaire global, somme du rayonnement direct et diffus, est la quantité d'énergie solaire incidente à la surface de la terre pendant une période de temps donnée. Elle est intégrée sur tout le spectre solaire. Seul le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) dont les longueurs d'onde s'étendent de 400 nm à 700 nm est utilisé par les plantes pour leur croissance. Un paramètre habituel pour estimer l'état d'une plante est sa productivité, fonction à la fois du type de plante, de la fraction du rayonnement solaire incident, de la disponibilité en eau et de l'influence du climat régional (Abdelbaki, 2012).

## 2. Evolution du couvert végétal

On entend par « dynamisme de la végétation » les modifications et transformations survenues ou pouvant encore se manifester au sens de la végétation, transformations soit naturelles, soit dues à l'homme, tant dans le sens progressif (évolution) que dans les sens régressif (dégradations) (Saidi, 1984).

Les écosystèmes sont des systèmes dynamiques, c'est-à-dire en constante évolution et dont l'état est fonction du moment où il a été évalué (Nicolas *et al.*, 2013 ; Chang et Turner, 2001 ; Zida, 2020). Ils ne sont pas stables dans le temps et sont l'objet de variations périodiques ou continues à travers leurs communautés constituantes. Les premières reflètent généralement le rythme saisonnier des communautés, autrement dit leur phénologie, alors que les secondes traduisent plutôt l'évolution de la biocénose et de l'écosystème dans son ensemble vers des stades de complexité croissante (Lacoste et Salanon, 2001).

### 2-1. Notion de succession

La succession est un phénomène de colonisation d'un milieu par les êtres vivants et de changement de flore au cours du temps. C'est une caractéristique fondamentale des systèmes écologiques. Une observation même superficielle nous montre qu'un sol nu se couvre peu à peu de végétation et qu'un champ abandonné est progressivement envahi par des herbes, vivaces, puis par des arbustes et enfin par des arbres (Guinochet, 1973). Selon Mile (1979), la dynamique naturelle des groupements végétaux va généralement des structures simples vers des structures complexes. Selon Chenot, 2018, les communautés végétales évoluent dans le temps et des cycles naturels d'horizons variables apportent des modifications importantes dans les écosystèmes. En fonction des perturbations (internes et externes) et des facteurs abiotiques, elles font l'objet de successions végétales caractérisées par des pertes ou des gains d'espèces pouvant suivre des trajectoires multiples ; (Chang et Turner, 2019).

Les modèles de successions végétales ont été élaborés par Clements (1916) sous l'angle des changements qui s'opèrent dans un système écologique depuis un état initial jusqu'au stade ultime dit « climacique » (Marage, 2004). Ce processus de succession traduit une évolution générale de l'écosystème stationnel, dans sa structure et son fonctionnement, et équivaut finalement à une succession écologique globale (Lacoste et Salanon, 2001).

### 2-2. Séries évolutives

Selon Lacoste et Salanon (2001), l'évolution de la végétation représente dans un territoire donné, à travers le phénomène de succession, un processus à la fois ordonné et orienté, donc à caractère prévisible par une série de stades correspondant un échelonnement graduel des communautés. Le passage d'un stade à l'autre implique plusieurs phases.

Selon Guinochet (1973), les séries dynamiques sont constituées par l'enchaînement et la combinaison de différents stades ou de différents groupements jusqu'à l'état de maturité et d'équilibre. Elles sont formées de groupements initiaux ou pionniers, de groupements intermédiaires et d'un groupement final (climacique ou permanent). La série est progressive si elle tend vers le groupement climacique, elle est régressive si elle s'en éloigne.

### 3. Rôles de la flore et la végétation en Algérie

Vu les caractéristiques des écosystèmes algériens (fragilité, vulnérabilité, faible productivité), le couvert végétal joue un rôle essentiel de protection des milieux, de préservation des ressources ; un rôle sur la qualité de l'environnement, sur la recherche et les loisirs. Les forêts participent en amont et en aval à la protection des ressources hydrauliques (sources d'eau, bassins versants lieu d'implantation des ouvrages hydrauliques). Pour la préservation et la gestion de la biodiversité en Algérie, un ensemble d'aires protégées couvre 250.657 ha avec une couverture forestière de 172.201 ha, ces milieux protégés représentent aujourd'hui certains habitats remarquables (cédraies, chênaies caducifoliées, subéraies, zones humides, ...), ils devraient à moyen et long terme intégrer les habitats les plus représentatifs de tous les systèmes présents. Ces zones de protection sont également un lieu privilégié pour la promotion de la recherche et du tourisme. D'autres actions favorisant la création de nouvelles plantations autour et à l'intérieur des agglomérations contribuent à l'amélioration de la qualité de l'environnement urbain (ceinture verte, forêt urbaine, espaces verts, jardin public) (M.A.T.E., 2003).

### 4. Les causes de dégradation de la végétation en Algérie

Selon Blondel (1995), la quasi-totalité des forêts méditerranéennes ne doivent plus être considérées comme des forêts "naturelles" ou à plus forte raison "originelles" et ceci est due aux perturbations s'exerçant à grande ou petite échelle, qui sont déterminantes dans la dynamique forestière. Plusieurs causes de perturbations, qui opèrent à différentes échelles spatiotemporelles, sont distingués (Barbero *et al.*, 2001) :

#### 4-1. Changements climatiques

Selon Abdelguerfi et Ramdane (2003), les changements climatiques constituent l'une des contraintes majeures qui semblent affecter toute la planète. Ils se traduisent en Algérie par une tendance dominante à l'aggravation de la sécheresse dans tous les étages bioclimatiques du pays. En égard du caractère aride et semi-aride de son climat, l'Algérie ressentira davantage les effets des changements climatiques constituent une menace sévère sur les écosystèmes terrestres et par conséquent sur la biodiversité (Abdelbaki, 2012).

Selon le 5ème Rapport d'évaluation du GIEC (2015), le chêne liège (*Quercus suber* L.) est une espèce forestière feuillue autochtone, la plus représentée dans les forêts Algérienne et qui se trouve dans le massif de Boutaleb. Les peuplements de chêne liège connaissent une

dynamique régressive. Les causes sont multiples néanmoins, la sécheresse semble avoir joué un rôle important. Cette espèce dispose de capacités d'adaptation propres modérées associées à une résilience moyenne due à la vulnérabilité de son écosystème. Elle est, par suite, vulnérable à une variabilité climatique marquée, plus particulièrement à des épisodes secs prolongés et fréquents. De telles pressions climatiques, mais surtout anthropique, se traduisent par des difficultés de régénération et des risques de dépérissement.

D'après le même rapport, les faibles capacités d'adaptation propre ainsi que sa résilience limitée conjuguées à une forte exposition aux aléas climatiques font du Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti.) une espèce vulnérable aux changements climatiques. Cette vulnérabilité se manifeste essentiellement à travers le glissement des étages bioclimatiques algériens vers l'aride et les périodes de sécheresse prolongées. De même, les changements climatiques menacent d'accentuer la déforestation qui contribue à la dégradation de son habitat.

L'Alfa présente une forte tolérance à la variation de la température et des précipitations. De même elle dispose de fortes capacités d'adaptation propre. La régression observée des steppes alfatiques est probablement due à la désertification néanmoins, les CCs sont de nature à accentuer cette régression. Concernant l'habitat de l'Armoise herbe blanche, il se trouve menacé par les activités anthropiques ce qui accentuerait son exposition aux CCs.

#### **4-2. Erosion et désertification**

Une menace abiotique qui se présente, de manière plus visible, sous forme d'érosion éolienne et hydrique qui affecte le couvert végétal, démantèlent les sols et accélèrent le processus de désertification (Meribai, 2011).

Selon Nedjraoui et Bedrani (2008), la manifestation apparente de la désertification se traduit par une diminution de la couverture végétale et des potentialités des systèmes écologiques et une détérioration des sols et des ressources hydriques.

Par la désertification on entend une situation de dégradation des terres, liée au-delà de leur capacité de restauration, aggravée souvent par les fluctuations des conditions climatiques. La dégradation et la désertification commencent souvent par la réduction du couvert des plantes pérennes, dont la présence constitue une protection efficace et durable contre les agents érosifs (Chermat, 2013). Selon Benslimane *et al.*, 2008, plus de 75% des parcours steppiques du nord de l'Algérie sont désertifiés ou au seuil de la désertification.

### 4-3. Maladies et parasites

Ce sont les maladies qui touchent les végétaux et qui peuvent engendrer des pertes importantes au sein des peuplements.

D'après Arfa (2008), le dépérissement des forêts par l'attaque de parasites touche essentiellement le pin d'Alep mais aussi d'autres essences telles que le cèdre, le chêne et le thuya. Un réseau de postes d'observation dans les zones infestées permet le suivi du cycle du parasite et des conséquences de ses attaques sur l'hôte.

En Algérie, selon le même auteur, des dépérissements d'arbres par les parasites tel que la chenille processionnaire « *Thaumetopoea pityocampa* » (Chêne-liège, Eucalyptus, Pin d'Alep), *Phoracanta semi punctata* et *Lymantria dispar* sont constatés.

### 4-4. Les actions anthropiques

Il s'agit des menaces qui apparaissent comme porteuses de dangers les plus grands et les plus immédiats pour la biodiversité. Ces actions sont nombreuses et diversifiées et incombent directement à l'homme qui, volontairement ou inconsciemment, se montre peu soucieux de la durabilité des écosystèmes.

Ces actions néfastes résultent de la croissance démographique, de l'urbanisation et de la concentration de populations humaines. Leurs méfaits sont à l'origine d'un bouleversement radical et souvent irréversible des écosystèmes. Ces activités se traduisent par :

#### 4-4-1. Le surpâturage

Le surpâturage est défini comme étant un prélèvement d'une quantité de végétal supérieur à la production annuelle des parcours (Le Houerou, 1995). La majeure partie de la population, surtout steppique, tire ses revenus à travers la pratique de l'élevage d'un cheptel principalement ovin (Soto, 1997). L'exploitation permanente des pâturages naturels, utilisant une charge animale nettement supérieur au potentiel de production des parcours, a pour effet de réduire leur capacité de régénération naturelle. Selon (Aidoud, 1989) L'impact du surpâturage sur la végétation se traduit par :

- Le développement dominant des espèces indésirables, refusées ou très peu consommées par les ovins ;

- La régression du couvert végétal en général, et particulièrement les pérennes. La forte disparition de bonnes espèces a provoqué une baisse du couvert végétal (Chermat, 2013) ;
- Le développement d'une flore post-pastorale riche en thérophytes, favorisée par la concentration des animaux, cela conduit à un phénomène de thérophytisation. Il est bien connu et démontré à maintes reprises en zone méditerranéenne. Il s'agit d'une tendance à l'augmentation de la richesse en thérophytes qui est un corollaire de la dégradation et de la désertification (Chermat *et al.*, 2013).

#### 4-4-2. Les incendies

L'incendie est une combustion qui s'échappe au contrôle de l'homme, soit volontairement ou involontairement surtout les incendies enregistrés en Algérie ces dernières années (2019, 2020, 2021 et 2022). Le passage du feu bouleverse les conditions écologiques du milieu et élimine de nombreuses espèces végétales et animales. Les paysages végétaux des régions méditerranéennes sont profondément marqués par son empreinte (Khoudja, 1986). C'est le facteur de dégradation le plus ravageur de la végétation. De fait, et compte tenu des enjeux environnementaux, humains et économiques que cela implique, l'aléa « feu de forêt » est considéré en Algérie comme un risque naturel majeur.

Abdelguerfi et Ramdane (2003), notent que l'homme est le facteur le plus imprévisible, la majeure partie des incendies lui sont imputée et ajoutent que le meilleur moyen de le contrecarrer c'est de l'associer en le faisant bénéficier des produits de la forêt. C'est le moyen le plus efficace pour réduire les feux de forêts. Là où la forêt n'assure plus de fonction économique, elle n'est plus entretenue et brûlée fréquemment.

Madoui (2013), à son tour, a montré à travers son étude que les feux ont été parmi d'autres facteurs qui ont contribué à la dégradation de la forêt algérienne. Annuellement, l'Algérie perd, en moyenne, de 37 000 à plus de 40 000 hectares de superficie boisée (forêts, maquis, broussailles et steppes). Cette superficie brûlée présente une certaine variabilité annuelle en fonction de plusieurs facteurs que ce soit d'ordre météorologique (précipitation, température, vent) que biotique (type et structure du combustible). Or, Marc en 1916, parlait déjà, lors d'un bilan effectué sur une période de 40 ans, de la périodicité décennale des grands sinistres correspondant aux années 1881, 1892, 1902, et 1913. Ainsi, l'espérance moyenne de vie des boisements n'excédait pas dix ans surtout dans la région

Est du pays qui est la plus sensible.

Le feu provoque de graves pertes écologiques, économiques et, parfois, humaines. Dans une courte période, allant de quelques heures à plusieurs jours, le feu détruit ce que la nature a mis des années à reconstituer. Vu ses aspects négatifs, en particulier écologiques (érosion des sols, perte de la biodiversité) et économique (en détruisant des arbres à l'âge de l'exploitabilité), le feu est considéré comme une catastrophe dont nous devons faire face périodiquement. Toutefois, malgré les moyens de prévention et de protection mis en place chaque année, les incendies continuent à brûler des forêts sur de grandes surfaces et leur fréquence ne cesse de s'accroître (Madoui, 2002).

➤ **Les feux de forêts, la télédétection et le SIG**

Plusieurs travaux et articles portant sur l'utilisation de la télédétection ont été recensés dans le monde.

Des travaux sur l'application de la technologie numérique LANDSAT pour la cartographie du type de combustible au niveau des forêts canadiennes ont été réalisés par Kourtz en 1977. Chuvieco et Congalton (1989), ont utilisé les données LANDSAT pour dériver une carte de risque de feu de forêts de la côte méditerranéenne espagnole. Les travaux de Barber (1987) et Burgan *et al.*, (1998) ont été portés sur l'application de la télédétection pour la modélisation du combustible et l'évaluation de la teneur en humidité de la végétation. Dauriac (2004) a réalisé un suivi multi-échelle par télédétection et spectroscopie de l'état hydrique de la végétation pour la prévention du risque de feu de forêt dans le Sud-est de la France.

Il y a également les travaux de Lili Chabaane *et al.*, (2008) portant sur la cartographie de l'inflammabilité et de la combustibilité des formations végétales, dans le massif tunisien de Djebel Mansour, à l'aide des images satellitaires IKONOS et ASTER. Au Maroc, Faleh *et al.*, (2012) ont utilisé le SIG et la télédétection pour élaborer une carte de risque feu de forêt du massif forestier Khezana située dans la province de Chaouene.

Pour les travaux portés sur l'analyse SIG des modèles spatiaux et temporels des feux de forêts, on peut citer Vega-Garcia *et al.*, (1993), Pew et Larsen (2001) et Wittkuhn et Hamilton (2010). Blanchi *et al.*, (2002) et Jappiot *et al.*, (2003) ont abordé les différentes approches méthodologiques SIG relatives au risque feu de forêt pour clarifier les concepts, apprécier la multiplicité des besoins existants, analyser les moyens d'évaluation des risques et identifier les données actuellement utilisables, ainsi que les traitements et les systèmes d'information disponibles. Belhadj-Aissa *et al.*, (2003) ont décrit le rôle de la télédétection et du SIG dans

l'élaboration d'une stratégie appropriée pour la gestion des feux dans la forêt de Bainem, wilaya d'Alger. Khader *et al.*, (2009) ont élaboré une carte du risque feu de forêt à l'aide de la géomatique pour la forêt de Nesmoth, située dans la wilaya de Mascara. Guettouche *et al.*, (2011) ont réalisé une modélisation et une spatialisation du risque feu de forêt par SIG pour la forêt de Bouzareah à Alger. Hachemi (2014) a travaillé sur l'apport de la géomatique dans la protection des forêts contre les feux, cas de la forêt Fenouane d'Ain El Hdjar, wilaya de Saida. Enfin, Arfa (2019) qui a basé son étude sur l'application du SIG et de la télédétection pour un outil cartographique d'aide à la gestion des feux de forêts dans la wilaya d'El Tarf.

#### 4-4-3. Les coupes du bois

En Afrique, l'extraction du bois de feu a bondi du fait de l'augmentation de la population régionale. Abdelguerfi et Ramdane (2003) confirment que l'état actuel de la dégradation des peuplements forestiers en Algérie montre que la végétation ligneuse a été surexploitée, suite à la hausse des prix du bois, les coupes illicites de bois de chauffage, de bois d'œuvre pour la construction et de bois d'ébénisterie sont en augmentation. Arfa (2008) ajoute que ces coupes touchent les arbres ayant les meilleures caractéristiques phénotypiques et génétiques et éliminent les meilleurs porteurs de graines.

Malgré des efforts et des campagnes de reboisement réalisées annuellement depuis l'indépendance, le taux de boisement en Algérie se situe entre 10 et 12%. Le couvert végétal est agressé par les actions négatives de l'homme causées des coupes.

### 5. Impacts des changements du couvert végétal sur la biodiversité

Comme il a été observé à l'échelle mondiale au cours des dernières décennies, le changement de la couverture terrestre est accompagné d'une réduction de la couverture forestière, au profit des fractions de cultures et des pâturages (Gana, 2018). Ces changements ont un impact notable sur la biodiversité et les ressources naturelles (Sala *et al.*, 2000). Ils affectent à la fois la faune et la flore. Les espèces menacées d'extinction sont de plus en plus nombreuses et ce principalement à cause des changements d'occupation et d'utilisation du sol d'origine anthropique (Foley *et al.*, 2005). On estime que le pourcentage d'espèces en voie de disparition augmente particulièrement depuis les années 1960, leur taux d'extinction étant estimé entre 100 à 1000 fois supérieur au taux d'extinction naturel (May *et al.*, 1995 ; Shaw,

2005). Les actions de l'Homme sur l'écosystème et l'occupation et l'utilisation du sol ont pour conséquence de fragmenter spatialement les espèces animales et végétales et favoriser l'invasion d'espèces exotiques (Hanski, 2005).

Les écosystèmes dont l'évolution est préoccupante sont, pour l'essentiel, les forêts qui ont une diversité faunistique et floristique très importante et qui sont de plus en plus destinées à la sylviculture et affectées par la déforestation, et les zones agricoles subissant pour leur part une forte intensification (Lecerf, 2008).

## **6. Le besoin d'un outil de suivi de l'évolution de la végétation**

L'étude de la végétation est l'une des préoccupations essentielles à l'heure actuelle en raison de son intérêt en tant que ressource biologique.

La télédétection se révèle être un outil tout à fait approprié pour étudier le fonctionnement et suivre l'évolution de la végétation. Grâce aux satellites, il est possible en effet de cartographier les couverts végétaux à des échelles de temps et d'espace très variées. Ils permettent en outre d'estimer le rayonnement solaire global, ainsi que certains paramètres caractéristiques des couverts végétaux, comme la quantité de biomasse, ou la fraction du rayonnement photosynthétique actif. Outils d'une meilleure compréhension des processus physiques et biologiques qui gouvernent la dynamique des écosystèmes végétaux, les données de télédétection peuvent aussi être utilisés pour informer les politiques sur les conséquences d'éventuels changements de la répartition mondiale des couverts végétaux, de façon à mettre en place des solutions de gestion plus durables (Abdelbaki, 2012).

## **Chapitre II :**

Avantages des Outils géomatiques pour étudier la  
dynamique de la végétation

## 1. Apport de la Géomatique

Le mot « géomatique » est un néologisme issu de la contraction des termes «géographie» et «informatique». Ce néologisme a été proposé, dans les années 1960, par Bernard Dubuisson. La géomatique est la discipline où la géographie (les données géographiques) et l'informatique sont indissociables. Dans les faits, la géomatique est une science qui permet d'appréhender des phénomènes naturels ou anthropiques en manipulant des informations numériques dans des Systèmes d'Information Géographique (SIG) (Lhomme, 2013).

Le suivi de l'occupation et de l'utilisation du sol dépend du type de données utilisées mais également des méthodes appliquées pour identifier et caractériser les changements. Les données disponibles pour cartographier l'occupation et l'utilisation du sol sont nombreuses mais montrent chacune des limites tant du point de vue spatial que temporel pour effectuer des suivis détaillés de l'occupation et de l'utilisation du sol (Arrouays *et al.*, 2002). Les images satellites sont donc des données largement employées pour cartographier l'occupation et l'utilisation du sol ou identifier la dynamique des végétaux. Toutefois, la qualité du suivi, sa précision spatio-temporelle dépend du type d'images de télédétection employées mais également des méthodes utilisées pour les traiter (Lecerf, 2008).

## 2. Apport de la télédétection

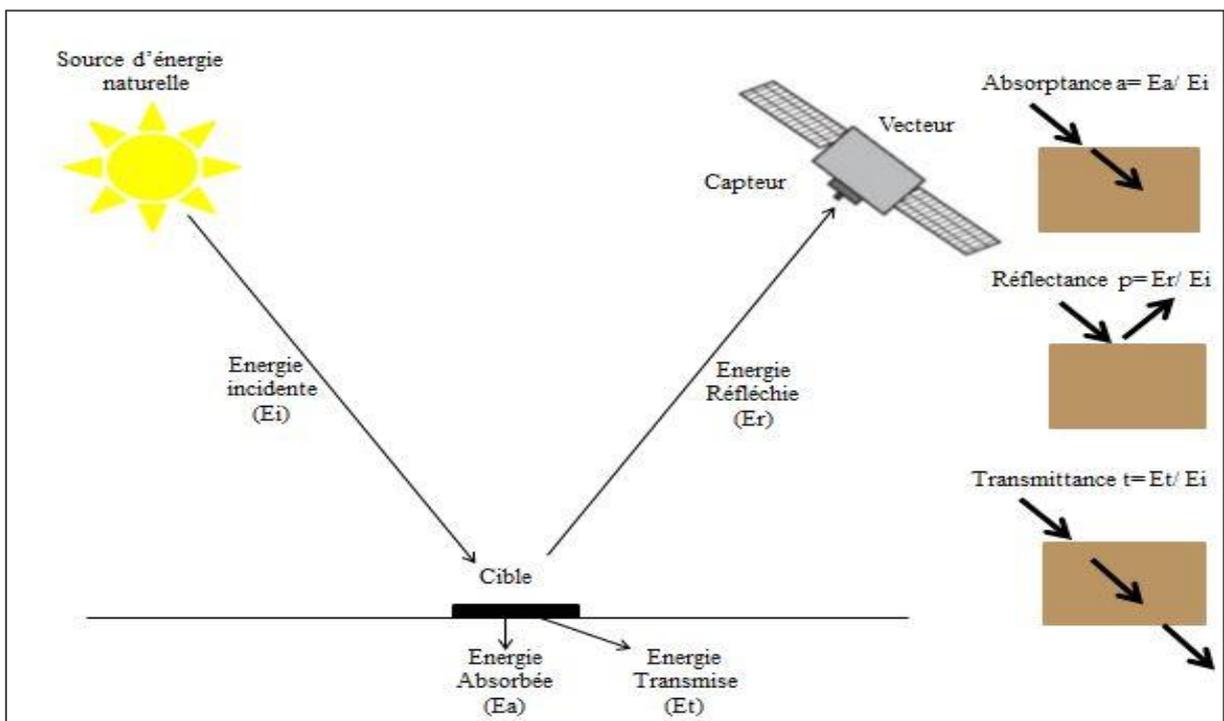
### 2-1. Définition de la télédétection

La télédétection est définie comme « l'ensemble des connaissances et des techniques utilisées pour l'observation, l'analyse, l'interprétation et la gestion de l'environnement à partir de mesures et d'images obtenues à l'aide de plates-formes aéroportées, spatiales, terrestres ou marines. Elle suppose l'acquisition d'information à distance, sans contact direct avec l'objet détecté » (Bonn, 1996).

Selon le centre Canadien de Télédétection (CCT) (2008), le processus de la télédétection au moyen de systèmes imageurs comporte les étapes que nous élaborons ci-après (Figure 01) :

- **Source d'énergie (A) :** En télédétection dite passive, le soleil constitue la principale source d'énergie. En télédétection dite active, la source est fabriquée par l'homme ;
- **Rayonnement et atmosphère (B) :** le rayonnement interagit avec l'atmosphère durant son parcours entre la source d'énergie et la cible. Une seconde interaction se produit lors du trajet entre la cible et le capteur ;

- **Interaction avec la cible (C) :** une fois parvenue à la cible, l'énergie interagit avec la surface de celle-ci. La nature de cette interaction dépend des caractéristiques du rayonnement et des propriétés de la surface. Elle peut être une transmission, une réflexion ou encore une absorption ;
- **Enregistrement de l'énergie par le capteur (D) :** une fois l'énergie diffusée ou émise par la cible, elle doit être captée à distance (par un capteur qui n'est pas en contact avec la cible) pour être enfin enregistrée ;
- **Transmission, réception et traitement (E) :** l'énergie enregistrée par le capteur est transmise, souvent par des moyens électroniques, à une station de réception où l'information est transformée en images (numériques ou photographiques) ;
- **Interprétation et analyse (F) :** une interprétation visuelle et/ou numérique de l'image traitée est ensuite nécessaire pour extraire l'information que l'on désire obtenir sur la cible ;
- **Application (G) :** la dernière étape du processus consiste à utiliser l'information extraite de l'image pour mieux comprendre la cible, pour nous en faire découvrir de nouveaux aspects ou pour aider à résoudre un problème particulier.



**Figure 01.** Processus de la télédétection

## 2-2. La télédétection spatiale : rayonnement électromagnétique

La télédétection spatiale permet d'observer le système «terre /océans /atmosphère» en s'appuyant sur des méthodes d'acquisition de l'information à distance basées sur les propriétés du rayonnement électromagnétique. Les capteurs satellitaires permettent de mesurer l'énergie réfléchiée et/ou émise par la surface de la terre, les océans ou par l'atmosphère et donc d'analyser et de suivre l'évolution de ces milieux au cours du temps (UVED, 2008).

Le rayonnement électromagnétique correspond à l'ensemble des radiations émises par une source, sous forme d'ondes électromagnétiques, la répartition de ces dernières en fonction de leur longueur d'onde, de leur fréquence ou bien encore de leur énergie, représente « le spectre électromagnétique » (Figure 02).

Le spectre électromagnétique est le résultat de la décomposition du rayonnement électromagnétique en ses fréquences constituantes. Ainsi, lorsque la lumière passe à travers un prisme, elle se décompose en plusieurs couleurs constituantes (principe de l'arc-en-ciel). Si on applique cette division en fréquences constituantes à l'ensemble du rayonnement électromagnétique, on obtient le spectre électromagnétique complet. Les longueurs d'ondes vont alors de quelques nanomètres à plusieurs milliers de kilomètres (UVED, 2008).

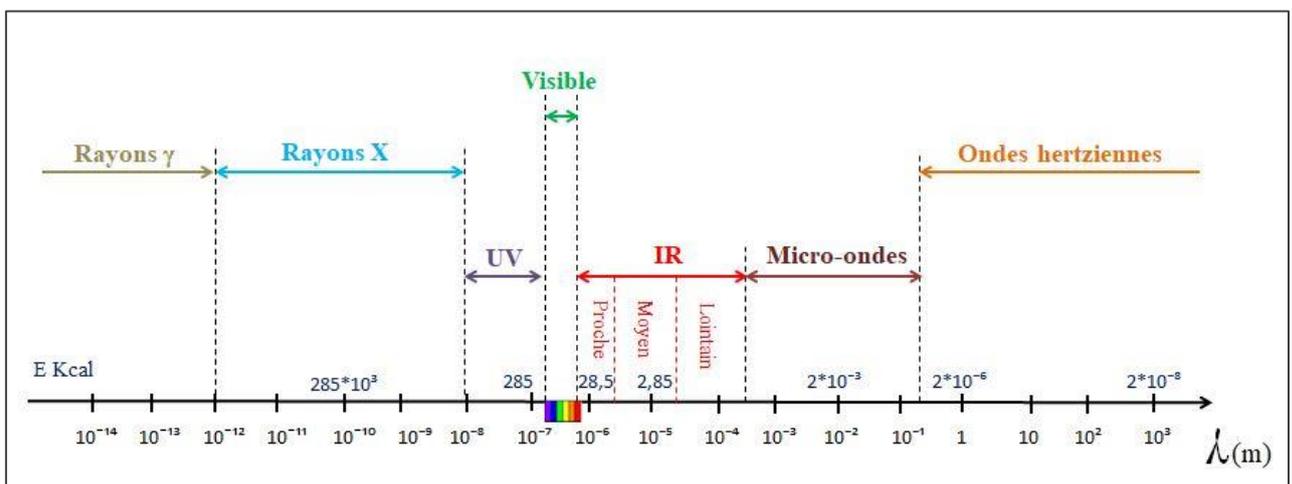


Figure 02. Spectre électromagnétique (Moquet, 2003).

## 2-3. L'imagerie satellitaire

Contrairement aux photographies aériennes, les images satellites représentent une réalité « numérisée » sur différentes longueurs d'onde (du visible à l'infrarouge). La zone

étudiée n'est plus couverte par une seule photographie mais par plusieurs images en niveaux de gris correspondant chacune à une des longueurs d'onde enregistrées. La transcription des valeurs radiométriques en données numériques impose des traitements d'image (composition colorée, segmentation d'image, indice de végétation) pour parvenir à une interprétation. (Clauzel, 2008).

### 2-3-1. Avantage des images satellitaires

Selon Guray (2008), l'imagerie satellitaire présente en plus de nombreux avantages par rapport aux autres sources d'observation du sol comme l'imagerie aérienne, les relevés de terrain et les cartes géologiques :

- ✚ **Elle est rapide** : Le temps nécessaire pour obtenir les images satellitaires d'une région spécifique dépend exclusivement de la planification de l'orbite du satellite ;
- ✚ **Elle a une couverture vaste** : Entre un peu plus de 100 km<sup>2</sup> jusqu'à plusieurs dizaines de milliers de km<sup>2</sup> ;
- ✚ **Elle est universelle** : Elle ne connaît pas des frontières géographiques ou politiques.
- ✚ **Elle est facilement mise à jour** : On peut renouveler l'information systématiquement avec des délais courts ;
- ✚ **Elle est détaillée** : Grâce à la sensibilité des capteurs à un très large spectre de la lumière, on obtient des informations variées qui caractérisent l'occupation du sol ;
- ✚ **Elle a une résolution spectrale plus importante** : Les satellites couvrent non seulement les longueurs d'onde du visible mais aussi celle de l'infrarouge. Chaque objet de la surface terrestre ayant son propre comportement radiométrique, il est possible d'identifier sa nature grâce à sa signature spectrale (valeurs radiométriques enregistrées dans chaque longueur d'onde et rapportées sur un graphique). L'image satellite apporte en outre des informations supplémentaires sur l'état des objets discriminés. En analysant leur comportement radiométrique, il est possible de décrire, au moins partiellement, l'état phytosanitaire d'un couvert végétal, l'organisation et la nature des cultures ou encore le degré d'humidité des sols (Clauzel, 2008) ;
- ✚ **Une résolution temporelle plus élevée** : Le satellite Landsat 5 TM a par exemple une répétitivité de 16 jours. Parmi le panel d'images disponibles, il est possible de sélectionner les dates les plus pertinentes en fonction de la thématique étudiée (suivi des feux de forêt, évolution des cultures). Cette caractéristique permet ainsi la construction

de séries chronologiques larges et détaillées, garantes d'une étude très fine dans le temps (Clauzel, 2008) ;

- ✚ **Une résolution spatiale :** Certes souvent moins précise que les photographies aériennes, mais plus adaptée à l'identification des changements spatiaux régionaux où le niveau de détail élevé des photographies n'est pas forcément pertinent (Clauzel, 2008). La distance entre la cible observée et la plate-forme joue un rôle important puisqu'elle détermine la grandeur de la région observée et le détail qu'il sera possible d'obtenir. Les images sur lesquelles seuls les grands éléments sont visibles ont une résolution "grossière" ou "basse", alors que les images à résolution fine ou élevée permettent l'identification d'éléments de plus petites dimensions. Les capteurs utilisés par les militaires par exemple, sont conçus pour obtenir le plus de détails possibles. Ils ont donc une résolution très fine. Les satellites commerciaux ont une résolution qui varie de quelques mètres à plusieurs kilomètres (Puissant, 2003).

#### 2-4. Type des données satellites

Les données satellites se subdivisent en 3 classes principales : les données à haute résolution et très haute résolution spatiale, les données à basse résolution spatiale et les données à moyenne résolution spatiale

##### 2-4-1. Les données à haute résolution et très haute résolution spatiale

Les capteurs fournissant des images haute résolution permettent d'observer des objets spatiaux de petites tailles et d'en suivre l'évolution. Ces capteurs, tels que LANDSAT, SPOT ont de manière générale une résolution spatiale inférieure à 30 m. Ils permettent d'observer des paysages hétérogènes et d'envisager un suivi spatial détaillé des objets. Comme nous l'avons vu précédemment, la résolution spatiale des capteurs dépend largement du champ de visée des capteurs. Le champ de visée des capteurs à haute résolution spatiale étant réduit, leur résolution temporelle est relativement faible. Une plate-forme telle que SPOT repasse tous les 26 jours sur une même orbite. Toutefois, les satellites SPOT étant équipés d'un second capteur avec un système de dépointage, permettant d'orienter le capteur vers un site spécifique, il est possible d'acquérir une image tous les 2 ou 3 jours sur un même site. Cette répétitivité de 2 ou 3 jours reste théorique, l'acquisition d'une image dépendant également de la couverture nuageuse. Un capteur tel que LANDSAT, ne disposant pas de système de dépointage, aura lui une répétitivité de 16 jours, le champ de visée étant plus large que celui du capteur SPOT. Comme pour les

capteurs SPOT, la répétitivité dépendra de la couverture nuageuse. Les images à haute résolution spatiale permettent d'effectuer des suivis de l'occupation et de l'utilisation du sol sur des échelles temporelles intra-annuelles ou interannuelles. Toutefois, à l'échelle intra-annuelle, il est difficile d'acquérir des images à un intervalle de temps régulier et cet intervalle est généralement supérieur à un mois, ce qui limite fortement les études de changement du couvert végétal. Des suivis temporels sont effectués avec des données haute résolution pour des pas de temps annuels ou pluriannuels pour détecter des changements peu rapides (Almeida-Filho *et al.*, 2002 ; Corgne, 2004 ; Roder *et al.*, 2008). Des suivis sont également effectués à des intervalles de temps mensuels mais cette fois pour des sites d'études ayant une étendue spatiale plus réduite, de l'ordre de 40 x 40 km (Fillol *et al.*, 2006). Les images à très haute résolution, inférieure à 5 m, ont une couverture spatiale très limitée : 16,5 km x 16,5 km pour Quickbird et 11 km x 11 km pour Ikonos. La résolution temporelle est en moyenne inférieure à 3 jours, grâce au système de dépointage, mais la répétitivité des acquisitions sans couverture nuageuse est d'autant réduite que le champ de visée diminue. Elles sont essentiellement utilisées en urbanisme et pour des thématiques nécessitant une définition précise des objets spatiaux (Weber *et al.*, 2003).

#### 2-4-2. Les données à basse résolution spatiale

Les données à basse résolution spatiale ont une taille de pixel supérieure ou égale au kilomètre. L'angle d'ouverture de ces capteurs permet d'obtenir des observations tous les 1 à 2 jours en fonction de la latitude. A l'équateur, les observations se répètent tous les deux jours et la fréquence d'acquisition des images augmente avec la latitude. Là également, la répétitivité dépend de la couverture nuageuse. Toutefois, la fréquence d'acquisition des images étant beaucoup plus élevée que celle des images à haute résolution spatiale et les probabilités d'obtenir des scènes sans couverture nuageuse sont beaucoup plus importantes (Gana, 2018).

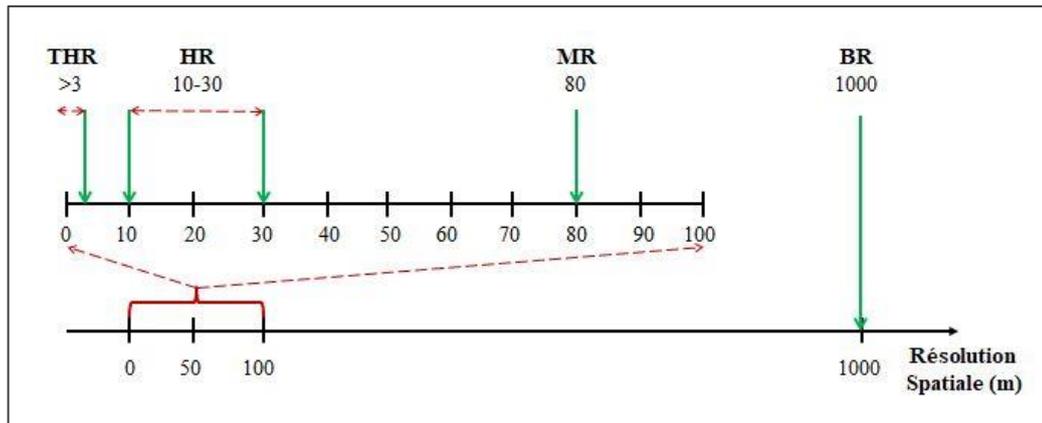
Les capteurs fournissant des images à basse résolution spatiale ne sont pas utilisés pour effectuer des suivis à l'échelle locale. En revanche, elles permettent de cartographier des grands types d'occupation et d'utilisation du sol à l'échelle globale. Par ailleurs, les séries temporelles d'images à basse résolution spatiale sont largement utilisées à l'échelle globale, continentale pour étudier les changements saisonniers de la couverture végétale (Gana, 2018).

### 2-4-3. Les données à moyenne résolution spatiale

La moyenne résolution spatiale est définie ici comme une résolution intermédiaire entre la haute résolution spatiale et la basse résolution kilométrique (Figure 03). A l'heure actuelle, seuls les capteurs MERIS et MODIS peuvent être qualifiés de capteur à moyenne résolution au sens où celle-ci a été définie. La taille du pixel, avoisinant les 250-300 m, devrait permettre d'envisager une étude des paysages fragmentés (Townshend *et al.*, 1988). La résolution temporelle du capteur MODIS est équivalente de celle des capteurs basse résolution, avec une fréquence d'acquisition de 1 à 2 jours en fonction de la latitude. MODIS possède 2 bandes spectrales à 250 m de résolution, 5 bandes à 500 m de résolution et 29 bandes à 1 Km de résolution. Seules les bandes rouges et proche infrarouge ont une résolution de 250 m, permettant ainsi d'effectuer des suivis de la couverture végétale avec une précision spatiale supplémentaire par rapport à la basse résolution. Les bandes à 500 m de résolution sont également dédiées à l'observation des surfaces terrestres dans le domaine du visible et de l'infrarouge. Les bandes spectrales à 1 km de résolution sont quant à elles destinées à l'observation des océans, de l'atmosphère et s'étendent du domaine visible à l'infrarouge thermique (Justice *et al.*, 1998).

Les images du capteur MODIS sont utilisées pour effectuer des cartographies de l'occupation et de l'utilisation du sol à l'échelle globale avec une résolution kilométrique (Friedl *et al.*, 2002 ; Townshend *et al.*, 2002). Des cartographies de l'occupation de sol sont également effectuées à l'échelle régionale à une résolution de 250 et 500 m (Wessels *et al.*, 2004). Les données MODIS sont également utilisées pour analyser la phénologie des végétaux à l'échelle globale et à l'échelle régionale avec une résolution kilométrique ou de 250 m (Hansen *et al.*, 2002 ; Wessels *et al.*, 2004 ; Zhang *et al.*, 2003). Des images de NDVI MODIS ayant une résolution de 250 m ont également servi à effectuer un suivi de la phénologie des cultures dans des paysages ouverts des grandes plaines américaines avec des parcelles d'une taille supérieure à 32,4 ha (Wardlow *et al.*, 2007). De manière générale, les études utilisant des images MODIS à 250 m de résolution sont effectuées sur des paysages ouverts et non des paysages fragmentés en petites parcelles (Morton *et al.*, 2006 ; Wardlow *et al.*, 2006). Le capteur MERIS de l'Agence Spatiale Européenne a été placé en mars 2002 sur la plate-forme ENVISAT. La résolution spatiale de ce capteur est de 300 m, sa résolution temporelle étant de 3-4 jours. Il possède 15 bandes spectrales dans les domaines du visible et du proche infrarouge. Il est principalement destiné à l'observation des océans, de l'atmosphère et de l'occupation et de l'utilisation du sol. Les images MERIS sont utilisées pour effectuer des classifications de

l'occupation et de l'utilisation du sol à l'échelle globale et à l'échelle régionale (Arino *et al.*, 2007; Clevers *et al.*, 2004). Toutefois, l'accessibilité aux données issues de ce capteur étant restreinte, ces dernières ont été jusqu'à présent très faiblement exploitées pour cartographier les dynamiques de l'occupation et de l'utilisation du sol. Les images moyenne résolution devraient permettre le suivi d'espaces fragmentés en petites parcelles, un pixel moyenne résolution représentant 1/16ème d'un pixel basse résolution (Lecerf, 2008).



**Figure 03.** Les différentes résolutions spatiales (Gharbi, 2021).

## 2-5. Analyse des images

L'étude de la dynamique du couvert végétal est axée sur la bonne représentation des unités principales sur une image. Leur variation hétérogène spatiale, spectrale et temporelle exige de les présenter de façon homogène pour mieux interpréter les objets d'une image et tout un processus de changement observé. Cette représentation dite « classification » est utilisée pour la production de cartes thématiques où elle offre une analyse plus détaillée de l'image. Elle peut être effectuée sur un ou plusieurs canaux d'une image pour séparer les divers éléments d'une image en fonction de leurs caractéristiques de rétro diffusion ou de signature spectrale en traitement numérique des images (Abdelbaki, 2012).

La classification consiste, à regrouper dans une même entité ou classe, tous les pixels similaires sur la base d'une ressemblance de propriétés (attributs), tout en respectant leur position spatiale. La règle de décision de l'appartenance d'un pixel à une classe donnée est établie à travers un modèle décisionnel. Ainsi, à partir d'un espace multidimensionnel représentatif de l'image, une nouvelle représentation de l'information télédéteectée, désignée par (carte thématique) est obtenue et sera évaluée par rapport à la réalité de terrain. Les approches de classification peuvent être supervisées ou non supervisées (Khedam, 2008). On distingue :

**2-5-1. Classification non supervisée**

Dans une classification non supervisée, l'utilisateur ne dispose d'aucune information sur la zone d'étude. Aucune information externe à l'image n'est donc introduite. Le classement des pixels est effectué uniquement selon le critère de ressemblance spectrale. L'étiquetage thématique est réalisé a posteriori après la classification par l'interprétation des classes spectrales produites (Puissant, 2003). Cette classification a donc pour but de reconnaître automatiquement les signatures spectrales des objets du sol (ex : la couverture végétale) en établissant préalablement des classes où s'identifie chacun de ces objets contenus dans la scène analysée (Carrier, 1996).

**2-5-2. Classification supervisée**

Dans une classification supervisée, l'utilisateur définit a priori les classes thématiques qu'il souhaite extraire de l'image à partir de zones d'entraînement identifiées sans ambiguïtés. De ces zones, il extrait des signatures spectrales pour chaque classe. Les pixels sont alors affectés à la classe qui correspond le mieux à ses caractéristiques spectrales (Puissant, 2003).

**2-6. Signatures spectrales des principales surfaces naturelles****2-6-1. Signature spectrale des sols**

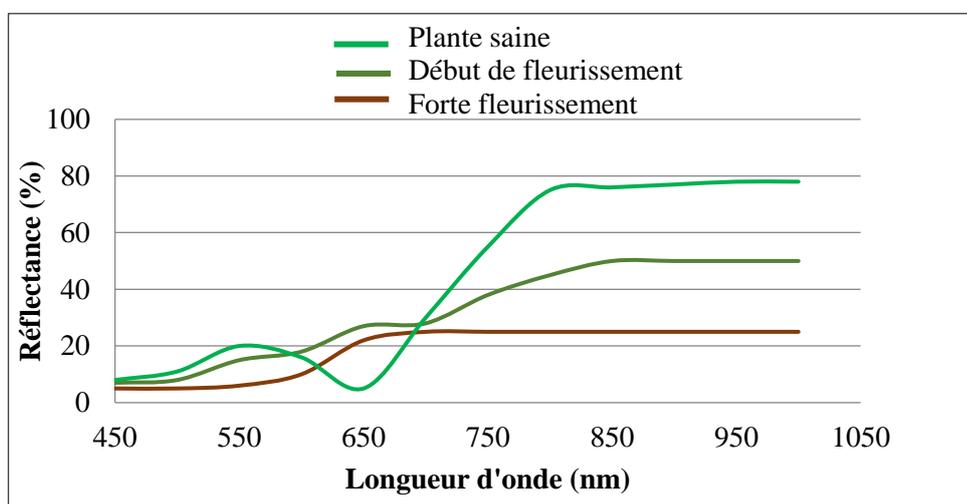
En ce qui concerne la signature spectrale des sols, selon UVED (2008), on note un accroissement régulier de la réflectance au fur et à mesure qu'on se déplace vers les grandes longueurs d'onde. Les discontinuités que l'on observe dans le proche infrarouge et l'infrarouge moyen sont dues aux bandes d'absorption de l'eau. L'étude des propriétés spectrales des sols est toutefois particulièrement complexe car elle doit tenir compte de la nature hétérogène du sol qui contient à la fois des matières minérales et organiques, mais aussi une composante liquide, tous ces éléments vont influencer la réflexion du rayonnement).

Fonctions à la fois de la composition minérale et organique des sols, de leur contenu en eau et de la rugosité, les propriétés optiques des sols peuvent présenter une variabilité considérable. Une augmentation de l'humidité du sol entraîne une baisse de la réflectance sur tout le spectre, de même qu'un accroissement de la rugosité (obscurcissement par effet d'ombre) (Girard et Girard, 1989).

## 2-6-2. Signature spectrale de la végétation

La chlorophylle absorbe fortement le rayonnement aux longueurs d'onde du rouge et du bleu, mais réfléchit le vert. Les feuilles, qui contiennent un maximum de chlorophylle en été, sont donc plus vertes pendant cette saison. La structure interne des feuilles en bonne santé agit comme un excellent réflecteur diffus pour les longueurs d'onde de l'infrarouge. Les scientifiques utilisent d'ailleurs l'infrarouge pour déterminer l'état de santé de la végétation (CCT, 2008).

La réflectance peut varier en fonction de la teneur en eau de la plante, de la structure des feuilles, de leur densité et l'âge (Guyot, 1984). L'identification et le suivi des couverts végétaux repose sur la réponse spectrale des surfaces dans les différentes longueurs d'onde et donc sur la notion de signature spectrale (Gana, 2018) (Figure 04).



**Figure 04.** Variations de la signature spectrale en fonction de l'état physiologique de la végétation (UVED, 2008).

## 2-7. Les indices de végétation

Les indices de végétation, qui sont des combinaisons arithmétiques des réflectances dans le Visible (généralement le rouge) et le Proche Infrarouge, sont relativement bien corrélées à la croissance des plantes, la couverture végétale et la quantité de biomasse verte (Rondeaux *et al.*, 1996). Le rayonnement électromagnétique dans les longueurs d'ondes du rouge est absorbé en grande partie par la chlorophylle. Dans le proche infrarouge, la réflectance d'un couvert végétal varie essentiellement en fonction de la densité du couvert végétal vert (Jacquemoud, 1993). Un grand nombre d'indices de végétation ont été développés, du simple ratio aux indices plus élaborés, à partir de ces bandes rouges et proche infrarouge. Ces indices,

très faciles à calculer, présentent l'inconvénient d'être sensibles à la fois aux changements atmosphériques, à la géométrie des observations mais surtout à la réflectance des sols (Lecerf, 2008).

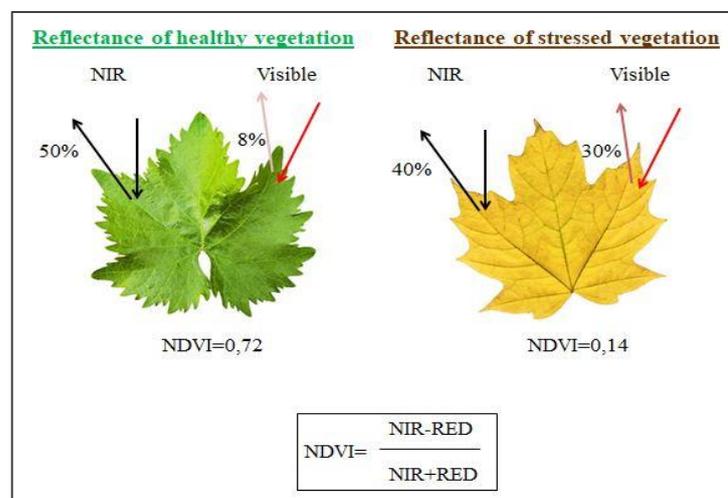
### 2-7-1. Le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

Le NDVI est l'indice le plus communément utilisé pour rendre compte de la présence de la végétation en télédétection. Les valeurs du NDVI sont comprises entre -1 et 1. Il s'appuie sur la forte différence de réflectance de la végétation entre le visible et le proche infrarouge. Sa valeur sera proche de 0 dans le cas d'un sol nu qui n'a pas de fort changement de réflectance entre le rouge et le proche infrarouge alors qu'elle sera supérieure en présence de végétation. La réflectance du sol est plus grande que celle des feuilles dans le rouge et plus faible dans l'infrarouge. Lorsque la végétation est en phase active de croissance, la contribution du sol au spectre de réflectance global mesuré décroît, au profit de celle de la végétation. Au cours de cette phase, la réflectance mesurée diminue dans le domaine du visible et de l'infrarouge moyen, alors qu'elle augmente dans la région du proche infrarouge. Le NDVI est souvent utilisé comme indicateur de biomasse, de la lumière absorbée ou de la capacité photosynthétique du couvert suivant les interprétations qui sont faites (Fournier, 2011) (Figure 05).

La formule utilisée pour calculer l'INDVI est la suivante :

$$\text{NDVI} = \frac{\text{IR} - \text{R}}{\text{IR} + \text{R}}$$

Avec : IR= La bande infra-rouge ; R= La bande rouge.



**Figure 05.** Réflexion d'une végétation saine et végétation stressée (Gharbi, 2022).

**2-8. Domaine de la télédétection**

La télédétection a de nombreuses applications à la fois scientifiques et opérationnelles : gestion des ressources hydrologiques, forestières et agricoles, météorologie, les études d'impacts, gestion des catastrophes, étude du climat, reconnaissances militaires, l'occupation du sol et détection de ses changements, télécommunication (Tableau 01) :

**Tableau 01.** Domaines de la télédétection

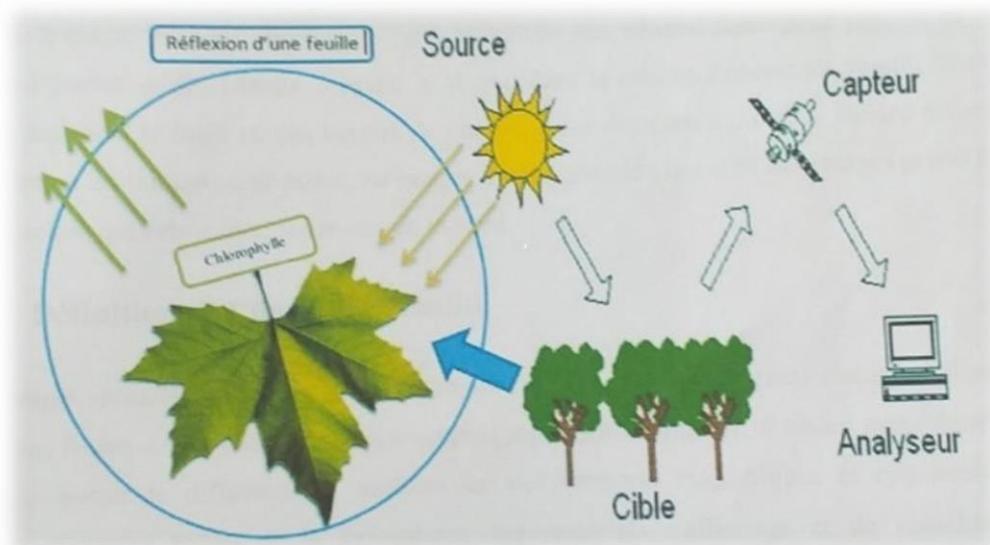
Domaines	Exemples d'applications
Géosciences	Géologie, pédologie, géomorphologie...
Météorologie	Vitesses des vents, précipitations, températures, orages...
Océanographie	Couleur de l'eau, turbidité, hauteur des vagues, courant marin, phytoplancton, pollution marine...
Foresterie	Couverture forestière, santé des forêts, impacts après ouragans...
Cadastre / Urbanisme	Couverture du sol, urbanisation, contrôle des autorisations
Agriculture	Identification des plantations, évaluation de la production...
Environnement	Etudes d'impact, détection des changements...
Biologie / Ecologie	Classification des types de végétaux, étude du corail, cartographie des habitats...
Télécommunication	Carte de répartition des antennes de téléphonie mobile...
Hydrologie	Comportements de l'eau à la surface du sol et dans le sol, cycle de l'eau...
Humanitaire	Pré-alerte de famines : réfugiés (camps)...
Catastrophes environnementales	Feux de forêts, éruptions volcaniques, sécheresses, marées noires...
Changements globaux	Désertification, variation climatiques, compositions de l'atmosphère...

**Source :** (Peduzzi, 2009).

## 2-9. L'application de la télédétection pour l'étude de la végétation

Le champ d'application de la télédétection pour l'étude de la végétation est très vaste. Les acquisitions ont été utilisées dans maintes études : description, identification et cartographie de la végétation et de l'occupation du sol, déforestation tropicale, photosynthèse et évapotranspiration, biomasse, productivité des systèmes agricole, phénologie forestière, coupes et régénération, défoliation foliaire et dépérissement des couverts forestier (Soudani, 2005).

Le principe de la télédétection pour l'étude de la végétation selon le CCT (2008), repose sur la chlorophylle qui absorbe fortement le rayonnement aux longueurs d'onde du rouge et du bleu, mais réfléchit le vert. Les scientifiques utilisent d'ailleurs l'infrarouge pour déterminer l'état de santé de la végétation (Figure 06).



**Figure 06.** L'étude de la végétation par la télédétection

## 2-10. L'application de la télédétection dans le domaine de la foresterie

La télédétection a un rôle important dans le domaine de la foresterie :

- Permet de réviser/actualiser facilement les cartes (Belhadj-Aissa *et al.*, 2003) ;
- Cartographie et inventaire des ressources forestières ;
- Identification des limites des habitats et des écosystèmes ;
- La détection, l'intervention et l'évaluation des superficies ;
- Détection des changements de la végétation (Peterson *et al.*, 1999) ;
- Estimation de la récolte des produits forestiers (bois, liège...) ;

- Evaluation des dégâts causés par les maladies et les ravageurs des forêts ;
- Le suivi de l'exploitation forestière et des reboisements ;
- Elle est plus moins coûteuse (Zlatanova *et al.*, 2010).

### **3. L'apport de Système d'Information Géographique (SIG)**

#### **3-1. Définition du SIG**

Le développement des Systèmes d'information géographique (SIG) a débuté vers 1980, en relation directe avec les performances de l'informatique. Il s'accélère actuellement et une très forte croissance est à prévoir au cours de cette décennie (Brabant, 1992).

Un système d'information géographique est un ensemble de logiciels intégrés, spécifiquement conçu pour être utilisé avec des données géographiques, qui comprennent à la fois les données spatiales et les données attributaires décrivant les caractéristiques géographiques, il effectue une gamme complète de fonction de base comprennent Le saisie (inputs), le Stockage, l'extraction, la transformation et l'affichage (Output), En plus d'une grande variété de procédés descriptifs et analytiques, de cela en peut dire que le concept de base des SIG décrive à la fois l'emplacement, la distribution spatiale et la relation entre les deux (Li et Weng, 2010).

#### **3-2. Fonctions d'un SIG**

Les SIG permettent de saisir de données qui sont étroitement liées aux photogrammétrie (De By *et al.*, 2000). Ils permettent également la transformation vecteurs-raster et vice versa, la transformation du système de coordonnées et de la projection des cartes, et le reclassement des attributs sont les meilleurs processus de transformation dans un SIG (Verbyla, 2002). Une autre principale fonction est l'analyse spatiale, c'est-à-dire l'explication soit de localisation ou des informations attributs. Le SIG est un support technique permettant une bonne visualisation des données spatiales (Benguerai *et al.*, 2009). Cette fonction du SIG est étroitement liée aux disciplines de la cartographie, L'imprimerie et L'édition. (De By *et al.*, 2000).

#### **3-3. Architecture d'un SIG**

##### **3-3-1. Composantes d'un SIG**

Selon Thierno (2008), le SIG exige six composantes clés pour fonctionner en ensemble : réseau, matériel, logiciel qui doit permettre de travailler sur des informations géographiques,

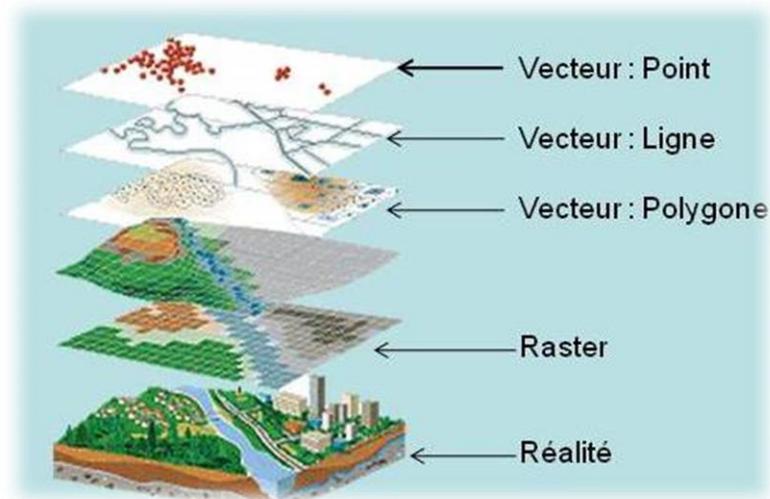
intégrer un système de gestion de base de données, permettre de faire des analyses et de visualiser l'information avec une interface graphique (agréable) pour l'utilisateur, les données Géographiques et tabulaires, les utilisateurs qui agissent sur le système en définissant, vérifiant ou demandant de l'information, exploitant et développant de l'outil et enfin les méthodes.

### 3-3-2. Les données géographiques (raster/vecteur)

Les SIG exploitent deux différents types de modèles géographiques :

- ☉ **La donnée raster :** L'un des types de données géo-spatiales est qualifié de donnée raster / matricielle, ou plus communément un (raster). Les formes les plus facilement reconnaissables de donnée raster sont les images satellites numériques ou les photos aériennes. Les ombrages de pentes ou les modèles numériques de terrain sont également représentés en raster. Tout type de données cartographiques peut être représenté comme une donnée raster, mais il y a des limitations. Un raster est une grille régulière qui se compose de cellules ou, dans le cas de l'imagerie, de pixels, il y a un nombre déterminé de lignes et de colonnes, chaque cellule a une valeur numérique et une certaine taille géographique (Athan, 2010).
- ☉ **La donnée vecteur :** Pour représenter les objets à la surface du globe, les SIG utilisent trois objets géométriques qui sont le point, la ligne et la surface (IAAT, 2003) (Figure 07).

La structure de données vecteur est une abstraction du monde réel où les données de position sont représentées sous forme de coordonnées, Dans les données vectorielles, les unités de base des informations spatiales sont des points, lignes et polygones, Chacune de ces unités est composées simplement comme une série d'un ou de plusieurs points de coordonnées, par exemple : une ligne est une collection de points connexes, un polygone est un ensemble de lignes connexes (Skidmore, 2002). Les points peuvent représenter à grande échelle des arbres, des bornes d'incendie et des collecteurs d'ordures. Mais à des échelles plus petites de type carte routière au 1/1 000 000ème, il représente une capitale régionale, La ligne représente les réseaux de communication, d'énergie, hydrographiques, d'assainissement, etc... Elle peut être fictive, en représentant l'axe d'une route, ou virtuelle en modélisant des flux d'information, d'argent, bien que les polygones soient utilisés pour représenter une entité abstraite comme la surface d'une commune ou des entités ayant une existence géographique comme une forêt, un lac, une zone bâtie. (Mihi, 2012).



**Figure 07.** Les types de données géographiques (raster/vecteur).

### 3-3-3. Les conversions (Vecteur-raster ou vice-versa)

Un SIG doit permettre le passage d'un mode vecteur à un mode raster et vice-versa. Chaque modèle a ses applications. Le chef pompier qui cherche à déterminer la route la plus courte pour parvenir à un incendie aura besoin des données vectorielles, alors que le forestier qui planifie ses coupes en fonction du sol, de la végétation préférera le mode raster (Tadjeddine, 2001).

### 3-3-4. Les trois volets d'un SIG

Un système d'information géographique (SIG) permet de gérer, d'analyser et d'afficher des informations géographiques. Celles-ci sont représentées par une série de jeux de données géographiques qui modélisent la géographie à l'aide de structures de données génériques simples. De nombreux outils sont intégrés au SIG, afin de pouvoir travailler avec les données géographiques. En outre, les utilisateurs disposent de plusieurs volets pour afficher et manipuler les informations géographiques (ESRI, 2004) :

- ☉ **Le volet géodatabase :** Un SIG correspond à une base de données spatiales contenant des jeux de données qui représentent des informations géographiques selon un modèle de données SIG générique (entités, rasters, topologies, réseaux).
- ☉ **Le volet géovisualisation :** Un SIG est un ensemble de cartes intelligentes et de vues qui montrent des entités et leurs relations à la surface de la terre. Il est possible d'élaborer différentes vues cartographiques des informations géographiques sous-

jaçentes, qui s'utilisent comme des fenêtres ouvertes sur la base de données afin d'effectuer des requêtes, des analyses et de modifier les informations.

- ⊙ **Le volet géotraitement :** Un SIG comprend des outils de transformation et d'informations qui produisent des jeux de données géographiques à partir des jeux de données existant. Les fonctions de géotraitement partent des informations contenues dans les jeux de données existants, appliquent des fonctions analytiques et écrivent les résultats dans de nouveaux jeux de données.

Ces trois volets constituent le noyau d'un SIG complet et sont utilisés à différents niveaux de toutes les applications SIG (ESRI, 2004).

### 3-4. La troisième dimension

#### 3-4-1. Le modèle numérique de terrain (MNT)

Un modèle numérique de terrain est une représentation numérique simplifiée de la surface d'un territoire, en coordonnées altimétriques (le plus souvent exprimées en mètres par rapport au niveau de la mer) et planimétriques, calées dans un repère géographique (Ramos, 2003).

Le MNT ne prend pas en compte la hauteur des bâtiments ni celles des arbres. Alors que le Modèle Numérique d'Élévation MNE ou (DEM : Digital Elevation Model) prend en compte le relief, mais aussi ce qu'on appelle la "canopée" (sommets des arbres) ou encore le sur-sol (élévation des bâtiments). Par défaut les images aériennes ou satellites débouchent par photo-interprétation sur la production d'un MNE. Il faut des traitements plus poussés pour en extraire un MNT (Figure 08).

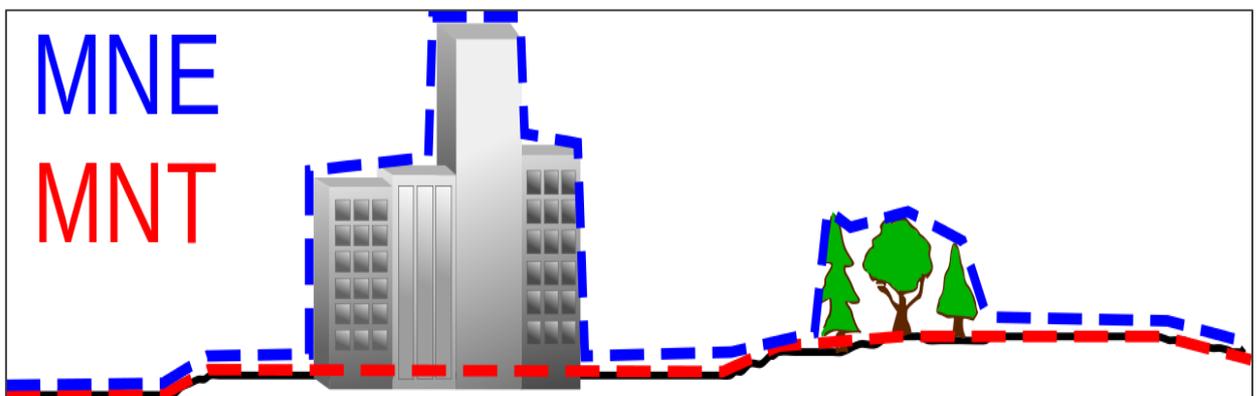


Figure 08. La différence entre MNT et MNE.

**3-4-2. Format de MNT**

Une fois l'acquisition effectuée et les traitements appliqués afin d'extraire l'information de relief, les modèles numériques doivent être stockés dans un format facilement réutilisable par la suite au sein d'un SIG. Les formats de MNT les plus couramment employés sont : nuage ou grille de point, courbes de niveau, profils, TIN et grille régulière ou non (ESRI, 2004).

**3-4-3. Application du MNT dans la foresterie**

Les ingénieurs forestiers utilisent les MNT pour différentes études. Ils peuvent étudier la pente du relief, l'exposition, le réseau hydrographique, déterminer le champ de visibilité du poste de vigie, direction d'écoulement des eaux, risque d'érosion et les altitudes (Hadjadj, 2011).

**3-5. Les domaines d'application de SIG**

Le système d'informations géographiques touche pratiquement la plupart des domaines à de nombreuses applications : l'urbanisme, gestion de territoires, études économiques et socio-économiques, géomarketing, gestion des ressources biologiques, forestières et hydrologiques. (Tableau 02) :

**Tableau 02.** Les domaines d'application de SIG (Mihi, 2012).

<b>Domaines</b>	<b>Exemples d'applications</b>
<b>Urbanisme</b>	Gestion des plans d'occupation du sol, voirie, réseaux d'assainissement.
<b>Gestion de territoires</b>	L'utilisation qu'en font les gestionnaires va de l'emploi simple de la base de données du territoire à la réalisation d'analyses plus sophistiquées (Chételat, 2005).
<b>Etudes économiques et socio-économiques</b>	Population, emploi, logement, production et services
<b>Télécoms</b>	Implantation d'antennes pour les téléphones mobiles.
<b>Réseaux de communication</b>	Electricité, eau, routes, fleuves, réseaux, souterrains
<b>Réseaux de transport</b>	Planification des transports urbains, optimisation d'itinéraires, la fourniture d'itinéraires sur internet, les assistants à la conduite automobile.
<b>Protection civile</b>	Gestion et prévention de catastrophes
<b>Hydrologie</b>	Fleuves, oueds, nappes, barrages et stations.
<b>Forêt</b>	Il permet aux gestionnaires d'avoir une approche globale et synthétique des problèmes liés au dégradation du milieu par la modélisation les topographique et thématique (pression humaine) et de proposer des solutions d'aménagement (Laffly, 1997).
<b>Science de la terre</b>	Géologie, géodésie, pédologie, géotechnique.
<b>Biologie</b>	Etude du déplacement des populations animales (Oudjet et Rabia, 2008).

### 3-6. Application des SIG à la recherche environnementale

Les applications environnementales sont, longtemps, constituées la base de SIG, Beaucoup des premières applications été principalement concernées par les questions

d'inventaire et de mesure, mais à partir du milieu des années 1980 une importance beaucoup plus grande été donnée à l'analyse statistique et la modélisation. (Lovett *et al.*, 2008). Les SIG sont largement utilise dans les taches environnementales suivantes :

- Le choix des parcelles représentatives d'échantillonnages, ou-schéma d'exploitation, Par exemple, le relief, la nature des sols et la végétation constituent souvent la base de données utilisés pour définir où les parcelles d'étude seront faites pour obtenir une représentation de la biodiversité dans un lieu donné (Zerroug, 2012) ;
- L'élaboration des plans d'interventions et d'exploitations (domaine forestier) ;
- La comparaison des indicateurs environnemental : la plupart des applications basées sur ces méthodes visent à constater des corrélations entre plusieurs variables environnementales comme : la végétation et les changements d'utilisation des terres, les effets de la faune sur la végétation (Johnston *et al.*, 1993) ;
- Simulation et modélisation des impacts et des changements environnementaux sur la biodiversité (Zerroug, 2012).

L'objectif final de l'application des SIG est de participer à la prise de décision des dirigeants, en s'appuyant sur une analyse synthétique. Par conséquent en intégrant la télédétection et les données géographiques, les SIG constituent un outil puissant pour surveiller et modéliser l'environnement (Kefifa, 2014).

### 3-7. Le SIG et la télédétection

La Télédétection, s'appuyant sur des mesures au sol et combinée aux systèmes d'informations géographique, apporte aujourd'hui une contribution décisive aux diverses questions qui se posent en matière d'environnement, de santé, d'aménagement du territoire, d'exploitation rationnelle des ressources naturelles (Labad *et al.*, 2009).

La Télédétection et les SIG peuvent être des outils très complémentaires avec les méthodes conventionnelles utilisées dans la prévention et la gestion des catastrophes.

Ces technologies sont d'autant plus utiles lorsqu'on dispose une connaissance détaillée du risque, la fréquence attendue, le caractère et l'intensité des évènements dans une région, les images satellitaires donnent une vue globale et fournissent des informations très utiles sur l'environnement, pour une grande gamme d'échelles, de continents entiers aux détails de quelques mètres (Belhadj-Aissa *et al.*, 2003).

# **PARTIE II : MATÉRIEL ET MÉTHODES**

## **Chapitre I :**

Contexte territorial de la zone d'étude

## 1. Cadre physiographique du site d'étude

Le secteur étudié se situe dans la partie méridionale des Hautes Plaines Sétifiennes, il se rattache administrativement à la wilaya de Sétif, daïra de Ain Oulmene et El -Eulma. Ce secteur comprend plusieurs Djebels parmi lesquels Djebel Youssef et Djebel Boutaleb où notre étude a été conduite.

### 1-1. Djebel Boutaleb

#### 1-1-1. Situation géographique

Djebel Boutaleb est un massif forestier, situé au Nord-Est de l'Algérie, dans la partie méridionale de la wilaya de Sétif entre la latitude Nord  $35^{\circ} 48' 0''$  et longitude Est  $5^{\circ} 20' 0''$  (Figure 09). Il s'étend d'Ouest en Est sur 35 km avec une largeur de 12 Km. Il culmine à 1875 m et couvre une superficie de 33 000 ha. Il constitue un maillon très important dans la partie orientale de la chaîne des monts du Hodna. Il se situe entre les Hautes Plaines Sétifiennes au Nord et le bassin du Hodna au Sud. Il s'inscrit d'une manière générale dans la structure administrative suivante :

- ✓ Daïra : Salah Bey et Ain Azel ;
- ✓ Communes : Rasfa, Ain Azel, Boutaleb, Hamma et Salah Bey.

Il est limité :

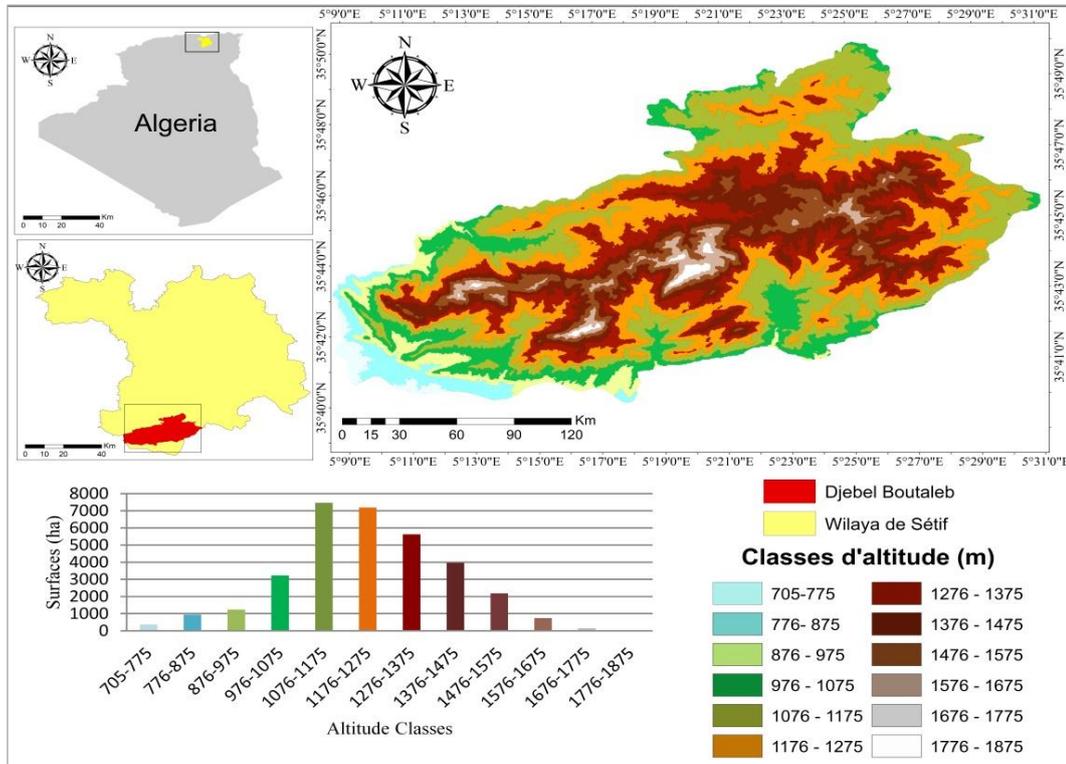
- ⊗ A l'Ouest par la R.N. 28 Sétif-Barika et les gorges de Soubella ;
- ⊗ A l'Est par la nouvelle R.N. 35 Ain Azel-N'gaous-Barika ;
- ⊗ Au Nord par la cuvette de Salah Bey (Nord-ouest) et d'Ain Azel (Nord-est) ;
- ⊗ Au Sud par l'aire synclinale de Barika et la dépression du chott El Hodna.

#### 1-1-2. Relief

D'après la conservation des forêts de la wilaya de Sétif, le massif de Boutaleb est caractérisé par un relief montagneux très accidenté formant un vaste anticlinal qui s'étire des gorges de Soubella à Ain Azel. La partie axiale est constituée par le pli principal presque continu qui prend naissance à l'Ouest par le Djebel Soubella, se poursuivant à l'Est jusqu'au Djebel Tefeliount.

Ses altitudes sont comprises entre 705m et 1875 m, occupant 44,24% de la surface totale du massif (entre 1076 et 1275m) et 38,28% (entre 1276 et 1375m). Le point culminant est le pic de Djebel Afghane qui s'élève jusqu'à 1875m dans la partie centrale du massif. Ailleurs, les

sommets sont également relativement élevés Bouhella 1837m, Chehellou 1781m, Bouiche 1717m, Aouzourt 1672m, Bourhioul 1632 m, Soubella 1548m, Makhrouz 1546 m, Djebel Bourma 1494 m, Ras Zoubia 1487m et Ras Chikda 1422 m (Figure 9).

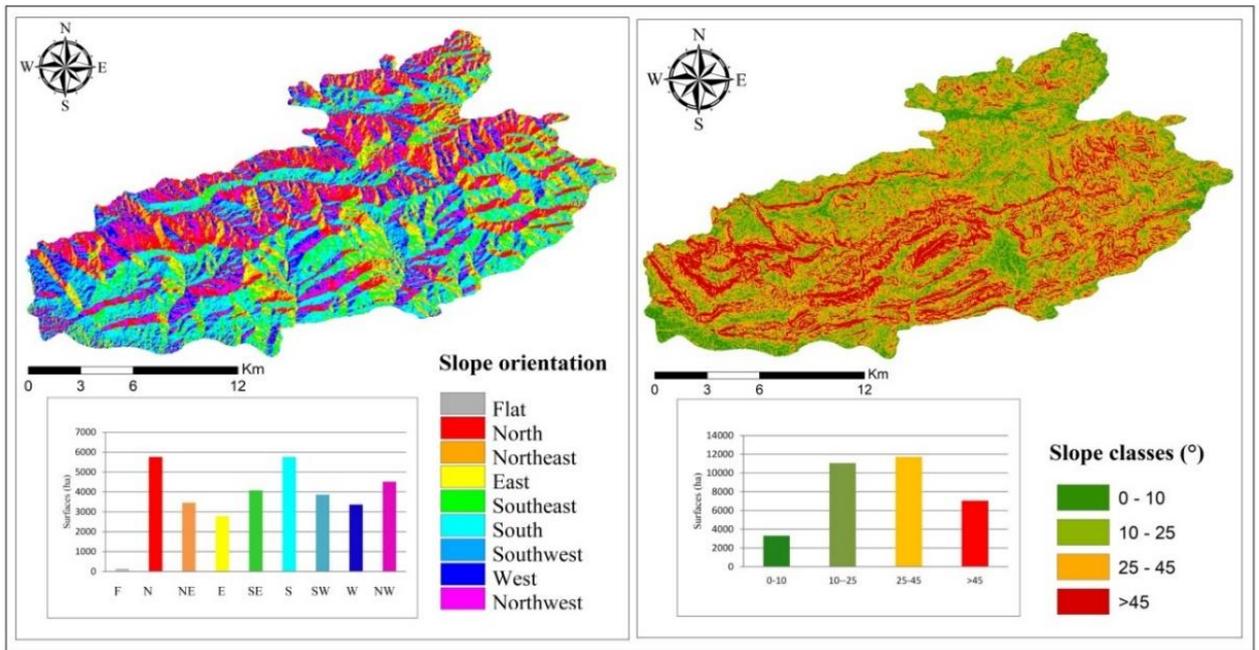


**Figure 9.** Localisation géographique de Djebel Boutaleb (Gharbi ,2021).

### 1-1-3. Pente et exposition

D’après la figure 10, on remarque que le massif de Boutaleb présente une pente très accentuée. La classe des pentes dominante est celle comprise entre 25° et 45° avec 35,4% de la surface totale suivi par la classe des pentes (10°-25°) avec 33,4% puis la classe (>45°) avec 21,2% et enfin la classe (0-10°) avec 10%.

Quant à l’exposition des pentes, c’est l’un des éléments de base de la répartition de types de peuplements forestiers. La répartition du massif selon l’exposition montre une prédominance de l’exposition Sud et Nord. Le taux des autres expositions varie de 8,26% pour l’Est et 13,4% pour le Nord-ouest (Figure 10).



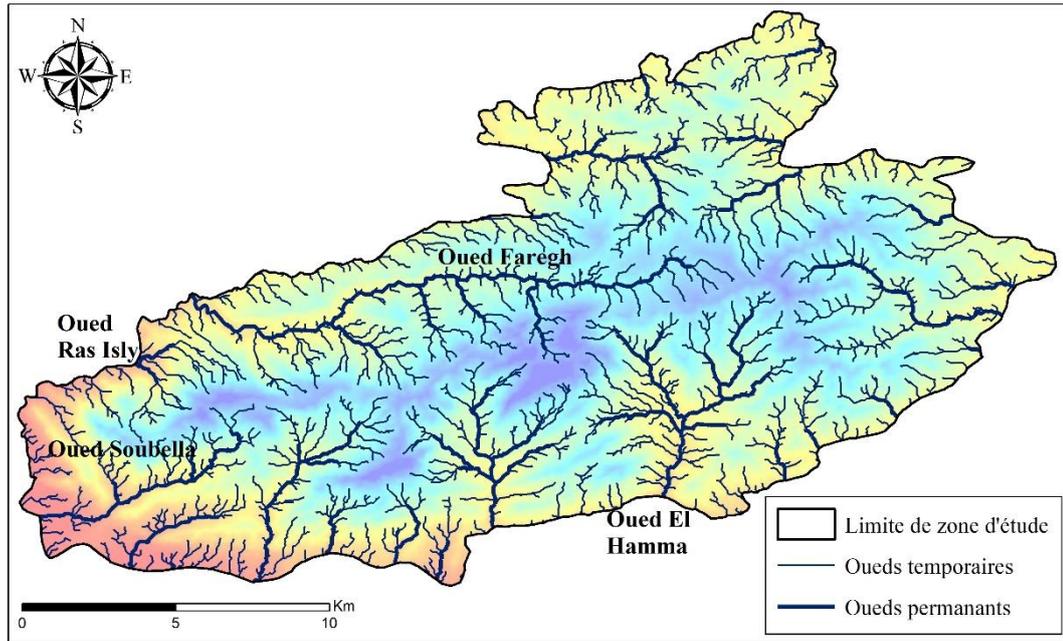
**Figure 10.** Carte des classes et d'exposition des pentes de Djebel Boutaleb (Gharbi ,2021).

**1-1-4. Réseau hydrographique et bassins versants**

D'après la conservation des forêts de Sétif, le caractère typiquement montagnard du massif de Boutaleb lui confère un réseau hydrographique très dense, mais marqué par un "aréisme chronique", c'est-à-dire que la zone est dépourvue d'une hydrographie superficielle permanente, à l'exception de l'oued Faragh qui connaît un écoulement permanent (Figure 11). Le débit de des Oueds est très irrégulier. Ils sont secs en Eté et leur débit ne devient important qu'aux moments des jours pluvieux. Les principaux Oueds sont présentés dans le tableau 03 :

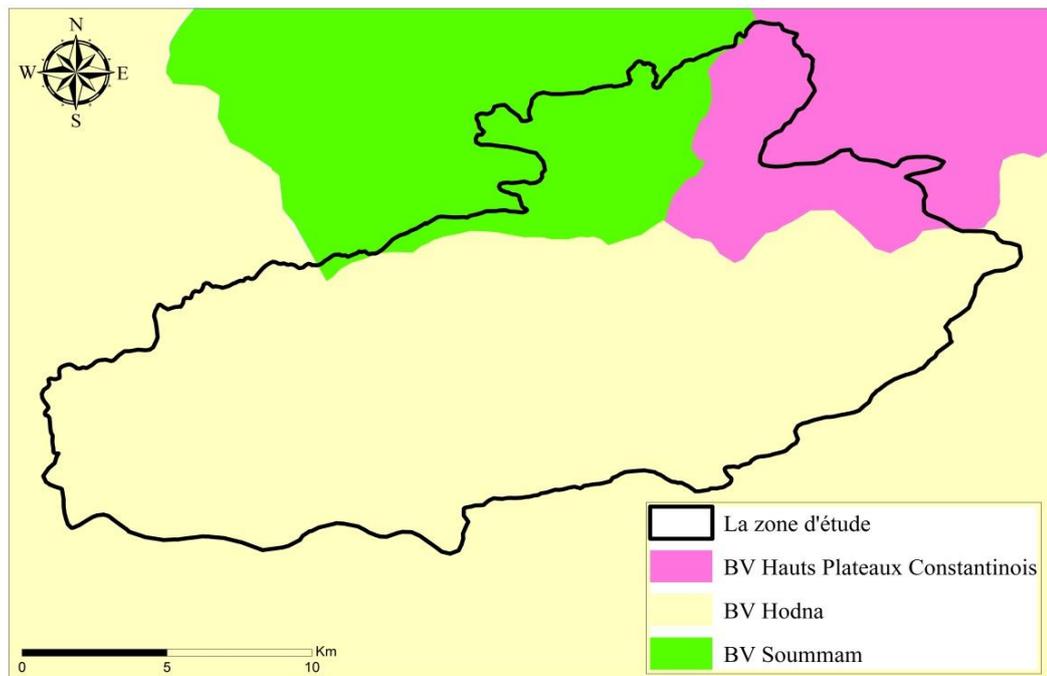
**Tableau 03.** Les principaux Oueds de Djebel Boutaleb

Nord	Sud
Oued Ras Isly	El Hamma
Oued Faregh	Tebesbes
Oued Messaoud	Anoual
Oued Meadouma	Tirhirin
Oued Annfif Attafi	Tafren
Oued Soubella	/

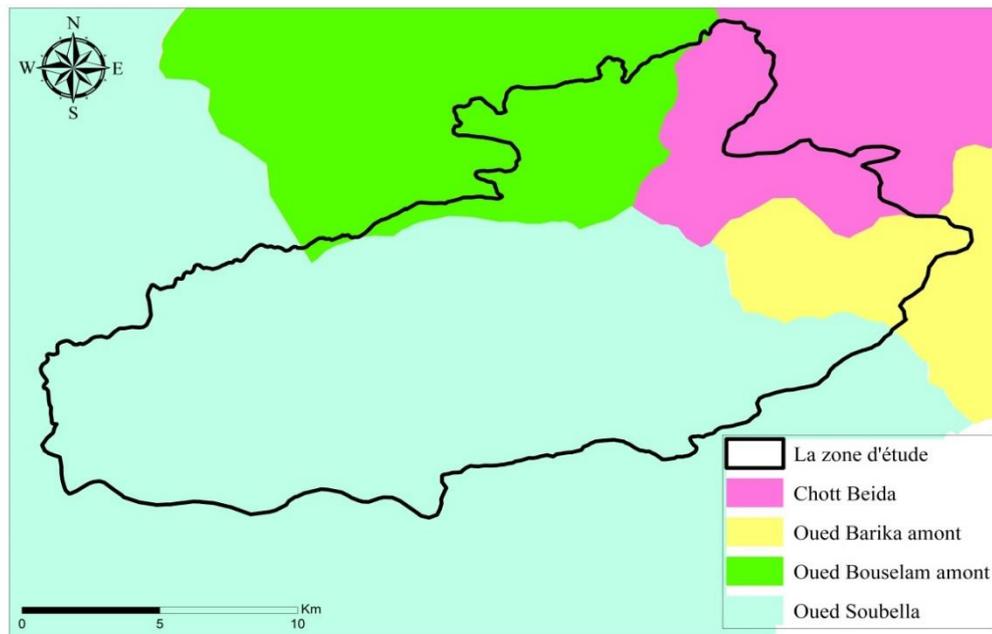


**Figure 11.** Carte de réseau hydrographique de Djebel Boutaleb (Gharbi ,2021).

Le territoire de Djebel Boutaleb est divisé en trois bassins versants et quatre sous bassins versants où plus de 80% du massif est inclus dans le bassin versant du Hodna et le sous bassin versant d'oued Soubella (Figure 12 et 13).



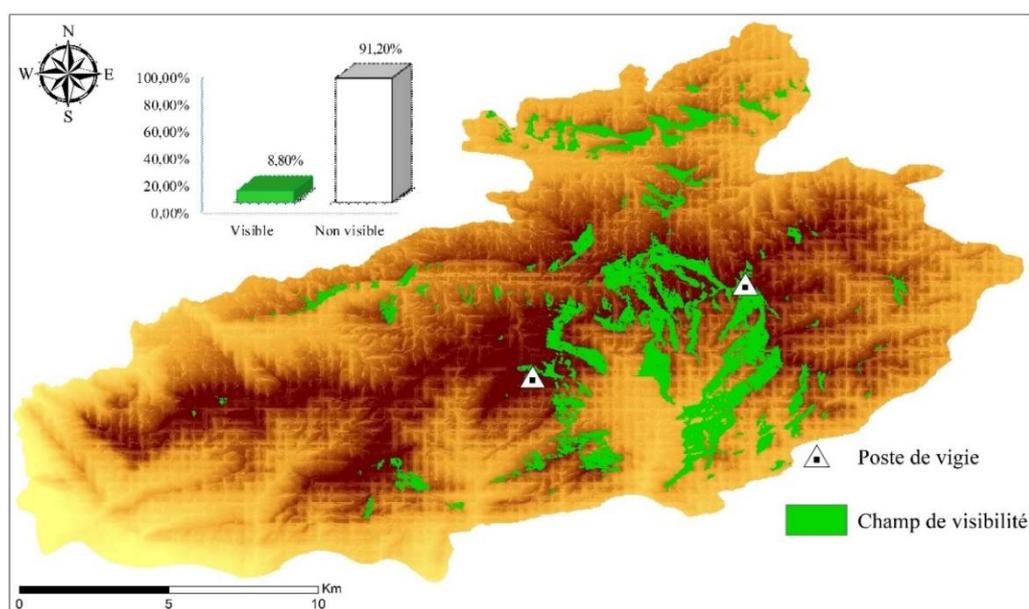
**Figure 12.** Carte des grands bassins versants de Djebel Boutaleb (Gharbi ,2021).



**Figure 13.** Carte des sous bassins versants de Jebel Boutaleb (Gharbi ,2021).

### 1-1-5. La visibilité

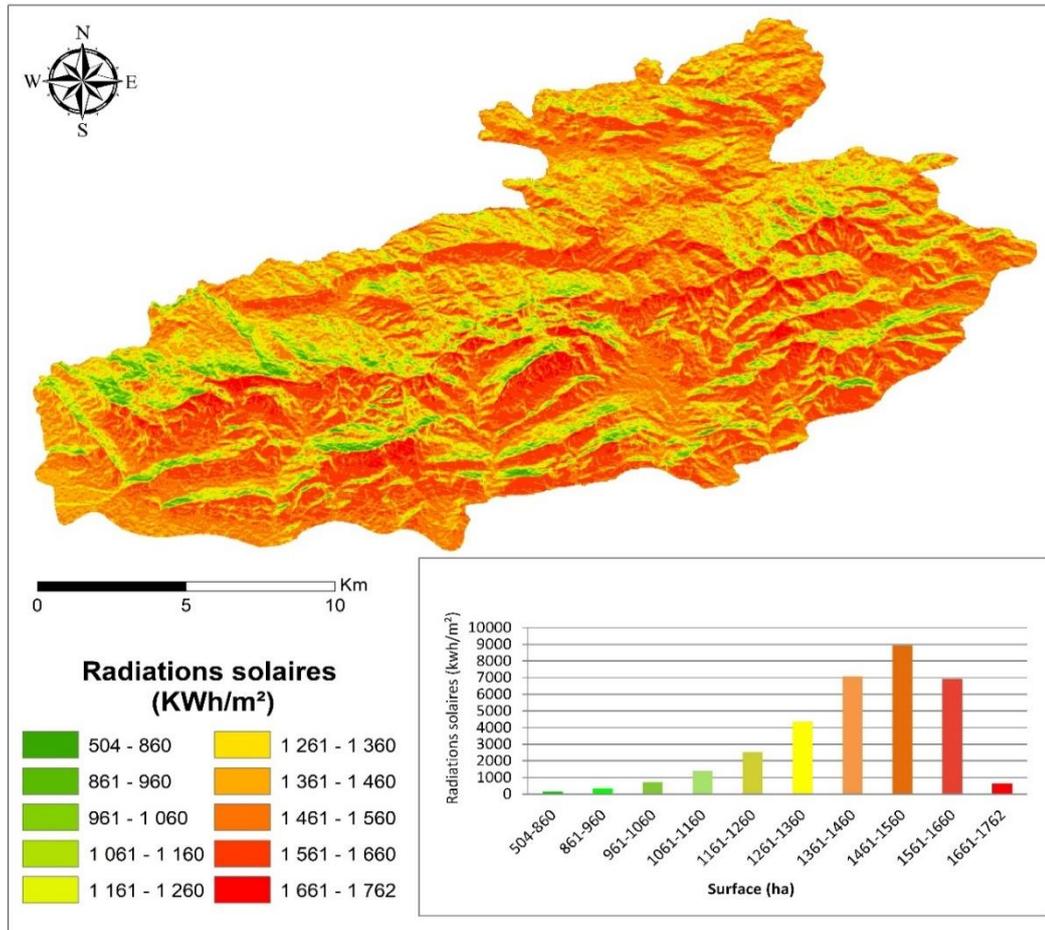
D'après la figure 14, on remarque que le champ de visibilité est peu important, il représente qu'un 8,8% de la surface totale de Jebel Boutaleb (surface colorée en vert), c'est pour cette raison, il est nécessaire d'installer plusieurs points d'observations répartie sur la surface non visible du massif, qui représente 91,2%, pour promouvoir une surveillance optimale contre les incendies et protéger le patrimoine forestier.



**Figure 14.** Carte de visibilité du massif forestier de Boutaleb (Gharbi ,2021).

### 1-1-6. Rayonnement solaire

Après mesurer la quantité de rayonnement solaire reçu et puis superposer les cartes (d'exposition / d'altitude) pour connaître l'orientation qui absorbe le maximum de rayonnement solaire annuel (Figure 15). On a constaté que le rayonnement solaire est beaucoup plus élevé dans les hautes altitudes et les orientations Sud, et Sud-Est, ce qui va entraîner une bonne assimilation chlorophyllienne de la couverture végétale.

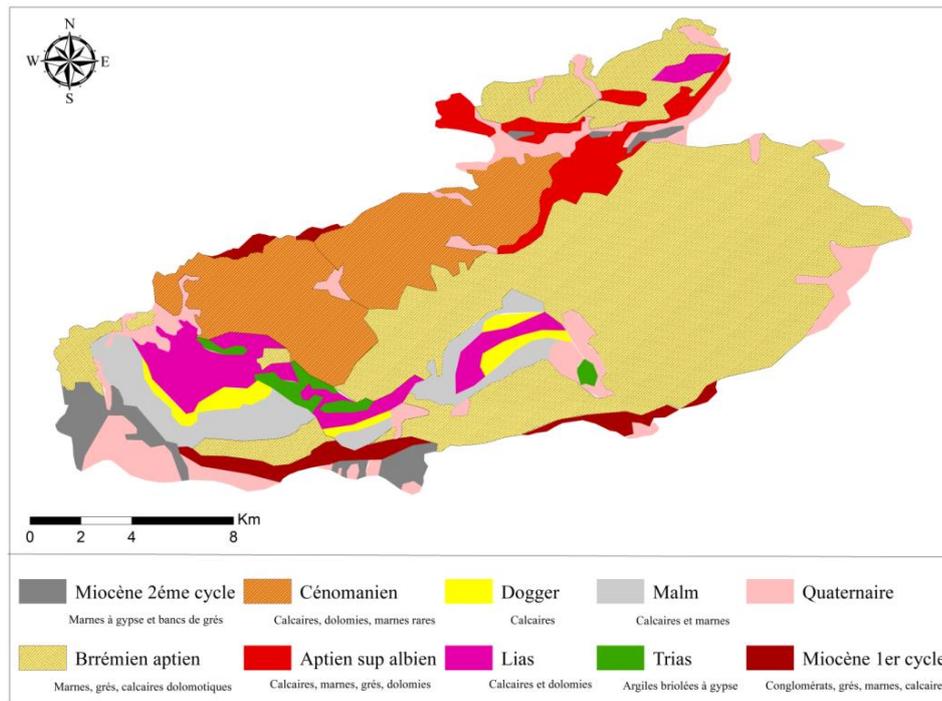


**Figure 15.** Carte de la quantité du rayonnement solaire annuel de Djebel Boutaleb (Gharbi ,2021).

### 1-1-7. Géologie

Selon l'étude de Kanev (1972), le massif du Boutaleb est constitué par un grand anticlinal dont l'axe de direction Est-ouest dans la partie occidentale du massif, s'incurve légèrement vers l'Est et le Nord-est dans la zone centrale et orientale. Le cœur liasique de cet anticlinal sort au jour en trois îlots distincts qui sont d'Ouest en Est : le noyau de Djebel

Soubella et Bouich, Bouhellal et enfin Afghan. Ils sont recouverts par une série jurassique à crétacé complet jusqu'au cénomanien. Dans la partie Nord-ouest du massif, un simonien transgressif sub-horizontale vient recouvrir les formations précitées. Enfin, une ceinture de dépôt oligocène continental et néogène court au pied de cet anticlinal en un affleurement presque continu (Figure 16).



**Figure 16.** Carte géologique de Djebel Boutaleb (Gharbi ,2021)

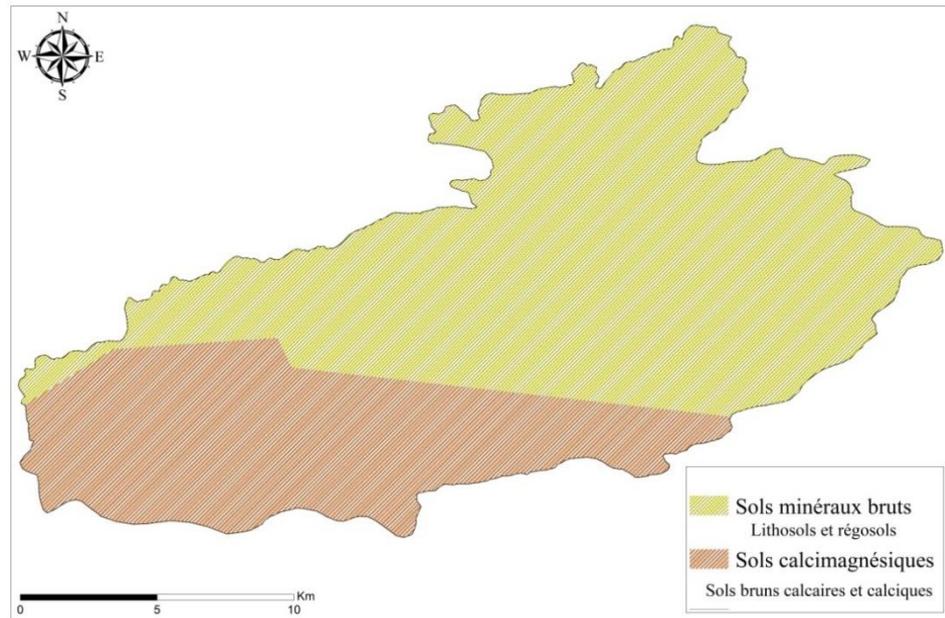
(Source de données : FAO-UNESCO, 2007).

### 1-1-8. Pédologie

D'après les travaux de Kanev (1972) sur Djebel Boutaleb, deux grands types de sols rencontrés dans le massif de Boutaleb : les sols minéraux bruts (lithosols et régosols) et les sols calcimagnésiques (sols bruns calcaires et calciques) (Figure 17).

- ❖ **Les sols minéraux bruts :** Les sols minéraux bruts ou sols peu évolués, possèdent des caractères encore très proche de ceux de la roche mère. Ils sont constitués par des débris, sans apport notable de matière organique. Ils résultent le plus souvent, d'érosion qui permet la formation des régosols et lithosols. Ces sols sont dépourvus de végétation principale, mais comportent des formations secondaires dégradées (matorrals, garrigues, steppes à Armoise et à Alfa). Ils se subdivisent en deux types :

- 
- ↪ **Les sols d'érosion lithiques** : Ils sont développés sur un matériel minéral et subissent une érosion accentuée. Ces sols sont répondus sur le versant Sud du massif ;
  - ↪ **Les sols d'érosion régosoliques** : Ces sols développés sur roche tendre sont observés sur les versants Sud et Nord très pentus avec une érosion très prononcée, présentent des contraintes très sévères par une profondeur très faible (inférieure à 15 cm).
  - ❖ **Les sols calcimagnésiques** : Selon Duchaufour (1977) « les sols calcimagnésiques brunifiés sont des sols qui sont formés aux dépens de matériaux plus pauvre en calcaire et plus riche en éléments silicatés fins, notamment l'argile ». On distingue deux types : les sols bruns calcaire et bruns calcique, la distinction entre les deux est la présence ou l'absence du calcaire actif dans la terre fine (Sedjar, 2012).
    - ↪ **Les sols bruns calcaires** : Ils sont caractérisés par un horizon humifère foncé, dont la couleur est bien prononcée, qui surmonte des matériaux à structure polyédrique généralement bien développée, avec une certaine quantité de carbonate ( $\text{CaCO}_3$  actif) mais qui est relativement faible et une texture lourde. Ces sols sont répondus dans la vallée Ferareh, Arras et Ouled Abd Allah au Nord. On les trouve aussi au niveau de Djebel Bouich au Nord-ouest du massif, au niveau d'Annoual, à El Hamma au Sud-est et le long de l'Oued de Soubella à l'Ouest. Ces terrains sont relativement frais et boisés mais la végétation est sous forme de matorral (Merikhi, 1995) ;
    - ↪ **Les sols bruns calciques** : Ils sont caractérisés par un horizon foncé enrichi en matière organique qui surmonte un horizon minéral également foncé à structure granulaire et à texture lourde. Ces sols, contrairement aux sols bruns calcaires, sont décarbonatés et occupent une grande extension du massif. On les rencontre à Bou Rhioul, à Bouich, au niveau d'Arras. la végétation qui les tapisse est de type forêt, matorral et pelouse.



**Figure 17.** Les grands types de sols de Djebel Boutaleb (Gharbi ,2021)  
(Source de données : FAO-UNESCO, 2007).

### 1-1-9. Flore et végétation

Trois principales formations végétales se rencontrent dans le massif de Boutaleb : la cédraie, la chênaie verte et la pinède de pin d'Alep avec leurs différents états d'évolutions.

La végétation arborescente est représentée par les forêts de *Cedrus atlantica* Manetti. et de *Pinus halepensis* Mill. A cette formation s'ajoutent des matorrals élevés, denses, troués, et clairs à base de chêne vert et pin d'Alep sur le versant Nord.

D'après les travaux de Zerroug (2012 et 2020), le versant Sud est caractérisé par la présence d'une formation mixte de *Quercus ilex* L. et *Pinus halepensis* Mill. (*Quercus ilex* L. domine dans les concavités et le *Pinus halepensis* Mill. domine dans les convexités) entre 1200 et 1600 m et une pinède pure, jeune et dense entre 1000 et 1200 m.

### 1-1-10. Les étages de végétation

En se basant sur les travaux effectués dans le bassin Méditerranéen (Ozenda, 1975, Quezel, 1976 et 2000, Quezel et Médail, 2003), les données de la conservation des forêts de Sétif, les caractères climatiques thermiques ainsi que sur la structure de la végétation présents, nous avons retenu les étages de végétation suivant :

- ☉ **L'étage Méso-méditerranéen** : Il est compris entre 1000 et 1300 m d'altitude. Les types de végétation qui prédominent sont :

- Matorral à *Rosmarinus tournefortii* de Noé., *Globularia alypum* L. et *Thymus ciliatus* Desf. et *Pistacia lentiscus* L., *Phillyrea angustifolia* (L.) Rouy., *Ampelodesmos mauritanicus* (Poir.) T. Durand et Schinz. et *Juniperus phoenicea* L. entre 900 et 1100 m (Chermat, 1999) ;
- Forêt de pin d'Alep entre 1000 et 1200 m sur le versant Nord et entre 1000-1200 sur le versant Sud ;
- Matorral élevée à base de chêne vert et pin d'Alep situé entre 1200-1300 m.
- Ⓢ **L'étage supraméditerranéen** : S'étend entre 1300 et 1800 m d'altitude. Cet étage regroupe les formations à *Quercus ilex* L. et *Cedrus atlantica* Manetti ;
- Ⓢ **L'étage montagnard-méditerranéen** : L'étage montagnard- méditerranéen s'observe surtout en exposition Nord, au-delà de 1800 m. La végétation est constituée de xérophytes épineux tels que *Bupleurum spinosum* Gouan., *Erinacea anthyllis* Link. et quelques pieds de cèdre dépéri.

## 1-2. Djebel Youssef

### 1-2-1. Situation géographique

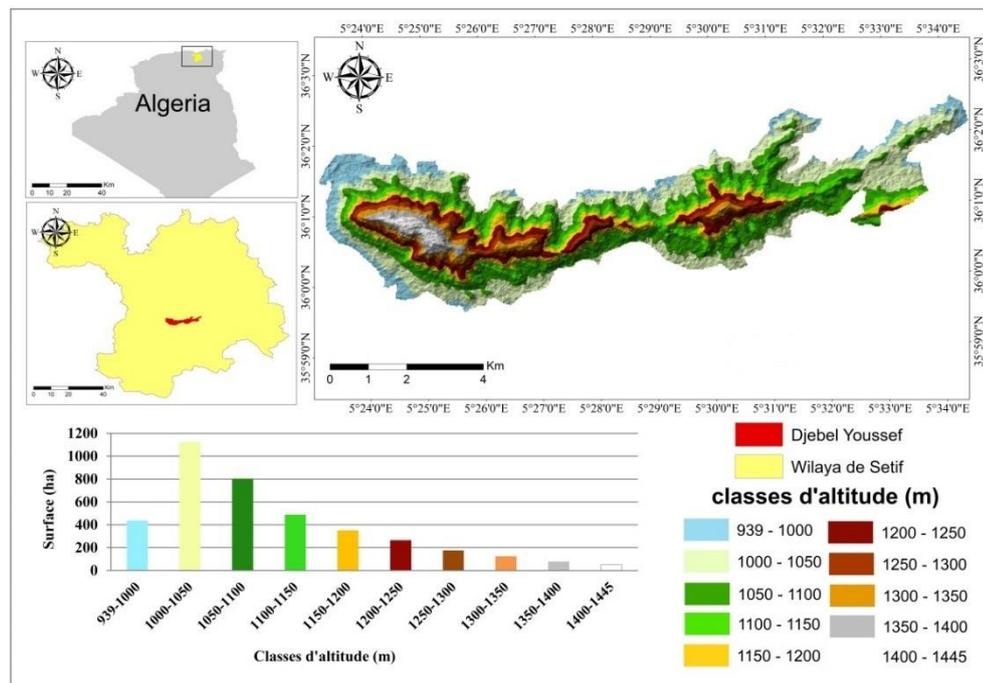
Djebel Youssef appartient au domaine Nord-Africain steppique, qui correspond au domaine Mauritanien Steppique de Maire (1926) ou au domaine Maghrébin Steppique proposé par Barry *et al.*, (1974). Ce domaine relève de la région méditerranéenne et de l'empire holarctique. (Chermat, 2013). Il est situé entre la latitude Nord 36°1'0'' et la longitude Est 5°29'0''. Il appartient administrativement à la daïra d'Ain – Oulmene (partie Ouest) et celle d'El-Eulma (partie Est) (Figure 18).

Djebel Youssef fait partie des Hautes Plaines Sétifiennes où l'influence steppique est assez marquée. Il est localisé à une vingtaine de km à l'Est du Djebel Zdim. Il s'étend sur une dizaine de km d'Est vers l'Ouest et s'élève à 1445 m à peu près en couvrant près de 3900 ha (Chermat 2013).

D'après les données de la conservation des forêts de la wilaya de Sétif, A l'Ouest, il est limité par sebkhet Melloul, à l'Est, par djebel Gueta et sebkhet Bazer, au Nord, il est bordé par une vaste plaine parcourue par l'oued Guedjel et l'oued Ben Diab et au Sud, par dépressions salines de sebkhet El Hamiet, le chott EL Fraïn et le djebel Sekrine.

### 1-2-2. Relief

Ce massif présente une homogénéité du relief visible, de direction Sud -est, mais avec une forme arquée à concavité tournée vers le Nord. Il se trouve en contact de deux ensembles structuraux, la plateforme des plaines Sétifiennes au Nord et les dépressions salines (chotts et sebkha) au Sud. Ses reliefs, très pentus, favorisent les crues et le décapage superficiels des sols. Ses altitudes sont comprises entre 939 m et 1445 m, occupant 73 % de la surface totale du massif (939-1150m) et 27 % pour les autres altitudes (entre 1150 et 1445 m) (Figure 18).

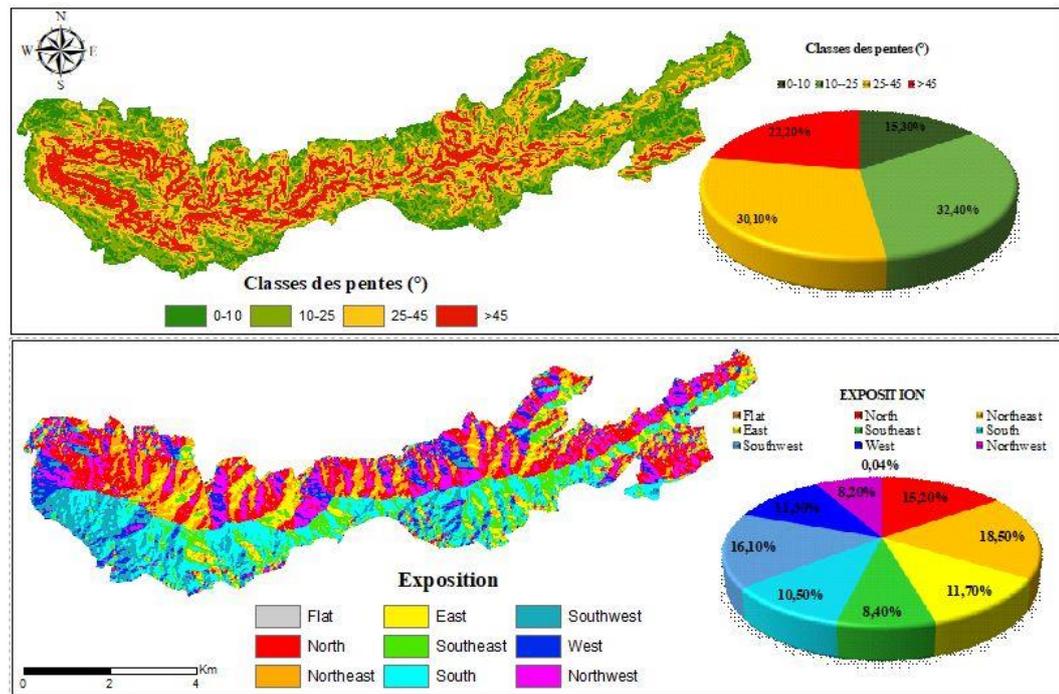


**Figure 18.** Localisation géographique de Djebel Youssef (Gharbi ,2021).

### 1-2-3. Pente et exposition

La figure 19 montre que Djebel Youssef est caractérisé par un relief accidenté avec la présence de quatre classes de pentes. Les classes dominantes sont celles comprises entre  $10^\circ$  et  $25^\circ$  et entre  $25^\circ$  et  $45^\circ$  avec 32,4% et 30,1 % respectivement. Suivi par la classe des pentes ( $>45^\circ$ ) avec 22,2% et enfin ( $0-10^\circ$ ) avec 15,3% de la superficie totale du massif.

En ce qui concerne l'exposition, la même figure montre que l'exposition Nord-est est la plus dominante avec un taux de 18,5%, suivi par l'exposition Sud-ouest et Nord avec 16,1% et 15,5% respectivement. Pour les autres expositions le taux varie de 8,2% et 11,7%.

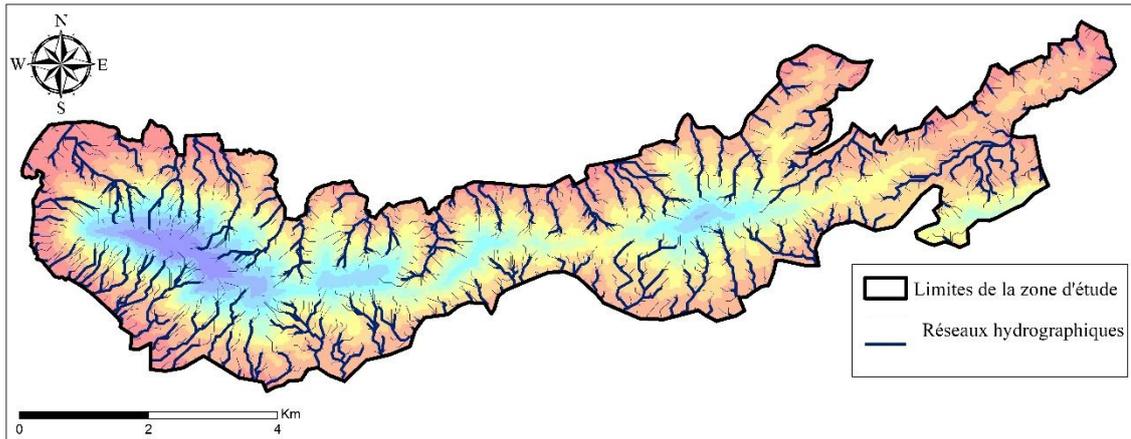


**Figure 19.** Carte des classes et d'exposition des pentes de Djebel Boutaleb (Gharbi ,2021).

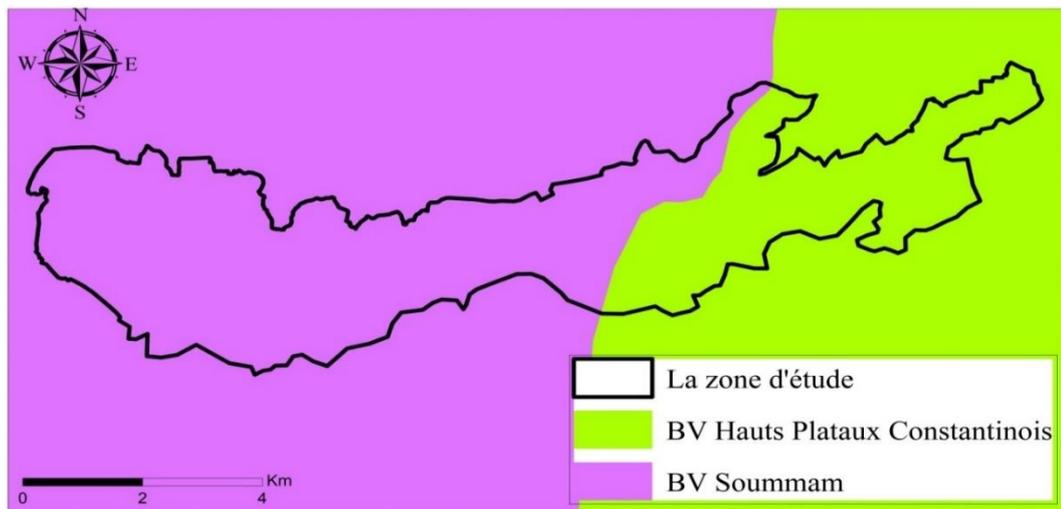
#### 1-2-4. Réseau hydrographique et bassins versant

Le réseau hydrographique est organisé dans sa totalité en un système endoréique. Les divers Oueds correspondent à des cours d'eau temporaires à écoulement principal sous forme de crues. Ils drainent le massif vers les Oueds permanents, pour le versant Nord, vers les dépressions fermées pour le versant Sud. Le régime hydrique est très variable suivant la pluviométrie : des années pluvieuses et d'autres sèches (Figure 20). Parmi les Oueds permanents : Oued Ben Diab draine le Nord de Djebel Youssef et se déverse dans l'Oued Guellal (Chermat, 2013).

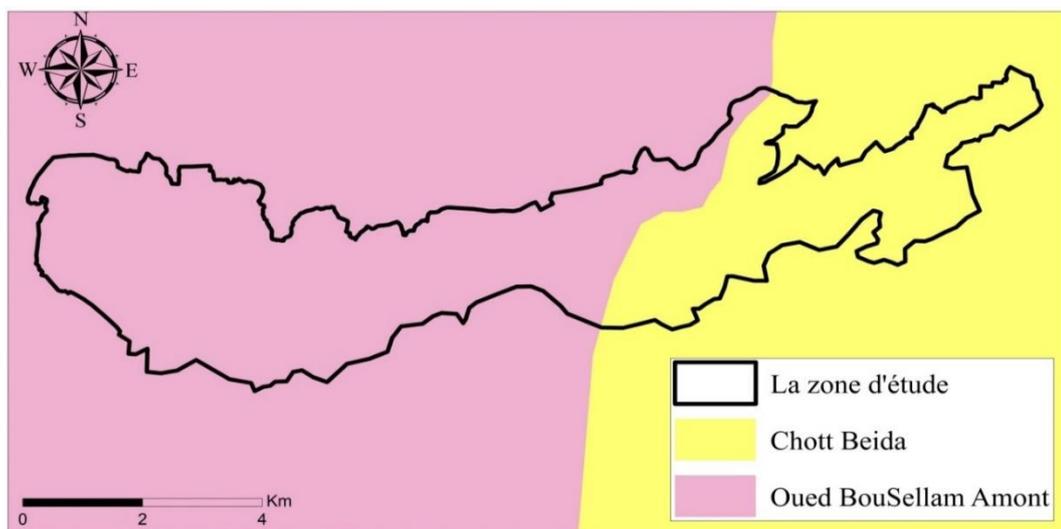
Les figure 21 et 22 montrent que le territoire de Djebel Youssef se subdivise en deux bassins versants : Hauts Plateaux Constantinois et Soummam, et deux sous bassins versant : Chott Beida et Oued Bouselam Amont.



**Figure 20.** Carte de réseau hydrographique de Djebel Youssef (Gharbi ,2021).



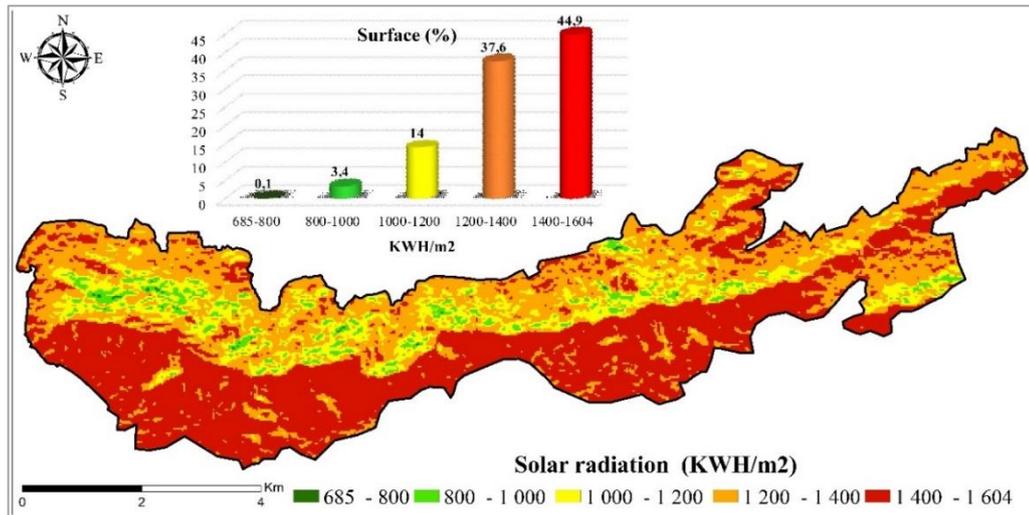
**Figure 21.** Carte des grands bassins versants de Djebel Boutaleb (Gharbi ,2021).



**Figure 22.** Carte des sous bassins versants de Djebel Boutaleb (Gharbi ,2021).

### 1-2-5. Rayonnements solaires

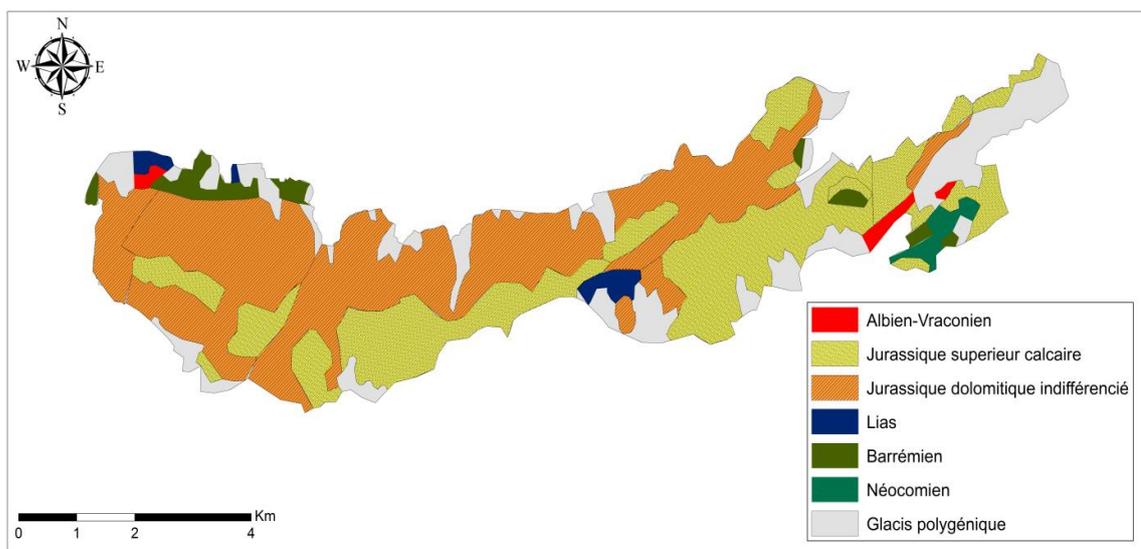
La figure 23 montre que le rayonnement solaire est beaucoup plus élevé dans les hautes altitudes et les orientations Sud, et Sud-est avec une valeur varie entre 1400 et 1604KWH/m<sup>2</sup>. La quantité la plus faible a été observée dans les basses altitudes et les orientations Nord et Nord-ouest.



**Figure 23.** La quantité du rayonnement solaire annuel de Djebel Youssef (Gharbi ,2021).

### 1-2-6. Géologie

Djebel Youssef relève essentiellement du tertiaire, il appartient à l'ensemble allochtone Sud-Sétifien. L'ensemble des formations sont d'âges différents (Glaçon, 1967) (Figure 24).



**Figure 24.** Carte géologique de Djebel Youssef (Gharbi ,2021)

(Source de données : FAO-UNESCO, 2007).

Le Barrémien se maintient dans le Nord-ouest et dans le Sud-est avec l'albien vraconien et le néocomien. Le jurassique supérieur, essentiellement calcaire, durant lequel est émergé le versant Sud, avec des dolomies massives du lias médian (Chermat, 2013). Le versant Nord, le centre et le Sud-ouest sont recouverts par une série jurassique dolomitique et enfin le glaciaire polygénique pour le reste du massif.

### 1-2-7. Pédologie

Le Sud de Sétif, comporte des sols essentiellement calcaires avec le plus souvent, des accumulations calcaires dures proches de la surface (Lahamar *et al.*, ; Chermat, 2013). Ces sols ont généralement un horizon de surface peu épais et squelettiques pauvres en matière organique. Les sols de Djebel Youssef sont peu profonds caillouteux de deux types (O.T.I, 1974 ; Chermat, 2013) : les dolomies noires litées à intercalation de calcaires marneux à la base et des calcaires au sommet.

### 1-2-8. Flore et végétation

Selon Chermat (2013), trois ensembles physiologiques qui se trouvent au niveau de Djebel Youssef suivant un gradient altitudinal :

- ↳ La présence de matorral sur son versant Nord et Nord-Ouest occupant les altitudes entre 1270 et 1400m ;
- ↳ Steppe à *Artemisia herba-alba* Asso qui est observée entre 1000 et 1250m d'altitude sur le flanc Nord et Steppe à *Stipa tenacissima* L. et *Launaea acanthoclada* Maire. sur le versant Sud ;
- ↳ Formation rupicole qui occupe les falaises rocheuses à exposition Nord,

### 1-2-9. Les étage de végétation

Il semble plus logique de rattacher la végétation de notre zone au méso-méditerranéen semi-aride continental Chermat (1999). Suivant Ozenda (1975) qui considère les steppes situées à 1000 m d'altitude à base d'Alfa, de Sparte et d'Armoise blanche comme la forme semi-aride du Méso-méditerranéen, cet étage couvre la totalité de notre zone il oscille entre 900 m et 1400m d'altitude sous forme d'un matorral bas et de steppes semi-arides (steppes arborées et steppes mixtes).

## 2. Climat et bioclimat

### 2-1. Caractéristiques et origine des données climatiques

Selon Legrain (2002), le climat est l'ensemble des phénomènes météorologiques (température, pression, vent, précipitation) qui caractérisent l'état de l'atmosphère et son évolution en un lieu donné. Il joue un rôle primordial dans la répartition et le développement du couvert végétal et la nature du sol.

En raison de l'absence de station et de poste météorologique dans Djebel Boutaleb et Djebel Youssef, nous avons utilisé les données qui proviennent de l'office national de la météorologie de Sétif (O.N.M) couvrant une période de 34 ans (de 1984 à 2018) (Tableau 04). Et pour plus de précision sur les paramètres climatiques qui caractérisent notre zone délimitée et prenons l'O.N.M de Sétif comme station de référence. Nous avons procédé à des extrapolations sur deux paramètres les plus significatifs pour le développement de la végétation : les précipitations et la température.

Pour la caractérisation des autres paramètres de l'enneigement, la température du sol, les gelées et le vent, nous avons utilisé les données de Chermat (2013) qui couvrent une période de 24ans (1985-2009). Ceci s'explique par le non accessibilité aux données climatiques coïncident avec la période de pandémie du Covid-19.

**Tableau 04.** Caractéristiques de la station de Sétif (Ain Arnet)

Station ONM	Latitude (x)	Longitude (y)	Altitude (m)
Sétif	36° 11' Nord	5° 15' Est	1030

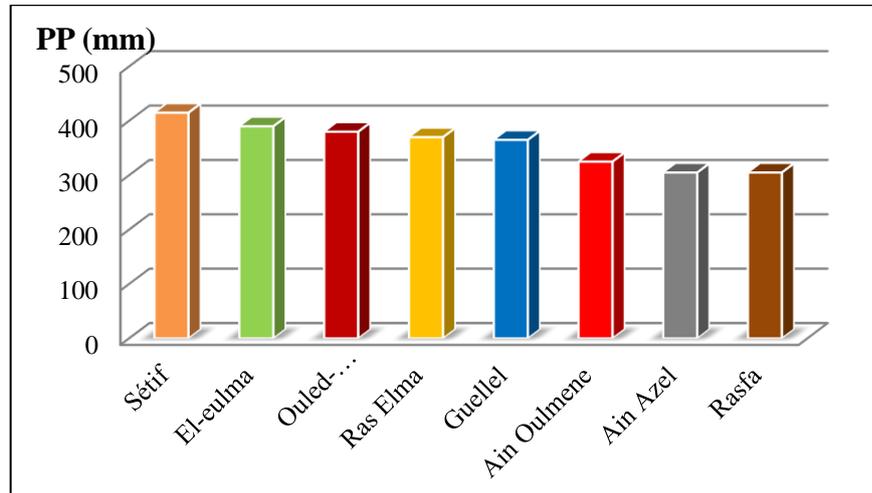
### 2-2. Régime pluviométrique

Les précipitations sont définies comme la source principale d'eau (formes variées sous lesquelles l'eau solide ou liquide contenue dans l'atmosphère se dépose à la surface du globe : pluie, brouillard, neige, grêle...) (Legrain, 2002).

Elles sont caractérisées par trois principaux paramètres : leur volume, leur intensité, les mois et les années. Ils constituent un facteur important dans la vie des plantes et le déterminisme des types de végétations (Ramade, 1994 ; Nedjar et Zouatine, 2019).

### 2-2-1. Répartition spatiale de la pluviométrie

La région de Sétif reçoit en moyenne entre 500 mm, pour la zone Nord et 200 mm par an pour la zone Sud. Le régime pluviométrique est caractérisé par de fortes variations annuelles et interannuelles (Chermat, 2013) (Figure 25).



**Figure 25.** Moyennes des précipitations annuelles en mm (1985 -2009).

### 2-2-2. Les régimes pluviométriques mensuels

Les pluies sont irrégulièrement réparties à la fois dans le temps et dans l'espace. L'examen de l'évolution des précipitations régionales montre trois mois de déficit hydrique, allant de juin à août avec la plus faible valeur de 11,1 mm qui est enregistrée en juillet. Les plus grandes valeurs de précipitations sont enregistrées dans la zone d'étude sont caractéristiques du mois de décembre et celui de janvier avec respectivement 44,7 mm et 41,8 mm (Tableau 05).

D'une manière générale, la variabilité pluviométrique de la zone d'étude est à l'image de celle de la zone des Hautes Plaines Sétifiennes et de la région semi-aride dans sa globalité (Chermat, 2020).

**Tableau 05.** Moyennes mensuelles de précipitations de Sétif (mm) entre (1984-2018).

Mois	Janv	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
P (mm)	41,8	37,5	37	41,1	44,7	21,7	11,1	14,5	39,1	34,1	35,1	44,4

### 2-2-3. Régime pluviométrique saisonnier

Selon Daget (1977), un climat est méditerranéen si la somme des précipitations de l'été est la plus faible des quatre saisons. L'examen de la figure 26 montre qu'il y a une concentration des précipitations durant la saison hivernale. Le régime saisonnier est de type HP AE, ceci confirme une fois de plus le régime pluviométrique méditerranéen.

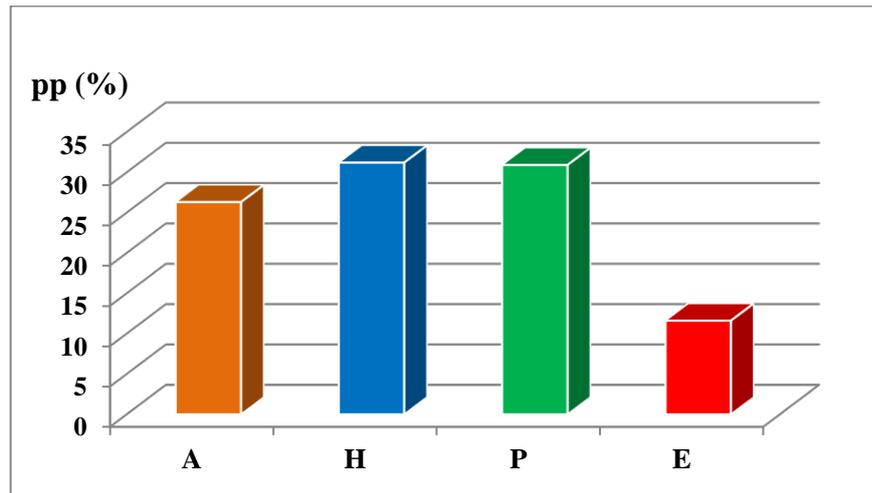
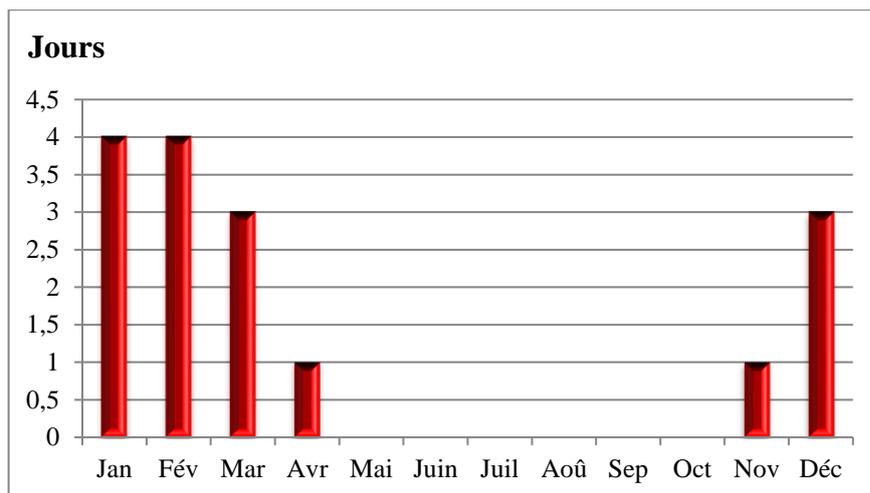


Figure 26. Régimes saisonniers des précipitations de la wilaya de Sétif (1984-2018)

### 2-3. Enneigement

La quantité et la durée d'enneigement en Algérie décroît du Nord au Sud. La moyenne annuelle du nombre de jours de neige est de 16 jours (Figure 27). Ce paramètre hydrique persiste sur le sol 5 à 10 jours (Chermat, 2013). Plus la durée de l'enneigement est importante plus l'alimentation en eau du sol est meilleure. La période d'enneigement se situe entre le mois de novembre et avril.



**Figure 27.** Nombre de jours de neige (station de Sétif) (1985-2009).

## 2-4. Le régime thermique

### 2-4-1. Température de l'air

La température est un paramètre climatique qui conditionne la répartition, la croissance, l'activité végétative et la reproduction des êtres vivants.

D'après le tableau 06, on observe que, pour la station de Sétif, le mois le plus chaud est celui de juillet avec une température de 34 C° alors que la température la plus basse est relevée en janvier, le mois le plus froid, avec -0,1C°. Il y a lieu de remarquer que les plus fortes chaleurs coïncident avec les précipitations les plus faibles (mois de juillet et août). La valeur la plus élevée de l'amplitude thermique a été enregistrée en mois de juillet avec 16,7 C°.

**Tableau 06.** Moyennes mensuelles de la température de l'air dans la wilaya de Sétif

	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Moy
<b>M (C°)</b>	10	11,35	14,52	18	23,52	29,7	34	33,4	27,5	21,32	14,91	10,7	20,74
<b>m (C°)</b>	-0,1	0,43	2,58	4,9	9,03	13,8	17,3	17,42	13,52	9,39	4,13	0,81	7,7
<b>M-m (C°)</b>	10,1	10,92	11,94	13,1	14,49	15,9	16,7	15,98	13,98	11,93	10,78	9,89	12,98
<b>(M+m) /2 (C°)</b>	4,95	5,89	8,55	11,45	16,28	21,75	25,65	25,41	20,51	15,36	9,52	5,755	14,26

**M-m** = amplitude thermique (C°).

### 2-4-2. Température du sol

Pendant la saison sèche et au cours de la journée la terre se réchauffe plus vite, le maximum est de 47,20C° enregistrée en juillet, il coïncide avec le maxima atmosphérique. Le phénomène s'inverse pendant la saison froide car la terre se refroidit plus rapidement que l'atmosphère et en relève des températures souvent négatives de l'ordre de -7,3 C° en janvier (Cheremat, 2013) (Tableau 07).

**Tableau 07.** Moyennes mensuelles de la température du sol.

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Moy
<b>M (C°)</b>	21,56	24,65	30,63	35,36	41,36	46,58	47,2	45,58	42,04	34,72	27,38	20,8	34,82
<b>m (C°)</b>	-7,29	-7,04	-6,07	-4,12	-0,16	3,4	8,04	9,05	4,89	1,8	-3,96	-5,67	-0,59
<b>(M+m) /2 (C°)</b>	7,14	8,8	12,28	15,62	20,6	24,99	27,62	27,31	23,46	18,26	11,71	7,56	17,11

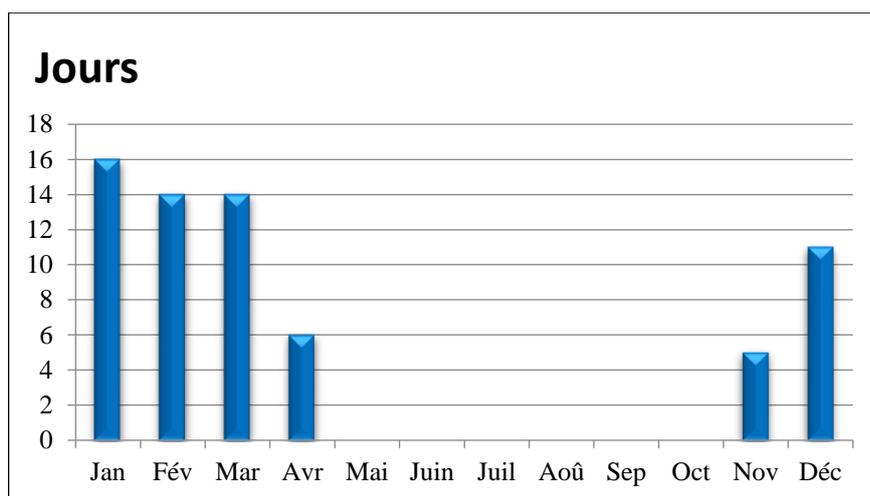
**m** = Moyenne mensuelle des températures minimales sous abri (C°).

**M** = Moyenne mensuelle des températures maximales sous abri (C°).

**(M+m) /2** = Moyenne mensuelle des températures C(°).

### 2-5. Les gelées

Une composante physique, fréquente pendant l'hiver et le printemps. Le nombre de jour de gelées est en moyenne de 66 jours. Le maximum a été enregistré durant le mois de janvier. La durée des gelées au printemps est de 20 jours avec un taux de 14 jours durant le mois de mars ce qui est néfaste pour les jeunes plantes surtout les herbacées (Figure 28). Selon Le Houérou (1969), les risques de gelées deviennent plus importants à partir de  $m=1C^{\circ}$ .



**Figure 28.** Nombre de jours moyen des gelées (1985-2009)

## 2-6. Le vent

Selon Letreuche *et al.*, (1991), les vents exercent sur la végétation en place une influence considérable par leur fréquence, leur intensité, leur vitesse, leur température et leur degré hygrométrique.

Dans la région de Sétif, les vents sont fortement influencés par les conditions topographiques locales. D'après le tableau 08, la vitesse du vent la plus violente a lieu en novembre avec 3,7 m/s alors que la vitesse la plus faible est celui du mois d'octobre avec 2,8 m/s. La vitesse moyenne annuelle calculée pour la période étudiée est de 3,3 m/s.

**Tableau 08.** Vitesses moyennes mensuelles des vents

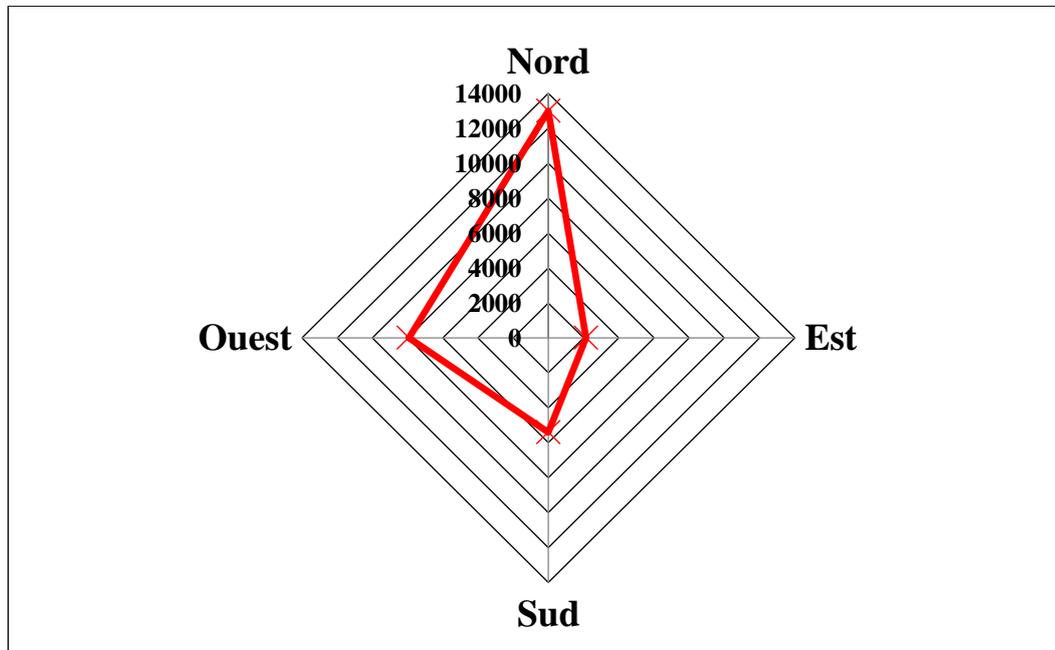
Mois	Janv	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Moy
Vitesse (m/s)	3,2	3,5	3,5	3,5	3,4	3,3	3,2	3,2	3	2,8	3,7	3	<b>3,3</b>

Les vents soufflent à partir de quatre directions principales (Chermat, 2013) :

- Le vent du Nord est le plus important (Figure 29). Ils soufflent surtout en hiver en pénétrant la zone par la plaine Sétifienne en favorisant ainsi des chutes de neiges pendant la saison froide, ce vent est chargé d'humidité par la suite de son passage sur la mer ;
- Le vent du Sud « Sirocco » chaud et sec souffle surtout en Eté et dure plus de 45 jours par an, en accentuant la saison sèche et ramenant des quantités appréciables de sable.

Ce vent provoque le dessèchement des sols en entraînant une forte évapotranspiration des végétaux ;

- Les vents d'Ouest sont importants du point de vue fréquence ;
- Le vent d'Est est moins fréquent.



**Figure 29.** Fréquences des vents (Rose des vents)

### 2-7. L'humidité

L'humidité relative mensuelle moyenne atteint son maximum en décembre (78,6 %), alors que la valeur la plus faible est celle de juillet avec 39 % au cours de la période sèche où la température atteint son maximum (Tableau 09). Ceci dénote une sécheresse relative au déficit pluviométrique sur une période de cinq mois causés par le manque d'eau nécessaire à la croissance des plantes et donc liée au taux d'humidité et à la répartition des pluies.

**Tableau 09.** Humidité moyenne mensuelle – Sétif.

Mois	Janv	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Humidité (%)	77	75,2	68,9	65,6	59,4	48,5	39	42,5	57,2	64,3	74,3	78,6

## 2-8. Extrapolation des données pluviométrique et thermique

Faute de disponibilité de station météorologique dans le secteur délimité, et en faveur de l'extrapolation des données de précipitation et de température, nous avons pu caractériser les deux massifs par l'application du gradient appliqué pour 100 m d'altitude. Ainsi nous avons calculé les données de précipitation et de température susceptibles d'être rencontrées dans ces milieux en appliquant le gradient déterminé par Seltzer (1946) et celui de Chermat (1999) en estimant l'évolution du climat entre deux périodes différentes.

### 2-8-1. La correction du gradient pluviométrique

Seltzer (1946) note que pour une élévation de 100 mètres, les précipitations augmentent de 50mm.

#### 2-8-1-1. Moyennes des précipitations mensuelles des deux stations

A partir des données des précipitations mensuelles (Pm) de Sétif, nous pouvons estimer les précipitations mensuelles (Pm) de Djebel Boutaleb et Djebel Youssef en se basant sur le principe des rapports pluviométriques mensuels au rapport annuel des précipitations (Tableau 10).

$$\mathbf{Pa1 / Pa2 = Pm1 / Pm2}$$

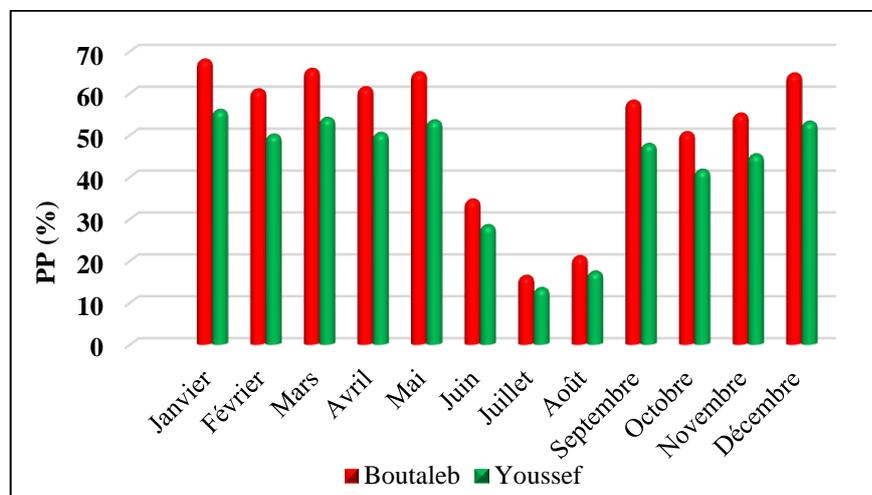
$$\mathbf{Pm1 = (Pa1 / Pa2) \times Pm2.}$$

Avec :  $\mathbf{Pa1 / Pa2 = K}$  (facteur d'ajustement).

La figure 30, montre que pour les deux stations, on observe que les deux mois secs juillet et août coïncident avec le minimum pluviométrique, ils ne reçoivent que de faibles quantités. Le maximum pluviométrique est enregistré en mois de janvier avec respectivement pour Djebel Boutaleb 67,9 mm et pour Djebel Youssef 55,9 mm.

**Tableau 10.** Coefficients de correction de la pluviométrie  
(Selon Seltzer 1946).

Altitude	Précipitations corrigées (mm)	Coefficient d'ajustement (K)
<b>Djebel Boutaleb</b>		
<b>Basse altitude</b>	245,5	0,6
<b>Moyenne altitude</b>	619,25	1,52
<b>Haute altitude</b>	830,5	2,03
<b>Djebel Youssef</b>		
<b>Basse altitude</b>	362,5	0,89
<b>Moyenne altitude</b>	511,75	1,25
<b>Haute altitude</b>	615,5	1,5

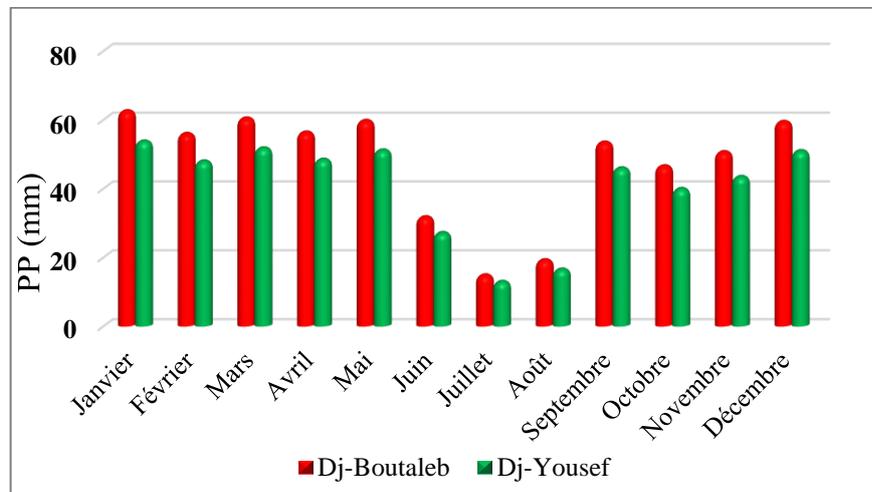


**Figure 30.** Moyennes des précipitations mensuelles des deux massifs (1984-2018).

Selon le gradient proposé par Chermat (1999), pour une élévation de 100 mètres, les précipitations augmentent de 39mm. Le tableau 11 montre les résultats des coefficients de correction de la pluviométrie :

**Tableau 11.** Coefficients de correction de la pluviométrie  
(Selon Chermat 1999).

Altitude	Précipitations corrigées (mm)	Coefficient d'ajustement (K)
<b>Djebel Boutaleb</b>		
<b>Basse altitude</b>	281,25	0,7
<b>Moyenne altitude</b>	572	1,4
<b>Haute altitude</b>	737,55	1,8
<b>Djebel Youssef</b>		
<b>Basse altitude</b>	569,85	0,9
<b>Moyenne altitude</b>	488,9	1,2
<b>Haute altitude</b>	372,51	1,4



**Figure 31.** Moyennes des précipitations mensuelles des deux massifs (1984-2018) en moyenne altitude.

Les résultats obtenus après correction de précipitation selon le gradient de Chermat (1999), montrent que le mois de juillet et août, les mois les plus secs, ne reçoivent que de faibles quantités de précipitation. La grande quantité est enregistré en mois de janvier avec 62,6 mm pour Djebel Boutaleb et 53,8 mm pour Djebel Youssef (Figure 31).

Selon ces extrapolations pluviométriques obtenues, on distingue une même répartition de la quantité de précipitation avec un déficit hydrique enregistré en utilisant le gradient déterminé par Chermat (1999). Ceci dénoté une distribution irrégulière voir un assèchement du climat expliqué par une aridité plus ou moins accentuée.

### 2-8-2. Modélisation des données de précipitations

Les données climatiques sélectionnées proviennent du programme WorldClim. C'est une base de données libre d'accès qui propose un format d'un ensemble de rasters d'une résolution (1km x 1km) définissant de multiples facteurs climatiques comme les précipitations.

#### ❖ Djebel Youssef

La carte pluviométrique de Djebel Youssef (Figure 32) montre que la quantité de précipitations est beaucoup plus élevée dans les hautes altitudes (>460mm) alors que les basses altitudes enregistrent une quantité <380mm. Concernant les autres altitudes, le taux varie entre 380 mm et 4600 mm/an.

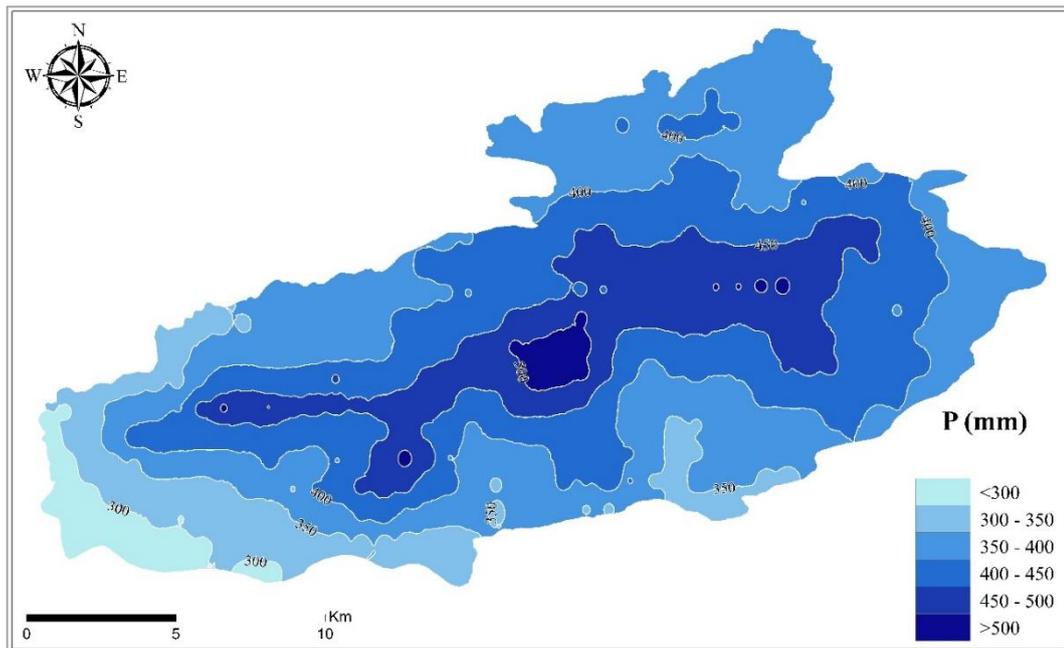


**Figure 32.** Carte des précipitations annuelles de Djebel Youssef (1970 – 2000) (Gharbi, 2021).

#### ❖ Djebel Boutaleb

La carte pluviométrique (Figure 33) montre globalement une répartition décroissante des précipitations des hautes altitudes (>500mm) vers les basses altitudes (<300mm). La quantité enregistrée dans les autres altitudes varie entre 300 mm et

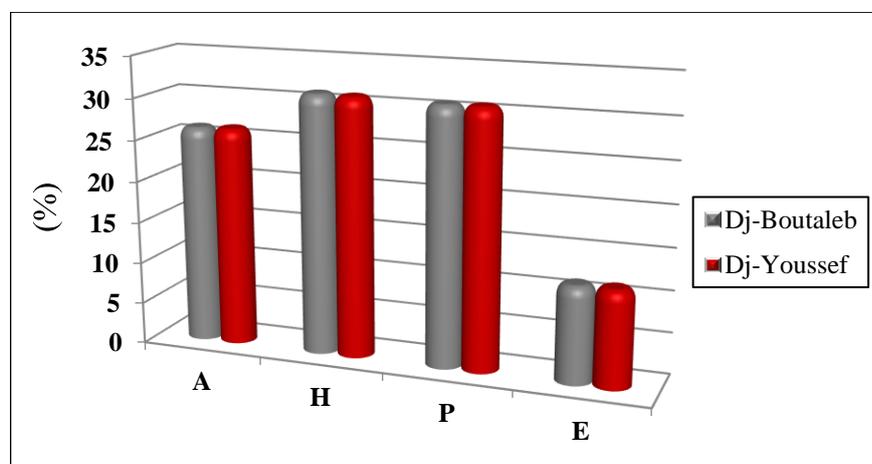
500mm/an.



**Figure 33.** Carte des précipitations annuelles de Djebel Boutaleb (1970 – 2000) (Gharbi, 2021).

### 2-8-3. Détermination du régime pluviométrique saisonnier de Djebel Boutaleb et Djebel Youssef

Selon l'arrangement des initiales des quatre saisons par ordre de pluviosité croissant, nous constatons une concentration des précipitations durant la saison hivernale. Le deuxième maximum se situe en printemps, ensuite l'automne et enfin l'Eté. Donc, les deux stations présentent un régime saisonnier de type HPAE (Figure 34).



**Figure 34.** Régimes saisonniers des précipitations de Dj. Boutaleb et Dj. Youssef (1984-2018).

## 2-9. Extrapolations des données de températures

Seltzer (1946) a proposé une diminution de  $0,7C^{\circ}$  aux températures maximales mensuelles et  $0,4$  aux températures minimales mensuelles pour une tranche de 100 m. Les tableaux 12 et 13, représentent les données thermiques extrapolées en appliquant le gradient de Seltzer.

On remarque que les températures mensuelles pour les deux massifs atteignent leur minima le mois janvier, avec une valeur de  $-1,8 C^{\circ}$  à Djebel Boutaleb et  $-0,93 C^{\circ}$  à Djebel Youssef. Quant aux maxima, ils sont enregistrés au mois de juillet avec  $31,04 C^{\circ}$  à Djebel Boutaleb et  $32,6C^{\circ}$  à Djebel Youssef.

**Tableau 12.** Extrapolation des températures mensuelles de Djebel Youssef.

	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Total	Moy
<b>M (C°)</b>	8,55	9,9	13,1	16,6	22,1	28,3	32,6	32	26,1	19,87	13,46	9,25	232	19,3
<b>m (C°)</b>	-0,93	-0,4	1,75	4,07	8,2	13	16,5	16,6	12,7	8,56	3,3	-0,02	83,3	6,94
<b>M-m (C°)</b>	9,48	10,3	11,3	12,5	13,9	15,3	16,1	15,4	13,4	11,31	10,16	9,27	148	12,4
<b>(M-m) /2 (C°)</b>	3,81	4,75	7,41	10,3	15,1	20,6	24,5	24,3	19,4	14,22	8,38	4,62	153	12,7

**Tableau 13.** Extrapolation des températures mensuelles de Djebel Boutaleb.

	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Total	Moy
<b>M (C°)</b>	7,04	8,39	11,56	15,04	20,56	26,74	31,04	30,44	24,54	18,36	11,95	7,74	213,4	17,78
<b>m (C°)</b>	-1,8	-1,27	0,88	3,2	7,33	12,1	15,6	15,72	11,82	7,69	2,43	-0,89	72,81	6,068
<b>M-m (C°)</b>	8,84	9,66	10,68	11,84	13,23	14,64	15,44	14,72	12,72	10,67	9,52	8,63	140,6	11,72
<b>(M-m) /2 (C°)</b>	2,62	3,56	6,22	9,12	13,95	19,42	23,32	23,08	18,18	13,03	7,19	3,425	143,1	11,93

Chermat (1999) propose une correction du gradient thermique, par extrapolation, pour 100 m de dénivelée une diminution de  $0,87C^{\circ}$  aux températures maximales mensuelles et  $0,9$  aux températures minimales mensuelles. Les tableaux 14 et 15 représentent les résultats obtenus respectivement pour Djebel Boutaleb et Djebel Youssef.

**Tableau 14.** Extrapolation des températures mensuelles de Djebel Boutaleb.

	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Moy
<b>M (C°)</b>	6,32	7,67	10,84	14,32	19,84	26,02	30,32	29,72	23,82	17,64	11,23	7,02	17,06
<b>m (C°)</b>	-3,9	-3,37	-1,22	1,1	5,23	10	13,5	13,62	9,72	5,59	0,33	-3,09	7,82
<b>M-m (C°)</b>	10,22	11,04	12,06	13,22	14,61	16,02	16,82	16,1	14,1	12,05	10,9	11,63	13,23
<b>(M+m) /2 (C°)</b>	1,21	2,15	4,81	7,71	12,54	18,01	21,91	21,67	16,77	11,61	5,78	1,2	10,55

**Tableau 15.** Extrapolation des températures mensuelles de Djebel Youssef.

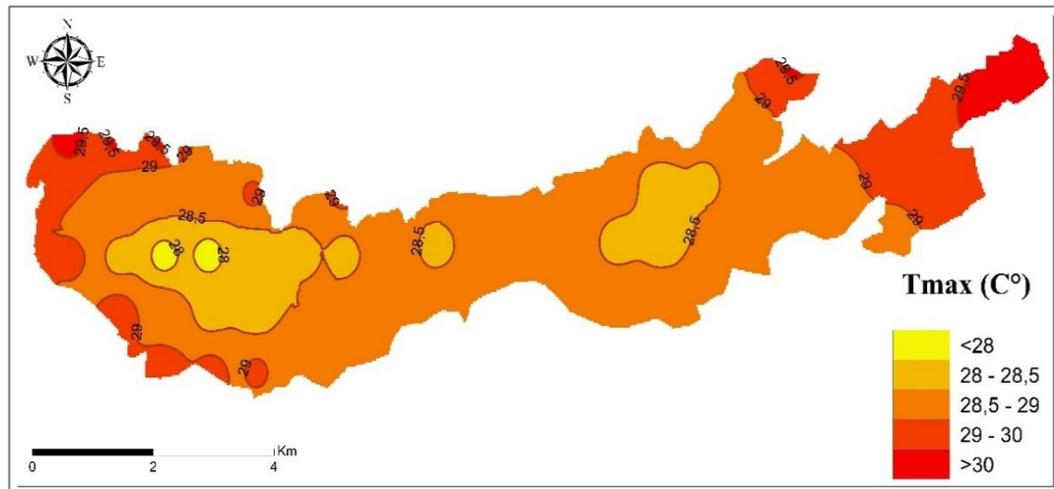
	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Moy
<b>M (C°)</b>	8,2	9,55	12,72	16,2	21,72	27,9	32,2	31,6	25,7	19,52	13,11	8,9	18,94
<b>m (C°)</b>	-2	-1,47	0,68	3	7,13	11,9	15,4	15,52	11,62	7,49	2,23	-1,09	5,87
<b>M-m (C°)</b>	10,2	11,02	12,04	13,2	14,59	16	16,8	16,08	14,08	12,03	10,88	9,99	13,07
<b>(M+m) /2 (C°)</b>	3,1	4,04	6,7	9,6	14,42	19,9	23,8	23,56	18,66	13,5	7,67	3,9	12,4

Les résultats montrent que les températures mensuelles de Djebel Boutaleb et Djebel Youssef atteignent leur minima au mois de janvier, avec une valeur de  $-3,9\text{ C}^\circ$  et  $-2\text{ C}^\circ$  respectivement. Quant aux maxima, ils sont observés au mois de juillet avec  $30,32\text{ C}^\circ$  à Djebel Boutaleb et  $32,2\text{ C}^\circ$  à Djebel Youssef.

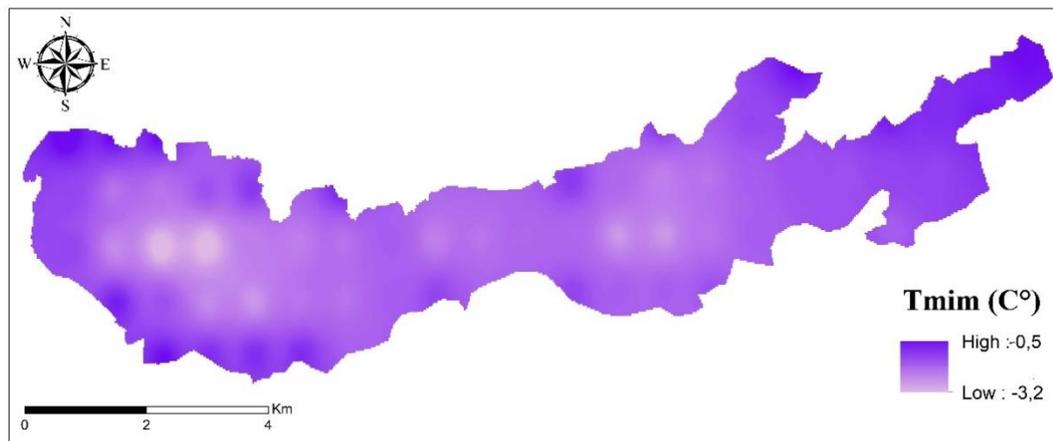
## 2-10. Modélisation des données de température

### ❖ Djebel Youssef

D'après les figures 35 et 36, on constate que la moyenne des températures maximales du mois le plus chaud de Djebel Youssef est  $>30\text{C}^\circ$  et pour les basses altitudes et  $<28\text{C}^\circ$  pour les hautes altitudes, pour ce qui est de la moyenne des températures minimales du mois le plus froid, elle est de  $-3,2\text{C}^\circ$  pour les hautes altitudes et de  $-0,5\text{C}^\circ$  pour les basses altitudes.



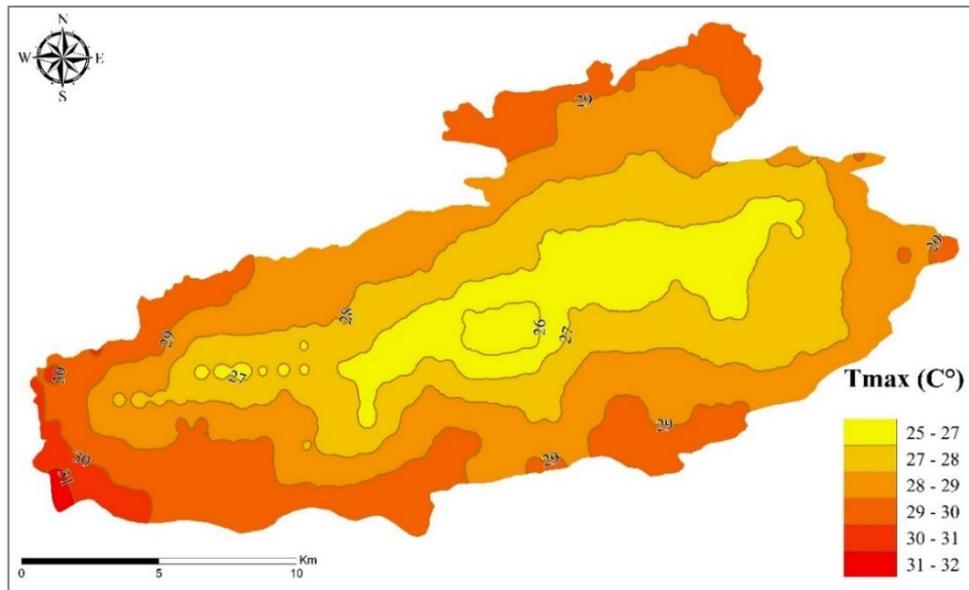
**Figure 35.** Carte de la moyenne de maxima de températures du mois le plus chaud de Jebel Youssef (Gharbi ,2021).



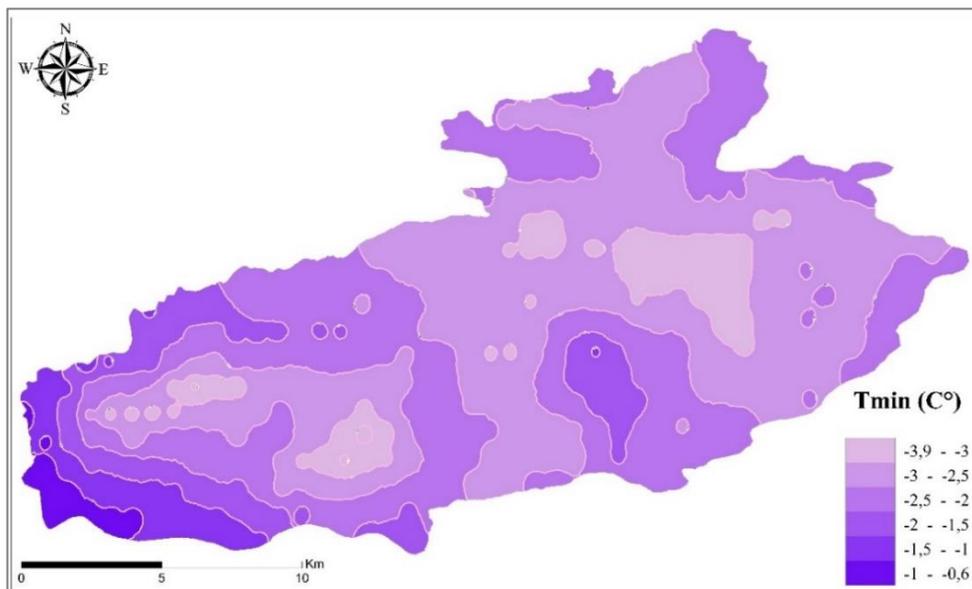
**Figure 36** Carte de la moyenne de minima de températures du mois le plus chaud de Jebel Youssef (Gharbi ,2021).

#### ❖ **Djebel Boutaleb**

La moyenne des températures maximales du mois le plus chaud comprise entre 31 et 32C° pour les basses altitudes et entre 25 et 27C° pour les hautes altitudes (Figure 37), Quant à la moyenne des températures minimales du mois le plus froid, elle est de -3 à -3,9C° pour les hautes altitudes et de -0,6 à -1C° pour les basses altitudes du massif (Figure 38).



**Figure 37.** Carte de la moyenne de maxima de températures du mois le plus chaud de Djebel Boutaleb (Gharbi ,2021).

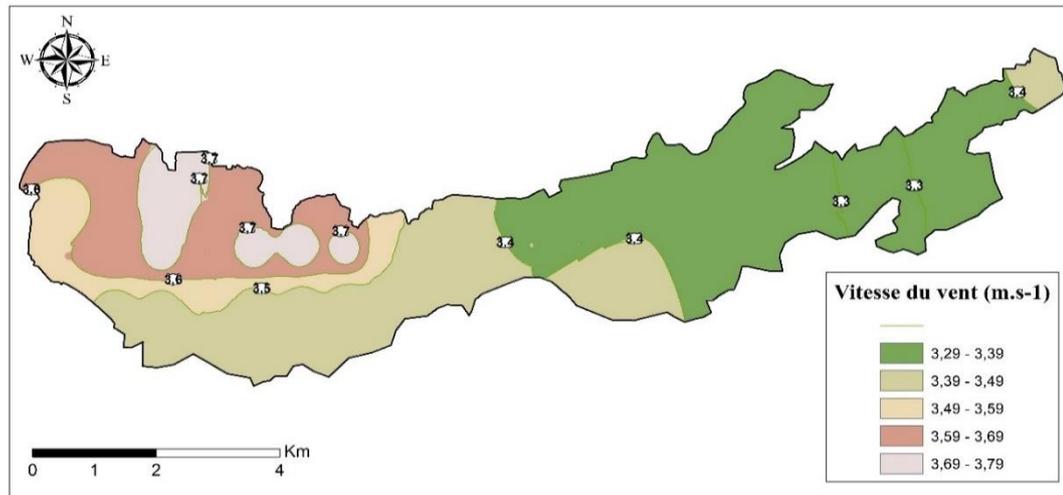


**Figure 38.** Carte de la moyenne de minima de températures du mois le plus chaud de Djebel Boutaleb (Gharbi ,2021).

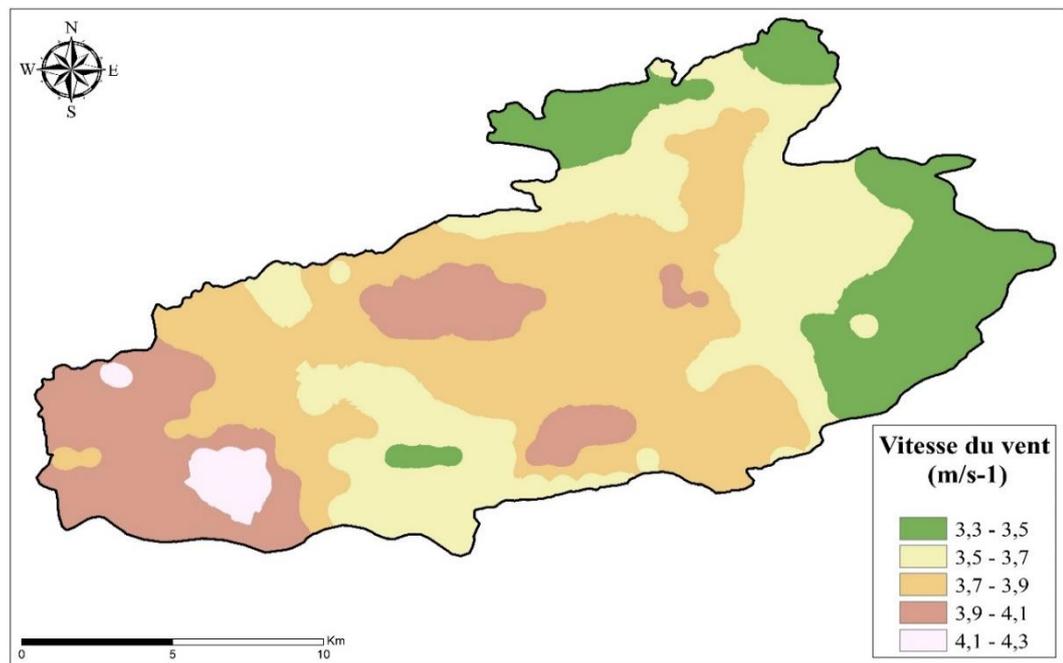
## 2-11. Modélisation des données du vent

Le vent constitue en certaines conditions un facteur écologique limitant, par leur fréquence, leur température, leurs degrés hygrométriques, les vents exercent sur la végétation forestière en place une influence considérable (Leutreuche, 1991).

Le site d'étude est soumis aux actions des vents dominants d'Ouest et Sud-ouest avec une vitesse de (3,9-4,3m/s/an) pour Djebel Boutaleb (Figure 39) et du Nord-ouest avec une vitesse moyenne de 3,59 à 3,79m/s pour Djebel Youssef annuellement (Figure 40).



**Figure 39.** Vitesse moyenne du vent dans le massif de Boutaleb (1970-2000) (Gharbi ,2021).



**Figure 40.** Vitesse moyenne du vent dans le massif de Boutaleb (1970-2000) (Gharbi ,2021).

## 2-12. Synthèse bioclimatique

Les indices climatiques les plus couramment utilisés sont basés sur les précipitations et la température. Avec ces deux paramètres disponibles pour la station de Sétif nous développons successivement :

- \* Indice de continentalité : Amplitude thermique.
- \* Climagramme pluviothermique et les étages bioclimatiques.
- \* Diagramme ombrothermique.

### 2-12-1. Indice de continentalités simple de Rivas-Martinez 2002

L'écart thermique « M – m » a une influence directe sur le déroulement du cycle biologique des végétaux. Sa valeur est écologiquement importante à connaître, car elle représente la limite thermique extrême à laquelle chaque année en moyenne les végétaux doivent résister (Djebaili, 1984).

$$IC = T_{max} - T_{min}$$

Avec :

**IC** = Indice de continentalité ;

**T<sub>max</sub>** = Température maximale du mois le plus chaud ;

**T<sub>min</sub>** = Température minimale du mois le plus froid ;

D'après Debrach (1953), quatre types de climats peuvent être calculés à partir de M et m (Tableau 17).

Avec un indice de continentalité calculé  $IC = 34,1\text{ C}^\circ$  pour la région de Sétif,  $32,84\text{C}^\circ$  pour Djebel Boutaleb et  $33,53\text{ C}^\circ$  pour Djebel Youssef, les trois stations sont soumises à un climat de type Continental et sous type Eu-continental. Si on Compare nos résultats avec celles de Seltzer (1946) on trouve que l'amplitude thermique a passé de  $32,1$  à  $34,1\text{C}^\circ$  soit une augmentation de  $2\text{C}^\circ$  pour la région de Sétif. Cela nous permet de conclure que cette augmentation d'amplitude s'explique par le réchauffement climatique qu'a connu l'Algérie ces dernières années.

Les températures extrapolées selon le gradient de Chermat (1999), montrent que l'indice de continentalité est égal à  $34,22\text{C}^\circ$  pour le massif de Boutaleb et de  $34,20\text{C}^\circ$  pour le massif de Youssef. Les deux massifs ont le même type de climat voir le Continental et sous type Eu-continental.

**Tableau 16.** Sous types de climat selon l'indice de continentalité de Rivas-Martinez (2002)

Type	Sous type	IC
<b>Hyperocéanique</b> (IC = 00 à 11)	Fortement hyperocéanique	0 – 4
	Eu-hyperocéanique	4,1 – 8
	Faiblement hyperocéanique	8,1 – 11
	Semi-hyperocéanique	11,1 – 14
<b>Océanique (IC = 11 à 21)</b>	Eu-océanique	14,1 – 17
	Semi-continental	17,1 – 21
<b>Continental</b> (IC = 21 à 65)	Sous-continental	21,1 – 28
	Eu-continental	28,1 – 46
	Hyper-continental	46,1 – 65

### 2-12-2. Diagramme ombrothermique de Bagnaules et Gaussen (1957)

Selon le système proposé par Bagnouls et Gaussen (1953) un mois est biologiquement sec si, "le total mensuel des précipitations exprimées en millimètres est égal ou inférieur au double de la température moyenne, exprimée en degrés centigrades ", ainsi la période sèche est définie par la formule  $P \leq 2T$ .

Deux saisons similaires de quatre mois et demi sont déterminées pour Djebel Youssef et Djebel Boutaleb. L'analyse comparative nous indique que la période sèche s'étale du mois de mai à mi-septembre.

Les données de Seltzer (1913-1938) mettent en évidence une période sèche de 3 mois et demi. Une grande variation entre la période ancienne et la période récente (1984-2018), ce qui permet de distinguer que les dernières années sont moins arrosées et qualifiées de sécheresse intense. La quantification de cette saison permet de distinguer le débordement de la sécheresse sur le printemps et l'automne avec des températures assez élevées ce qui dénote une aridité croissante.

### 2-12-3. Le quotient pluviométrique d'Emberger (1930)

Le quotient pluviométrique est spécifique du climat méditerranéen est le plus fréquemment utilisé en Afrique du Nord. Le calcul du quotient pluviométrique Q2 d'Emberger

est nécessaire pour déterminer l'étage bioclimatique d'une station, Il est déterminé par la combinaison des 3 principaux facteurs du climat. Il est donné par la formule suivante :

$$Q_2 = 3,43 * P / (M^2 - m^2)$$

Avec :

**P** = Pluviométrie annuelle en mm.

**M** = Température maximale du mois le plus chaud (C°).

**m** = Température minimale du mois le plus froid (C°).

Les températures « M et m » sont exprimées en degré Celsius.

Emberger (1955) a mis au point un zonage du bioclimat méditerranéen du plus sec vers le plus humide. Les étages bioclimatiques sont reconnus par référence au climagramme d'Emberger (1955). Sous ce climagramme nous avons cinq étages, en introduisant le « m », ces zones bioclimatiques ont été subdivisées en variantes climatiques.

**Tableau 17.** Les quotients pluviothermiques calculés pour les deux massifs.

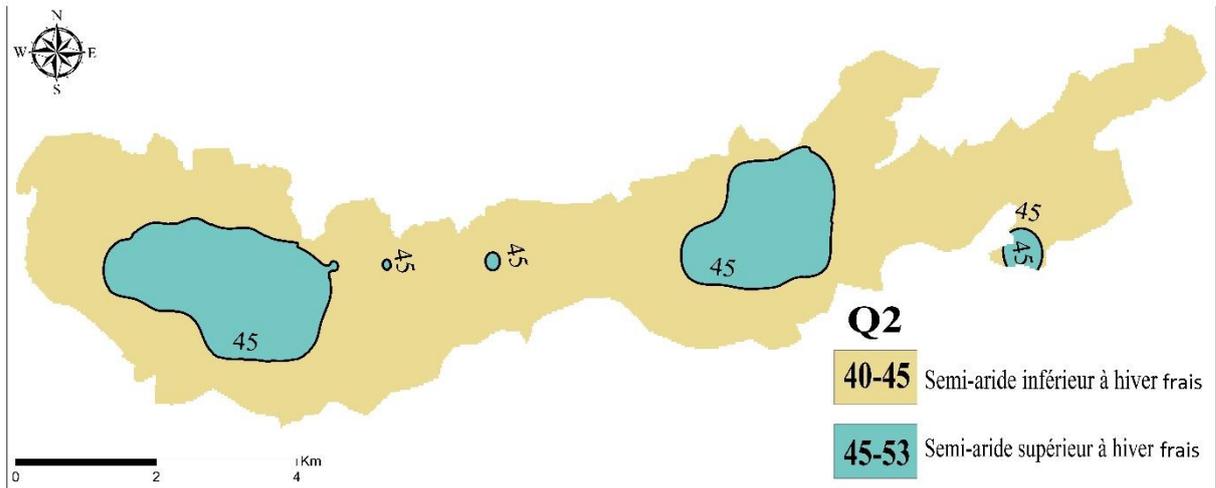
Stations	Q2
Djebel Boutaleb	57,3
Djebel Youssef	49,2

Les quotients pluviothermiques ainsi calculés pour les deux massifs ont permis de localiser Djebel Boutaleb et Djebel Youssef dans l'étage bioclimatique semi-aride inférieur à hiver frais.

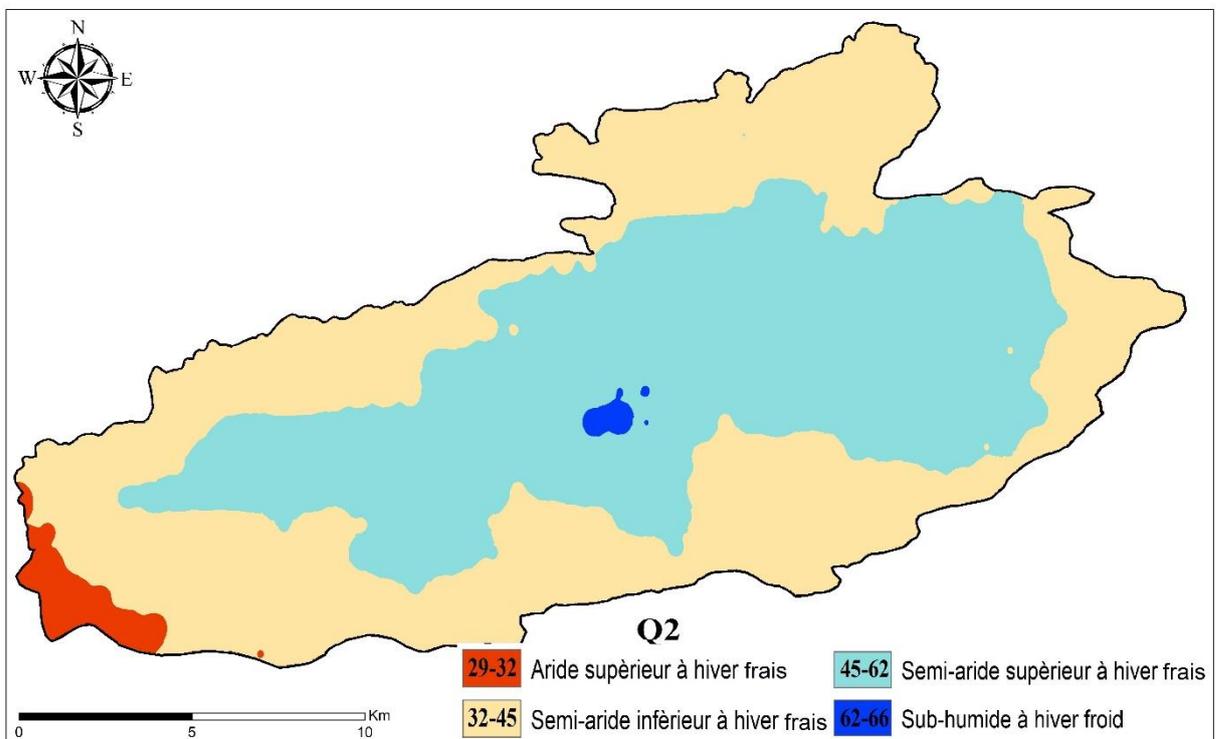
### 2-12-3-1. Modélisation des données du quotient pluviothermique

L'analyse de l'indice d'aridité Q2 d'Emberger, qui a été obtenu à partir de (Raster Calculator) du logiciel ArcGIS (10.1), montre que celui-ci est compris entre 29 et 66 pour Djebel Boutaleb et entre 40 et 53 pour Djebel Youssef. La dérivation de la carte des étages bioclimatiques montre l'existence de quatre étages bioclimatiques à hiver frais (Djebel Boutaleb) : semi-aride inférieur et supérieur qui sont les plus dominants, aride supérieur dans

la partie Sud-ouest et une petite surface de sub-humide dans les hautes altitudes (Figure 45). Concernant Djebel Youssef, il existe 2 étages bioclimatiques à hiver frais : le semi-aride inférieur et le semi-aride supérieur. L'étage bioclimatique dominant est Semi-aride inférieur à hiver frais (79.5%) de la surface totale du massif (Figure 41 et 42).



**Figure 41.** Quotient pluviothermique (Q2) de Djebel Youssef (1970-2000) (Gharbi ,2021).



**Figure 42.** Quotient pluviothermique (Q2) de Djebel Boutaleb (1970-2000) (Gharbi ,2021).

**Chapitre II :**  
Matériel et données utilisées

## **1. Les logiciels utilisés**

Dans cette partie, nous présentons les différents logiciels et outils, ainsi que les sources de données utilisées dans le cadre de notre étude.

### **1-1. ArcGIS (10.2)**

ArcGIS est un ensemble de logiciels SIG réalisé et développé par la société américaine ESRI. C'est un système complet permet de résoudre des problèmes avec l'analyse spatiale, de partager des informations grâce à la puissance de la géographie et de la visualisation et de créer des cartes intelligentes et des bases de données géographiques.

### **1-2. ENVI (5.1)**

Le "ENvironment for Visualizing Images" ENVI est un logiciel développé par le langage de programmation IDL (Interactive Data Language). Il est utilisé pour le traitement et l'analyse des images de la télédétection spatiale, de traiter de multiples types d'images et des données de satellite, la réalisation de corrections (géométrique, atmosphérique...), la fusion d'images, les transformations, le géoréférencement, Analyse de la végétation à l'aide des indices de végétation (NDVI), amélioration spectrale et spatiale d'une image, la classification (supervisée et non supervisée). (Gana, 2018).

### **1-3. Google Earth Pro (7.1)**

Google Earth est un logiciel de cartographie qui permet de visualiser la surface de la terre en rassemblant des photographies aériennes ou satellitaires en 2D ou en 3D avec une différence de résolution. Le degré de précision est plus ou moins élevé selon le lieu. Les endroits stratégiques, comme grandes villes, sont souvent très bien couverts, à tel point que l'on distingue facilement les voitures dans les rues. Il permet de télécharger de contenus géographiques à des très hautes résolutions.

### **1-4. Sas Planet**

Pour créer une carte sous un des logiciels des systèmes d'informations géographiques (SIG), on se base souvent sur des images satellites de haute résolution, soit celles de google Earth, de Bing ou autres. Sas Planet permet de visualiser et télécharger des images satellites et

cartes pour les visualiser ultérieurement en cas d'absence d'internet et il ne nécessite pas une installation.

## **2. Les Outils de Prospection**

### **2-1. L'appareil photos numérique**

Nous avons utilisé l'appareil photo numérique pour les différentes prises de vue (types d'occupation du sol, formations végétales, zones brûlées).

### **2-2. Le G.P.S (Global Positioning System)**

Système de géolocalisation par satellite. Il permet de déterminer les coordonnées géographiques de n'importe quel point situé à la surface du globe. Dans notre cas, il est utilisé pour préciser les coordonnées de différentes formations végétales afin de réaliser une carte de végétation et pour valider les résultats de la classification supervisée.

## **3. Les données utilisées**

### **3-1. Les images satellites**

Le programme américain Landsat est le premier programme spatial d'observation de la Terre. Il est développé par la NASA et l'institut des études géologiques Américain (USGS). Sept satellites Landsat ont été lancés entre 1972 et 1999 et un huitième le 11 février 2013. Les instruments embarqués sur les satellites Landsat ont permis de capturer plusieurs millions d'images (Gana, 2018).

Pour analyser l'évolution spatio-temporelle des paysages forestiers, des images multidates du satellite Landsat sont utilisées. Formant une série de quatre scènes, acquises en 1996 (TM-5), 2008 (TM-5) et 2020 (OLI-8).

Ces images ont l'avantage de couvrir l'ensemble de la zone d'étude dans une résolution spatiale suffisante pour cartographier l'évolution spatio-temporelle des paysages forestiers (30m). En outre, les mois de prise de vue (saison sèche) permettent un bon contraste spectral entre les formations herbacées claires et celles boisées denses (Solly, 2020). Ces images du satellite Landsat sont complétées par des images Google Earth et par des photographies aériennes pour compléter la photo-interprétation.

Les caractéristiques des données Landsat utilisées sont résumées dans les tableaux 18 et 19 :

**Tableau 18.** Caractéristiques générales des satellites Landsat (USGS, 2015).

<b>Caractéristiques</b>	<b>Landsat-4 et 5</b>	<b>Landsat-8</b>
<b>Instruments</b>	TM (ThematicMapper)	OLI (Operational Land Imager)
<b>Début et fin de mission</b>	Landsat-4 : 19821993	2013 à nos jours
	Landsat-5 : 19842013	
<b>Bandes spectrales</b>	-	Aérosol 0,433-0,45 $\mu\text{m}$
	(B) 0,45-0,52 $\mu\text{m}$	0,45-0,515 $\mu\text{m}$
	(V) 0,52-0,6 $\mu\text{m}$	0,525-0,6 $\mu\text{m}$
	(R) 0,63-0,69 $\mu\text{m}$	0,63-0,68 $\mu\text{m}$
	(IR) 0,76-0,9 $\mu\text{m}$	0,845-0,885 $\mu\text{m}$
	(IRM1) 1,55-1,75 $\mu\text{m}$	1,56-1,66 $\mu\text{m}$
	(IRM2) 2,08-2,35 $\mu\text{m}$	1,36-1,39 $\mu\text{m}$
	(IRT) 10,4-12,5 $\mu\text{m}$	10,3-11,3 $\mu\text{m}$
		11,5-12,5 $\mu\text{m}$
-	0,5-0,68 $\mu\text{m}$	
<b>Résolution</b>	Générale : 30 m	Générale : 30 m
	Infrarouge thermique : 120 m	Infrarouge thermique : 60 m
	-	Panchromatique : 15m

**Tableau 19.** Les bandes spectrales et leurs applications (CCT, 2008).

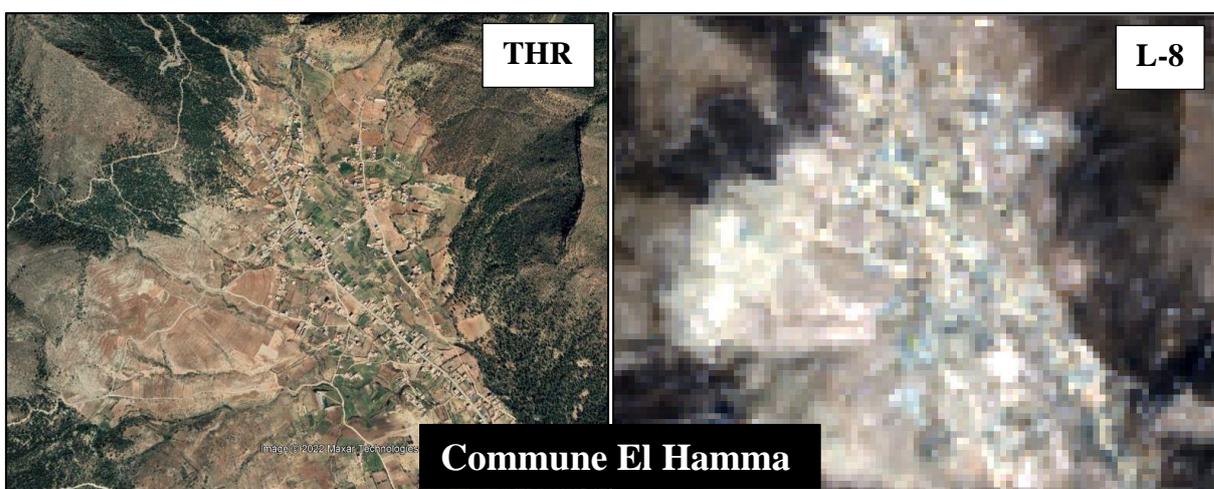
<b>Bandes spectrales</b>	<b>Application</b>
<b>Bleu (B)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Discrimination entre le sol et la végétation.</li> <li>- Cartographie côtière.</li> <li>- Identification des traits culturels et urbains.</li> </ul>
<b>Vert (V)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cartographie de la végétation verte (mesure le sommet de réflectance).</li> <li>- Identification des traits culturels et urbains.</li> </ul>
<b>Rouge (R)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- discrimination entre les espèces de plantes à feuilles ou sans feuilles ; (absorption de chlorophylle).</li> <li>- identification des traits culturels et urbains.</li> </ul>
<b>Proche Infrarouge (IR)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- identification des types de végétation et de plantes ; santé et contenu de la masse biologique.</li> <li>- délimitation des étendues d'eau et l'humidité dans le sol</li> </ul>
<b>IR de courte longueur d'onde (IRM1)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- sensible à l'humidité dans le sol et les plantes.</li> <li>- discrimination entre la neige et les nuages.</li> </ul>
<b>IR de courte longueur d'onde (IRM2)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- discrimination entre les minéraux et les types de roches ;</li> <li>- sensible au taux d'humidité dans la végétation.</li> </ul>
<b>IR thermique (IRT)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- discrimination du stress de la végétation et de l'humidité dans le sol relié au rayonnement thermique.</li> <li>- cartographie thermique.</li> </ul>

### 3-2. Les images à Très Haute Résolution (Google Earth)

Les images satellitaires avaient une résolution beaucoup plus basse que celle de Google Earth. Cela ne permettait qu'une utilisation limitée, pour classifier l'occupation du sol grossièrement ou pour détecter les structures de grande étendue. Avec les progrès technologiques continus du développement de nouveaux capteurs, on a des images satellitaires avec une résolution de plus en plus haute, et les images satellitaires actuelles à très haute résolution s'approchent de la résolution des images aériennes. En conséquence, il est possible

d'exploiter les images satellitaires pour des applications qui faisaient partie du domaine de l'imagerie aérienne jusqu'à ce jour (Fadhli, 2011).

Les images à très haute résolution permettent la détection d'objets de l'ordre du décimètre au mètre (Figure 43). Ce degré de détail, ne jamais atteint auparavant, offre un potentiel d'extraction d'autres types d'information, notamment les emplacements des souches, la taille et la répartition des trouées forestières, l'emplacement d'arbres de très grande valeur et la cartographie des zones forestières avec les pistes et les TPF. En outre, il est désormais possible de produire plus rapidement des inventaires forestiers plus précis et plus exacts (Sandro, 2009).



**Figure 43.** Comparaison entre la résolution spatiale d'une image THR et Landsat-8 OLI (Gharbi, 2022). Source des images (Google Earth, 2022 et USGS, 2021).

### 3-3. Le Modèle Numérique de Terrain (MNT)

Dans notre étude, nous avons utilisé un modèle gratuit qui est le GDEM (Global Digital Elevation Model) du satellite ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer). Il est mis en ligne depuis 29 juin 2009 par la NAZA et le ministère de l'économie, commerce et de l'industrie du Japon. Il offre une meilleure couverture géographique que le SRTM (99% contre 80%), sa résolution est de 30 mètres. Il a donc une résolution 3 fois plus fine que celle du SRTM. Sa distribution est faite en format GeoTiff de (1° x 1°) avec le système de coordonnées géographiques WGS84.

Le MNT permet de manipuler le terrain étudié de façon quantitative. Il permet de créer une représentation 3D de la surface de la zone d'étude, la création des cartes de relief, d'écoulement de l'eau, des profils topographiques.

### 3-4. Les photographies aériennes

Pour cette étude, on dispose de quelques photographies aériennes couvrant quelques parties de site d'étude issues de la couverture aérienne de 1997 à l'échelle 1 : 10.000 (Figure 44). Le problème se pose quant à leur utilisation, généralement, il est un peu difficile d'identifier les entités concernées encore moins de comparer et d'avoir des lectures assez fines.



**Figure 44.** Le versant Nord-Ouest de Djebel Youssef de l'année 1996.

(Source : département de sciences de la terre de l'université de Sétif-1, 2022).

### 3-5. La base de données climatique WorldClim

Des données climatiques historiques (1970 – 2020), avec une résolution varie entre 30 arc-secondes (environ 1 km<sup>2</sup> sur l'équateur) et 10 minutes (environ 340 km) disponible à WorldClim version ( <http://www.worldclim.org/Version2> ) ont été utilisées.

WorldClim est une base de données climatiques mensuelles, de pluviométrie, de température maximale et de température minimale, contenant les estimations des données passées, courantes et futures. L'interpolation des données climatiques a été réalisée, par les concepteurs de ces données, au moyen du logiciel ANUSPLIN 4.3, qui met en œuvre une procédure de lissage décrite par Hutchinson (1995).

Les données source utilisées par WorldClim proviennent de la compilation de plusieurs bases de données collectées à partir de stations météorologiques dans le monde :

Il faut noter que les variables incluses dans les fichiers ESRI Grids utilisés et téléchargés sont :

- **Prec** : Précipitations pour les mois de janvier à décembre (mm) ;
  - **Tmax** : Température maximale pour les mois de janvier à décembre (C°) ;
  - **Tavg** : Température moyenne pour les mois de janvier à décembre (C°) ;
  - **Tmin** : Température minimale pour les mois de janvier à décembre (C°) ;
- ⇒ **BIO** : Les dérivés des variables bioclimatiques à partir de température moyenne, T minimale, T maximale et Précipitation, sont codés comme suit :
- **BIO1** : Température moyenne annuelle ;
  - **BIO5** : Température maximale du mois le plus chaud ;
  - **BIO6** : Température minimale du mois le plus froid ;
  - **BIO12** : Précipitation annuelle.

## **Chapitre III :**

Approche méthodologique

### 1. Traitement de Modèle Numérique de Terrain (MNT)

Le MNT permet de dériver la pente, l'exposition, la topo-morphologie et d'autres caractéristiques physiques pour obtenir au final une base de données géo-spatiales comportant toutes les caractéristiques de la zone d'étude.

En effet, un GRID est un ensemble de cellules, comme une image raster est un ensemble de pixels. Chaque cellule du GRID est d'une taille donnée et contient une valeur préalablement calculée. Cette valeur peut représenter l'altitude moyenne de la cellule, ou d'autres valeurs représentant un phénomène géographique tels que : la pente, l'exposition, ...etc. (Barbier, 2006).

Donc, plusieurs cartes de dérivation peuvent être créées, parmi lesquelles :

- ↳ **La carte des pentes :** Cette carte nous permet d'interpréter les reliefs et de comprendre la morphologie d'un massif. Les classes des pentes affichées sont définies par le système, mais il est possible de reclasser les pentes grâce à l'outil reclassement ;
- ↳ **La carte d'exposition :** Cette carte, a été réalisée sous ArcGis (10.2) grâce à l'outil « aspect ». Elle permet d'identifier la direction de pente. Comme les classes des pentes, les classes d'expositions affichées sont aussi définies par le système, mais il est possible de les reclasser pour mieux refléter les variables physiques des massifs ;
- ↳ **La carte hydrologique :** Les outils d'analyse hydrologique permettent la détermination de la direction du flux et le calcul de son accumulation, la création des réseaux hydrographiques et la délimitation des bassins versants en utilisant un modèle numérique de terrain (MNT) comme entrée ;
- ↳ **La carte de visibilité :** Elle est obtenue grâce à l'outil Visibilité en basant sur les points d'observation présents dans le massif. Elle permet de savoir si l'emplacement de poste de vigie constituera un bon emplacement.

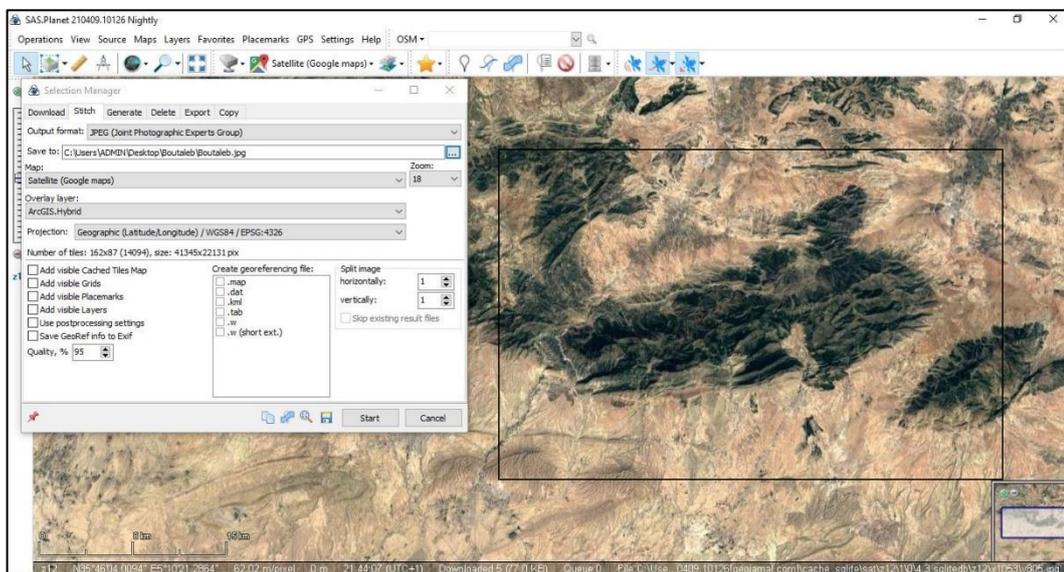
### 2. Modélisation des données climatique

Les données climatiques obtenues grâce à Worldclim, avec une résolution spatiale de 30 secondes d'arc (~1km). Elles couvrent la période de 1970 à 2000. Les variables utilisées sont la température minimale et maximale, la précipitation moyenne mensuelle, le vent et d'autres variables bioclimatiques. La carte de quotient pluviothermique est obtenue par croisement des critères prédéfinis.

### 3. Traitement des images THR

#### 3-1. Acquisition des images THR

Les images Landsat permettent de comparer les états d'occupation des sols et de détecter les différents changements au fil du temps, mais pas certains aspects physiographiques tels que : les routes, le type de peuplements forestiers, les pistes, les TPF, les fermes. Il faut, donc, utiliser des images à très haute résolution spatiale (THR) comme les images de Google Earth. Le logiciel Sas Planet qui permet de télécharger un très grand nombre des images satellites et des cartes de très haute résolution spatiale en indiquant simplement les coordonnées géographiques (latitude et longitude) et en précisant le niveau du zoom (Figure 45).



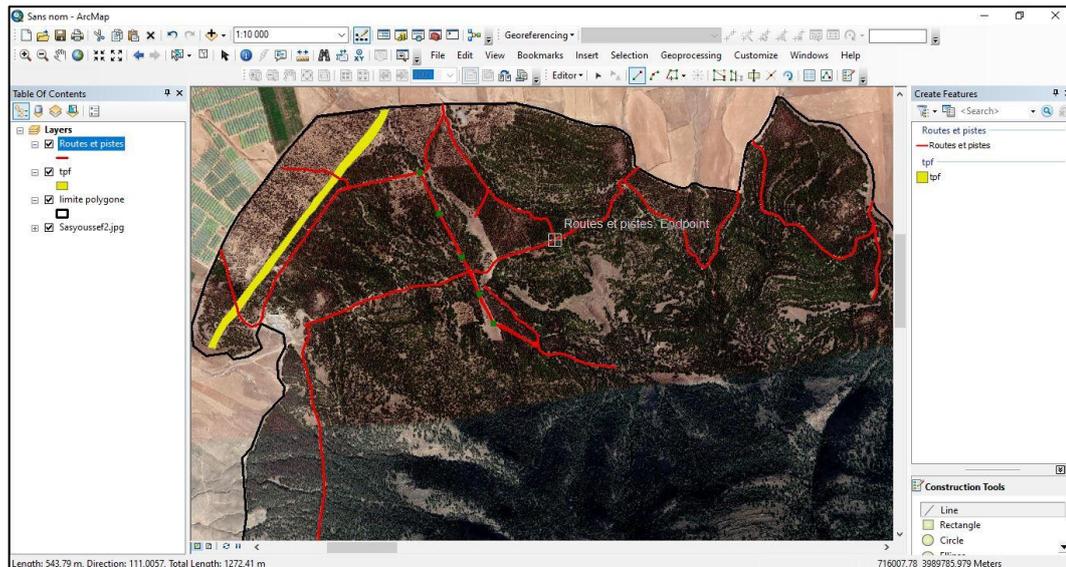
**Figure 45.** Téléchargement des images satellites avec Sas Planet (Gharbi, 2021).

#### 3-2. La digitalisation

Une fois la carte géoréférencée, on procède à la digitalisation. Cette opération consiste à numériser des points à partir d'un support visuel grâce à l'outil Editor, c'est-à-dire à attribuer à chaque point des coordonnées X et Y dans un système quelconque (ESRI, 2009).

Cette étape a pour but de créer les données, non disponibles, nécessaires à notre étude (Figure 46). Les données concernées sont :

- ✚ La carte d'occupation du sol ;
- ✚ Les routes et les pistes forestiers ;
- ✚ Réseau de défense des forêts contre les incendies (DFCI).



**Figure 46.** La digitalisation avec l’outil Editor dans le logiciel ArcMap (cas de Djebel Youssef) (Gharbi, 2022).

### 3-2-1. Carte d’occupation du sol

La carte d’occupation du sol nous permet une vue générale sur la réalité de terrain.

Le territoire du site d’étude a été subdivisé en quatre classes pour Djebel Boutaleb (végétation, agriculture, terrain nu et bâti) et cinq classes pour Djebel Youssef (végétation, agriculture, bâti, terrain nu et carrières).

L’opération de vectorisation de chaque classe, a été réalisée à l’aide du logiciel Google Earth et ArcGis en utilisant des polygones pour la vectorisation du bâti, et des entités linéaires pour la végétation, l’agriculture, les terrains nus, les carrières. Ces lignes fermées seront converties par la suite en polygones dans le SIG. Une fois la vectorisation achevée, les tables attributaires ont été renseigné avec les informations correspondantes (type d’occupation, surface).

### 3-2-2. Pistes forestières

Le réseau routier a été vectorisé sous Google Earth. Les entités linéaires ont été utilisé pour la vectorisation des routes et des pistes forestières. Une fois la vectorisation achevée, les entités vectorielles ont été exporté vers le SIG pour la création de réseau routier et de réseau des pistes forestiers.

### 3-2-3. Réseau de défense des forêts contre les incendies (DFCI)

Le réseau de défense des forêts contre les incendies est constitué essentiellement de TPF (trajet pare-feu), de points d'eau et de tours de guet. Les images à très haute résolution spatiale ont servi à vectoriser toutes les tranchées pare-feu des massifs en utilisant des entités linéaires.

Quant aux points d'eau et les tours de guet, il est difficile à les détecter en raison de leur petite taille, nous avons basé sur les données de la conservation des forêts pour localiser leurs emplacements.

### 3-3. L'analyse visuelle

Les photographies aériennes ou les images THR enregistrent toutes les entités visibles à la surface de la Terre telles que vues d'en haut. Bien que les entités soient visibles, elles ne sont pas toujours faciles à identifier. On appelle analyse visuelle ou photo-interprétation le processus d'étude et de collecte des renseignements requis pour identifier les diverses entités anthropiques et naturelles. Lorsque correctement interprétées, les images THR constituent une excellente source de données spatiales pour l'étude de l'environnement de la Terre (Gana, 2018). Cette interprétation reste approximative à cause de l'intervention de divers facteurs tels que la réflexion du sol, du taux de couvert végétal et de la texture et la structure de l'image. Selon Tarhouni *et al.*, (2007), toute confusion entre les unités de végétation sur l'image nécessite une vérification de la « réalité terrain » sur la zone d'étude.

## 4. Traitement des images satellitaires

### 4-1. Critères de choix et acquisition des images satellitaires

L'acquisition des images satellite Landsat s'est fait à travers le site web <http://glovis.usgs.gov/>.

Pour toute étude diachronique de la végétation, il est très important de bien choisir la date de prise de vue à cause de variation des conditions de terrain au cours des saisons de l'année.

Le choix de la date optimale de l'image est dicté par la nécessité d'obtenir une image sans nuage et de reconnaître tous les éléments du terrain en évitant au maximum les confusions, surtout entre les classes de végétation à cause des plantes herbacées annuelles qui peuvent causer des confusions avec les ligneux en période de végétation. La télédétection de la végétation étant basée sur l'activité photosynthétique, nous avons opté pour la saison sèche (de mai à septembre). Le tableau 20 résume les caractéristiques des images utilisées.

**Tableau 20.** Caractéristiques des images Landsat utilisées dans le travail.

Caractéristiques	TM 1996	TM 2008	OLI 2020
<b>ID</b>	LT05_L1TP_19403 5_19960818_20180 215_01_T1	LT05_L1TP_1940 35_20080803_201 80116_01_T1	LC08_L1TP_1940 35_20200820_202 00905_01_T1
<b>Centre d'image</b>	194/35	194/35	194/35
<b>Format</b>	TIFF	TIFF	TIFF
<b>Satellite</b>	Landsat 5	Landsat 5	Landsat 8
<b>Date de prise de vue</b>	18/08/1996	03/08/2008	02/08/2020

#### 4-2. Prétraitement des images Landsat

Les prétraitements des images ont pour but d'augmenter la lisibilité des données et de faciliter leur interprétation et une meilleure extraction de l'information. Ces opérations préliminaires s'appliquent au travers des améliorations radiométriques et des recalages géographiques effectués après l'étalement linéaire des histogrammes de chaque bande spectrale pour améliorer le contraste (Tabopda et Fotsing, 2010). Les phases de cette étape sont : la correction géométrique et atmosphérique, la composition colorée et le calcul de l'indice de végétation normalisé (NDVI).

##### 4-2-1. La correction atmosphérique et géométrique

Selon Soudani (2005), le principe de la correction atmosphérique est de convertir les valeurs numériques (en niveau de gris) de la scène en valeur de la luminance et par la suite extraire les effets perturbateurs atmosphériques qui donnent une mesure physique de la réflectance au niveau de la surface visée. Concernant la correction géométrique, elle a consisté à ramener les images à la même géométrie. Cette étape est nécessaire pour pouvoir superposer et utiliser conjointement les images prises par des capteurs différents à des dates différentes (Ducrot, 2005).

##### 4-2-2. La composition colorée

En télédétection, chaque objet naturel ne réagit pas de la même façon le long du spectre électromagnétique. L'analyse de la signature spectrale des différents objets de l'occupation du

sol est une étape importante pour le choix des canaux des différentes scènes Landsat. Face aux nombres élevés de ces canaux, on est obligé de faire une analyse des bandes spectrales.

La composition colorée d'une image est le résultat de la superposition des bandes dans les canaux Rouge, Vert et Bleu (RGB). La composition colorée utilisée dans cette étude est celle dite infrarouge fausse couleur. Elle combine les bandes correspondant aux longueurs d'ondes du PIR, R et V respectivement dans les canaux R-G-B. Il s'agit des bandes 4-3-2 des images Landsat TM de 1996 et 2008 et des bandes 5-4-3 de l'image Landsat OLI de 2020. Cette composition colorée s'appuie sur les propriétés de la végétation qui réfléchissent très fortement le rayonnement proche infrarouge (Solly *et al.*, 2020).

#### 4-2-3. Calcul de l'NDVI

A partir des images satellites téléchargées, nous avons calculé l'indice de végétation normalisé (NDVI) à partir des bandes spectrales rouges (R) et proches infrarouge (PIR) selon l'équation suivante :  $NDVI = (PIR - R) / (PIR + R)$ . Cet indice est très utilisé pour suivre la dynamique de l'occupation du sol et estimer certains paramètres biophysiques caractéristiques des couverts végétaux.

Cet indice varie entre -1 et +1 ( $-1 \leq NDVI \leq +1$ ). De manière générale, les valeurs inférieures à 0,1 donnent des informations sur les sols nus, l'eau, les zones de culture, les surfaces affectées par les feux et les surfaces très peu végétalisées, tandis que les valeurs supérieures à 0,1 renseignent sur la couverture végétale, c'est-à-dire les zones où l'activité chlorophyllienne est importante (Djoufack-Manetsa, 2011). Plus la valeur est proche de 1, plus l'activité chlorophyllienne est importante et la végétation dense.

#### 4-3. Traitement des images

D'après Ducrot (2005), La classification est un processus de reconnaissance de forme. Elle consiste à établir la correspondance entre les éléments d'une scène de l'image qui sont définis par leurs valeurs radiométriques et des classes connues a priori ou non par l'utilisateur.

Selon Duminil (2007), la classification dirigée utilise les objets bien définis en groupe de pixels appelés des sites d'entraînement. Ces sites servent de base pour les calculs des algorithmes de classification.

Deux principaux types d'approches peuvent être distingués : les classifications non supervisées qui ne requiert a priori aucune connaissance et observations sur le terrain étudié, et les classifications supervisées qui au contraire demandent des relevés in situ précis, ou une

expertise de l'occupation du sol.

On identifie sur l'image des surfaces assez homogènes représentatives des thèmes qu'on souhaite discriminer. Les signatures spectrales de ces surfaces serviront comme références pour classer l'ensemble de l'image en utilisant l'algorithme de classification « maximum de vraisemblance ».

Dans notre cas, la classification par la méthode supervisée a été adoptée pour l'ensemble des images. Le choix de cette méthode se justifie par l'absence d'échantillons de référence pour les images anciennes (Ducrot, 2005). Nous supervisons donc la classification d'un ensemble spécifique de classes, les informations numériques pour chacune des bandes et pour chaque pixel de ces ensembles sont utilisées pour définir les classes et ensuite reconnaître des régions aux propriétés similaires à chaque classe. Des polygones sont ensuite digitalisés autour de ces exemples représentatifs et assignés à une classe spécifique (Gharbi et Meziani, 2019).

Cette opération a permis de déterminer 03 thèmes principaux : végétation claire (forêt claire, maquis claire), végétation dense (Forêt dense, maquis dense), broussailles et terrain nu.

#### **4-4. Acquisition de données terrain**

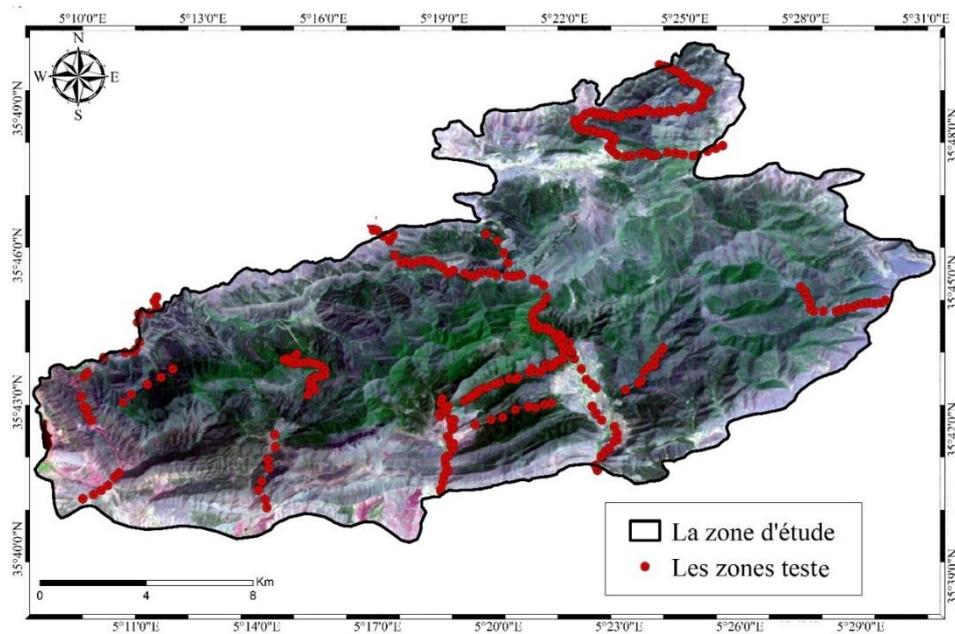
Les travaux de terrain peuvent être répartis en plusieurs rubriques : les relevés de points GPS, les enquêtes et la validation de la pré-carte (Solly *et al.*, 2020). Cette étape s'est faite entre mai 2021 et septembre 2022 dans le but de connaître les modes d'occupation des sols et définir les différentes formations végétales.

Des points GPS ont été relevés pour chaque classe sur l'ensemble de la zone d'étude (Figure 47). Ces points GPS ont été utilisés pour valider les résultats cartographiques pour l'année la plus récente. Ils sont complétés par une interprétation visuelle d'images Google Earth. De même, d'autres sources d'information, complémentaires, ont été mises à contribution pour valider les résultats. Pour l'année la plus ancienne, c'est-à-dire 1996, des photos aériennes de l'année 1997 ont été utilisées. Au final, les cartes d'occupation des sols ont été produites à l'échelle. Par ailleurs, des entretiens individuels ont été réalisés avec des forestiers. Les questions soulevées s'articulent autour de l'histoire du peuplement, des changements intervenus dans la forêt et dans le terroir, des facteurs de la dynamique de la forêt et ses impacts (Solly *et al.*, 2020).

Bien que l'enquête de terrain ait été réalisée, il existe quand même plusieurs difficultés dont la principale est les endroits difficiles d'accès à cause d'absence des pistes forestières surtout le versant Nord de Djebel Youssef.

Les principaux types d'occupation du sol retenus dans cette étude sont :

- ✓ **Zones forestières** : il s'agit des zones étendues boisées, constituée des peuplements d'arbres, arbustes et arbrisseaux,
- ✓ **Territoires agricoles** : il s'agit généralement l'agriculture et l'arboriculture
- ✓ **Les espaces artificialisés** : recouvrent les zones urbanisées
- ✓ **Terres nues** : des zones comportent très peu de végétation : roches nues, carrières.



**Figure 47.** Exemple de localisation des zones "teste" de Djebel Boutaleb (image Landsat de 08 août 2020) (Gharbi, 2022).

#### 4-5. Validation de la classification

La validation de la classification effectuée sur les images Landsat a été faite par l'évaluation des performances de la qualité des cartes thématiques dérivées des données de télédétection par l'estimation de pourcentage de pixels correctement classés et la réalisation de plusieurs sorties sur terrain. Toutefois, vue que la zone d'étude est vaste, il n'a pas été possible de visiter tout le territoire. Cependant, nous avons fait une interprétation visuelle sur les photographies aériennes (pour les anciennes dates) et les images Google Earth (pour les dates récentes) pour les zones non investiguées.

Pour déterminer la pertinence et la qualité des cartes, on a utilisé la matrice de confusion et l'analyse par le coefficient de KAPPA.

Selon Blum et *al.*, (1995), la matrice de confusion (ou la matrice d'erreur) donne une évaluation de la précision globale de la cartographie et des résultats de classification pour chacune des classes thématiques. L'indice Kappa évalué dans la matrice de confusion l'accord entre les résultats obtenus et la vérité sur le terrain. Il s'étend de 0 à 1 et il se divise en cinq catégories :

- ⇒ **Accord très faible** : De 0 à 0.20 ;
- ⇒ **Accord faible** : De 0.21 à 0.40 ;
- ⇒ **Accord modéré** : De 0.41 à 0.60 ;
- ⇒ **Accord substantiel** : De 0.61 à 0.80 ;
- ⇒ **Accord presque parfait** : De 0.81 à 1.

Le coefficient de Kappa (équation 01) est exprimé en termes de précision globale observée (équation 02) et de précision prévue (équation 03) (Congalton, 1991).

$$K = \frac{a-b}{1-b} \quad (1)$$

$$a = 1/N \sum_{i=1}^{Nc} X_{ii} \quad (2)$$

$$b = 1/N \sum_{i=1}^{Nc} (x_{+i} \cdot x_{i+}) \quad (3)$$

Avec :

- ↪  $Nc$  = Nombre de classes ;
- ↪  $N$  = Nombre total d'observations ;
- ↪  $X_{ii}$  = Nombre d'observations dans la colonne  $i$  ;
- ↪ Ligne  $i$  (diagonale de la matrice) ;
- ↪  $X_{+i}$  = Total des observations dans la colonne  $i$  ;
- ↪ (Total à droite dans la matrice) ;
- ↪  $X_{i+}$  = Total des observations dans la ligne  $i$  ;
- ↪ (Total en bas de la matrice).

#### 4-6. Cartographie des changements

De nombreux travaux de recherche ont recours aux potentialités de la télédétection pour le suivi et l'analyse des changements de la surface terrestre ainsi que de leurs conséquences comme la dégradation du couvert végétal, l'expansion du bâti. (Sylla, 2014).

Dans notre cas, la détection du changement du couvert végétal est utilisée pour identifier les différences entre les images d'une même scène à des moments différents (changement temporel) ou dans des conditions différentes (changement spatial) (Derdjini, 2017).

Le traitement statistique des changements a abouti aux matrices de changement. Les changements sont de trois types : les régressions, qui correspondent à la diminution d'une classe au profit d'autres (changement négatif) ; les progressions, qui correspondent à l'augmentation d'une classe au détriment d'autres (changement positif) ; la stabilité, lorsqu'une classe ne subit aucun changement pendant la période d'étude (Solly *et al.*, 2020).

#### 5. Gestion des feux de forêts

La télédétection et les Systèmes d'Information Géographique (SIG) sont des outils complémentaires avec les méthodes conventionnelles utilisées dans la prévention et la gestion des catastrophes.

La télédétection peut suivre l'événement pendant le temps de la catastrophe. La place du satellite le rend idéal pour l'organisation et la gestion opérationnelle de l'événement. Elle peut contribuer à l'estimation des dégâts et après cela, elle peut être utilisée pour dresser une carte de la nouvelle situation et mettre à jour la base de données. Le Système d'Information Géographique (SIG) est capable d'organiser et de présenter des données alphanumériques spatialement référencées (Servigne et Libourel, 2006).

Dans ce travail, nous nous intéresserons à présenter l'utilisation de ces deux outils pour la gestion des feux de forêts dans Djebel Boutaleb. Vu que l'alarme précoce et la prévention sont les seuls moyens de réduire le coût des dégâts.

Les facteurs essentiels qui favorisent le déclenchement de ces feux sont principalement la chaleur, l'absence de précipitation, la nature du terrain et de la végétation, l'humidité, l'orientation des vents ainsi que les paramètres géographiques de la région qui sont :

- ↳ La topographie (terrain accidenté ou non) ;
- ↳ Les accès (Routes, pistes) ;
- ↳ Les agglomérations (les habitants).

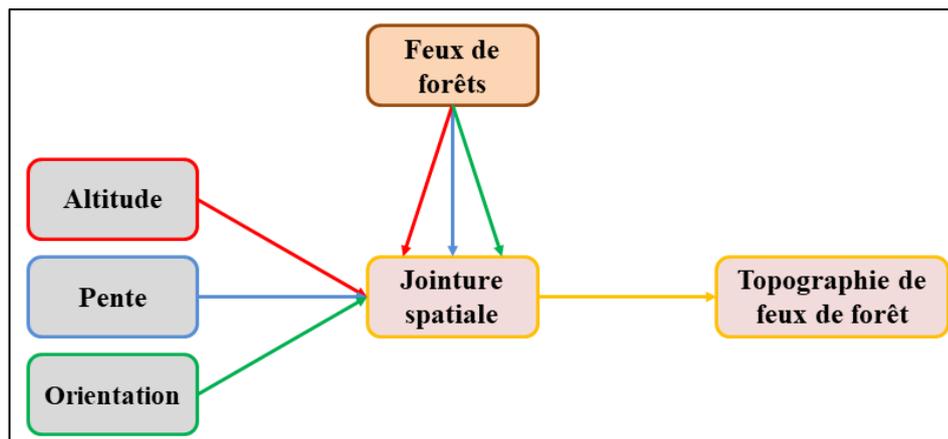
### 5-1. Analyse temporelle

Une analyse temporelle détaillée des fréquences horaire, mensuelle et annuelle des feux de forêts, déclarés entre 1985 et 2012 au niveau des massifs forestiers de Djebel Boutaleb, est réalisée à partir des données attributaire de la couche (bilan des feux de forêt).

### 5-2. Analyse topographique

L'analyse topographique des feux de forêts entre 1982 et 2020 se fait après l'étude des paramètres suivants : l'altitude, la pente et l'orientation des pentes, qui sont calculés à partir du modèle numérique de terrain (MNT).

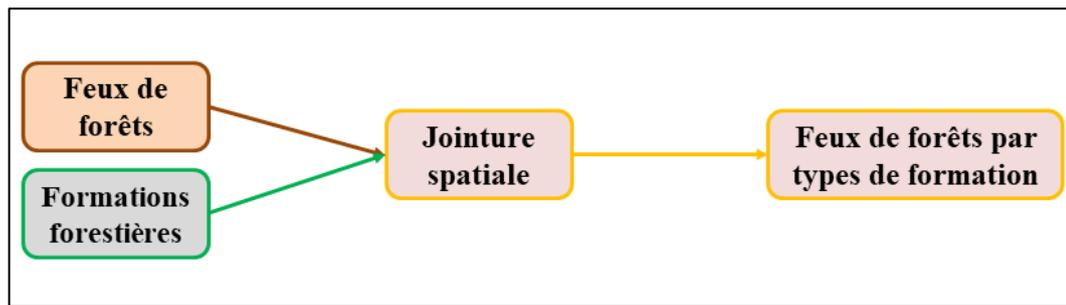
Cette analyse nécessite une jointure spatiale entre la couche de donnée de feux de forêts et les couches de classes d'altitude, classes de pente et de classes d'orientation et une transcription des résultats obtenus dans la table attributaire de la couche "Feux de forêts" (Figure 48).



**Figure 48.** Analyse topographique de feux de forêts entre (1982-2020) (Gharbi, 2022).

### 5-3. Analyse des feux de forêts par type de formations forestières

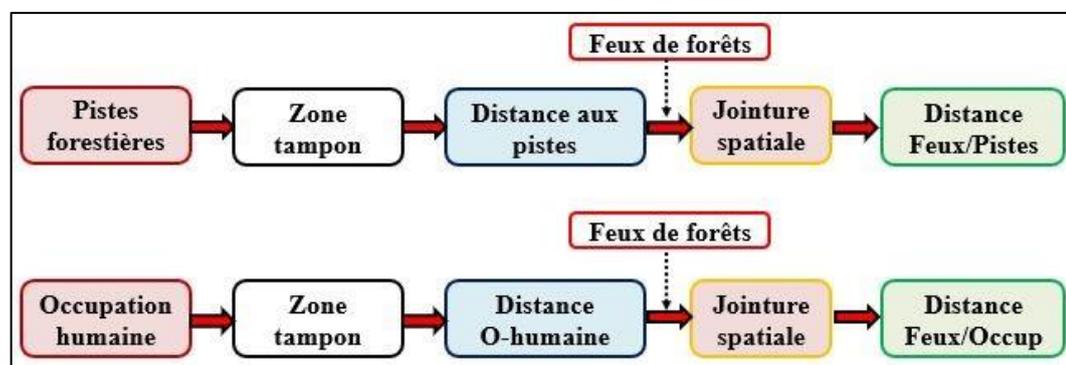
Les paramètres traités pour analyser les feux en fonction de formations forestières sont : le nombre de feux et la surface brûlée de chaque formation forestière. Ce traitement nécessite une jointure spatiale entre la couche de donnée "Feux de forêts" et la couche "Végétation" (Figure 49).



**Figure 49.** Modèle d'analyse des feux de forêts par type de formations forestières (1982-2020) (Gharbi, 2022).

#### 5-4. Analyse spatiale des feux de forêts en fonction d'occupation humaine et de pistes forestières

Cette analyse nécessite la création des zones tampon à partir de couches "Bâti et Agriculture" et "Pistes" dont l'intervalle de distance retenu est de 150m pour les pistes et 250m pour l'occupation humaine. Une jointure spatiale entre ces couches et la couche de donnée "Feux de forêts" est réalisée après la création des zones tampon (Figure 50).



**Figure 50.** Modèle d'analyse des feux de forêts en fonction d'occupation humaine et de pistes forestières (Gharbi, 2022).

#### 5-5. Modélisation du risque de départ de feux

Le départ de feux est principalement lié à l'action humaine. Selon Arfa (2019), l'Algérie a connu, entre 1985 et 2006, 86% des départs de feux, dont l'origine est connue, sont volontaire. Les principaux facteurs de départ de feux sont : la présence humaine et la proximité des pistes forestières. Ils permettent l'accès aux massifs forestiers. Ils sont les principaux critères qui interviennent dans la modélisation du risque des incendies. En se basant sur l'indice de départ

de feux (IDF) proposé par Arfa (2019) (Equation 01), et vu que le nombre de ferme et la surface de maisons rurales et d'agriculture est moins importants dans notre site d'étude, nous proposons la relation suivante (Equation 02) :

$$\text{IDF} = R_{\text{Ferme}} + R_{\text{MR}} + R_{\text{Agri}} + R_{\text{Piste}} \quad (1)$$

$$\text{IDF} = R_{\text{Habitat}} + R_{\text{Piste}} \quad (2)$$

Où :

- ↪ **R<sub>Ferme</sub>** : est le niveau de risque lié à la proximité des fermes isolées ;
- ↪ **R<sub>MR</sub>** : est le niveau de risque lié à la proximité des maisons rurales éparses ;
- ↪ **R<sub>Agri</sub>** : est le niveau de risque lié à la proximité des terres agricoles ;
- ↪ **R<sub>Piste</sub>** : est le niveau de risque lié à la proximité des pistes forestières.
- ↪ **R<sub>Habitat</sub>** : est le niveau de risque lié à la proximité d'habitat (fermes, maisons rurales, terres agricole) ;

La création des zones tampons à partir des couches "habitat" et "Pistes" est nécessaire pour calculer l'IDF en réalisant une jointure spatiale entre ces deux couches et la couche "Feux de forêts".

Les valeurs de l'indice de départ de feux sont comprises entre 4 et 20. Il est codé en 5 classes :

- ↪ Faible :  $\text{IDF} = 4$  ;
- ↪ Modéré :  $4 < \text{IDF} \leq 8$  ;
- ↪ Moyen :  $8 < \text{IDF} \leq 12$  ;
- ↪ Élevé :  $12 < \text{IDF} \leq 16$  ;
- ↪ Très élevé :  $\text{IDF} > 16$ .

## 5-6. Modélisation de la combustibilité

La végétation est un facteur important à double titre : par son inflammabilité et sa combustibilité. L'inflammabilité des végétaux joue un rôle indirect sur la mise à feu. L'inflammabilité d'un végétal est déterminée par sa teneur en eau, en relation avec les paramètres climatiques, ainsi que par sa composition chimique en relation avec le type d'essence. Les espèces dominantes qui caractérisent les formations en raison de leur importance

constitutive influent sur l'inflammabilité et la combustibilité des peuplements intrinsèques (Trabaud, 1980 ; Belhadj-Aissa, 2003).

Pour évaluer l'indice de combustibilité des végétaux (IC), MARIEL (1995) a proposé la relation suivante :

$$IC = 39 + 2,3 BV (E1 + E2 - 7,18)$$

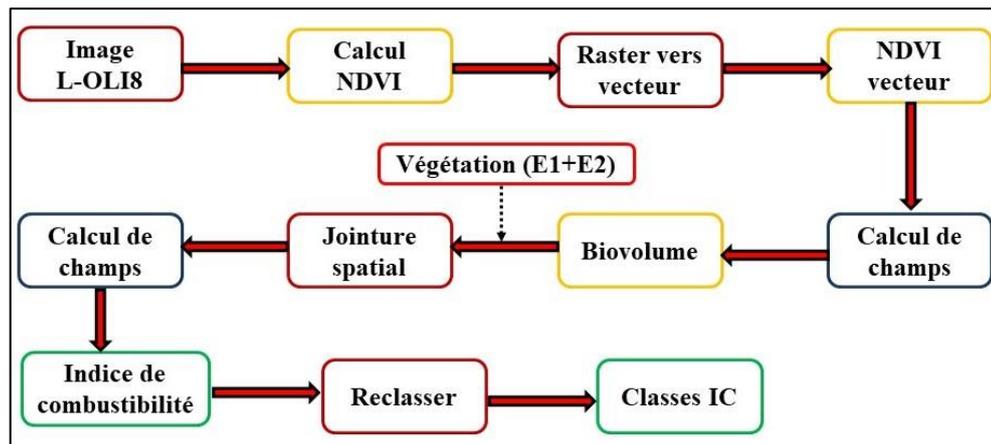
Où :

- ⇒ **BV** : Il est calculé à partir du biovolume combustible par addition des pourcentages de recouvrement de chacune des strates biologiques ;
- ⇒ **E** : Comprise entre 1 et 8, représente la combustibilité moyenne de chaque type de peuplement. Elle est égale à la somme de la note de combustibilité des ligneux hauts les plus dominantes (**E1**) et la moyenne des notes de combustibilité des ligneux bas ou les herbacées les plus dominantes (**E2**).

D'après CEMAGREF (1990), le biovolume intervient de façon différente suivant la valeur de la somme E1+E2. Si cette somme est inférieure à 7,18 (espèces peu combustibles ou à pouvoir calorifique par unité de biovolume faible), l'indice reste inférieur à 40. Dans le cas contraire, il sera d'autant plus élevé que le biovolume sera important. L'indice de combustibilité peut atteindre théoriquement 140. Il est codé en 5 classes :

- ↪ Faible :  $IC < 40$  ;
- ↪ Modéré :  $40 \leq IC < 50$  ;
- ↪ Moyen :  $50 \leq IC < 60$  ;
- ↪ Élevé :  $60 \leq IC < 70$  ;
- ↪ Très élevé :  $IC \geq 70$ .

Les étapes nécessaires au calcul de l'indice de combustibilité sont résumées dans la figure 51.



**Figure 51.** Modèle de calcul de l'indice de combustibilité de Djebel Boutaleb (Gharbi, 2022).

### 5-7. Modélisation du risque feux de forêts de Djebel Boutaleb

Pour la modélisation du risque feux de forêts, nous basons sur l'indice de risque IRF proposé par Arfa (2019), exprimé par la relation suivante :  $IRF = IDF + IC$  et nécessitant une intersection entre la couche "Classes IDF" et la couche "Classes IC".

Où :

- ⇒ **IDF** : Est l'indice de départ de feux ;
- ⇒ **IC** : Est l'indice de combustibilité.

Les valeurs de l'indice de risque feux de forêts sont comprises entre 2 et 10. Il est codé en 5 classes :

- ↪ Faible :  $IRF = 2$  ;
- ↪ Modéré :  $2 < IRF \leq 4$  ;
- ↪ Moyen :  $4 < IRF \leq 6$  ;
- ↪ Élevé :  $6 < IRF \leq 8$  ;
- ↪ Très élevé :  $IRF > 8$ .

### 5-8. Analyse de l'efficacité du réseau DFCI face aux incendies

Le réseau de défense contre les incendies de Djebel Boutaleb Intègre : les pistes forestières, les tranchées pare-feu, les points d'eau et les tours de guet.

Une jointure spatiale de la couche "Classes IRF" avec les différentes couches du réseau DFCI: "Point d'eau", "TPF", "Tour de guet" et "Pistes" est nécessaire pour savoir si ces infrastructures sont réalisées de manière efficace pour mieux protéger les forêts contre les feux.

**PARTIE III :**  
**RÉSULTATS ET**  
**DISCUSSION**

## 1. Intégration des images THR pour la valorisation des ressources naturelles dans Djebel Boutaleb et Djebel Youssef

### 1-1. Apport des images THR pour la cartographie détaillée de site d'étude

L'interprétation visuelle des images THR permet de cartographier la zone d'étude en détail. Ce degré de détail offre un potentiel d'extraction de la taille et la répartition des peuplements forestiers, l'emplacement d'arbres, des zones forestières, des routes, des pistes, des TPF et des points d'eau.

Plusieurs sorties sur terrain ont été effectuées pour repérer, en utilisant le GPS, et connaître les différents types d'occupation du sol et noter les impacts anthropiques sur le milieu naturel et les dégradations observées (Figure 52 et 53).

- ❖ **Bâti** : Nos résultats montrent que le bâti représente environ 273ha de la surface totale de Djebel Boutaleb. Il regroupe environ 3000 familles sous forme d'habitats épars (environ 30% de la population de l'ensemble des communes auquel appartient le massif). Ceci se traduit par une forte activité d'élevage ;
- ❖ **Terres agricoles** : Les terres agricoles occupent 5,9% de la superficie totale de Djebel Youssef et 9,3% de Djebel Boutaleb. Elle est essentiellement céréalière (blé et orge), dont la production est orientée majoritairement à l'autoconsommation et la constitution des stocks fourragers pour l'élevage. D'après la conservation des forêts de la wilaya de Sétif, l'unité d'élevage ovin à Djebel Boutaleb constitue la spéculation de base, destinée à alimenter la trésorerie familiale. Les bovins sont plus présents au Nord du massif mais leur effectif par exploitation est très faible. L'élevage caprin constitue une spéculation secondaire et associée chez la majorité des exploitations aux ovins. Dans les situations plus favorables (présence de l'eau) l'agriculture intègre d'autres spéculations nécessitant de l'irrigation et de la main d'œuvre, mais plus rémunératrices (tabac, maraîchage, et plus rarement l'arboriculture) ;
- ❖ **Réseau routier** : Djebel Boutaleb dispose d'un réseau d'infrastructure constitué principalement d'une route et des pistes forestières de plus de 400 km. Il constitue également de tranchées par feux (30,2ha), de deux postes de vigie (Aouzour et Afghane) et de 13 points d'eau. Quant à Djebel Youssef, il constitue de 5 km de pistes, d'un TPF et de 955ha de carrières.

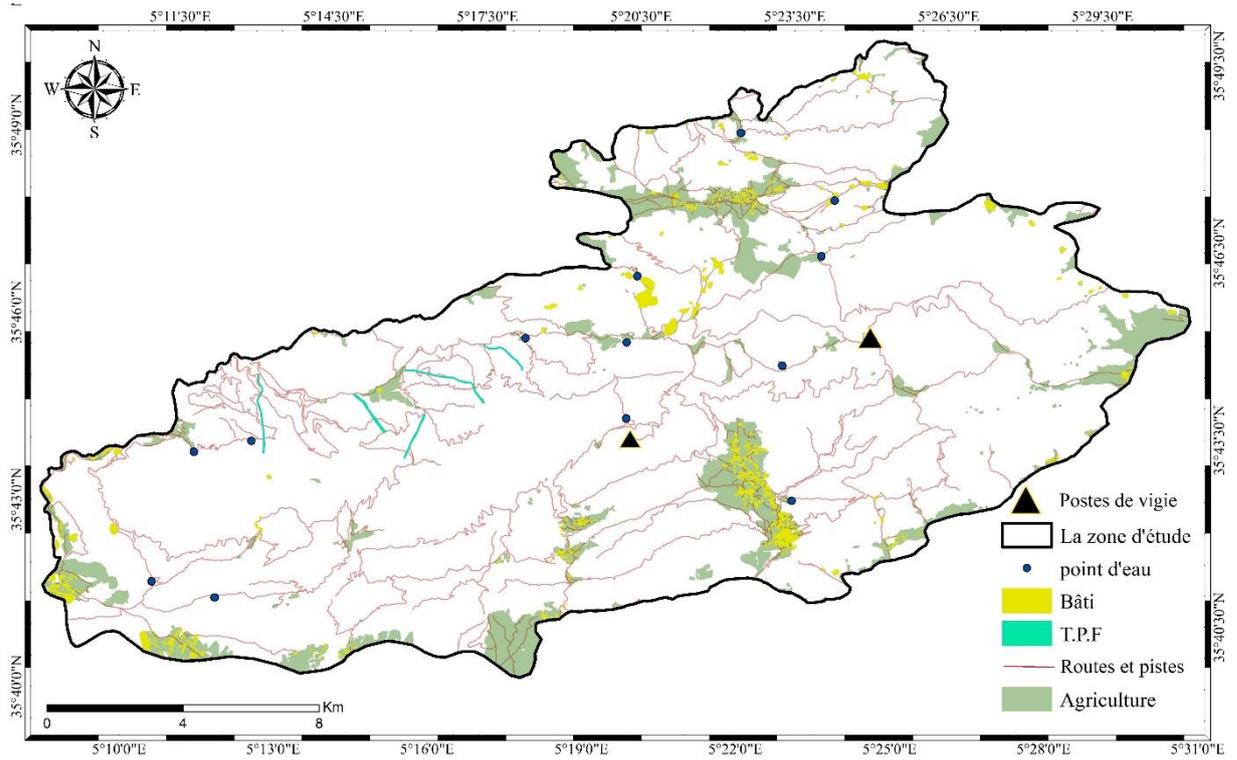


Figure 52. Occupation du sol de Djebel Boutaleb (Gharbi, 2022).

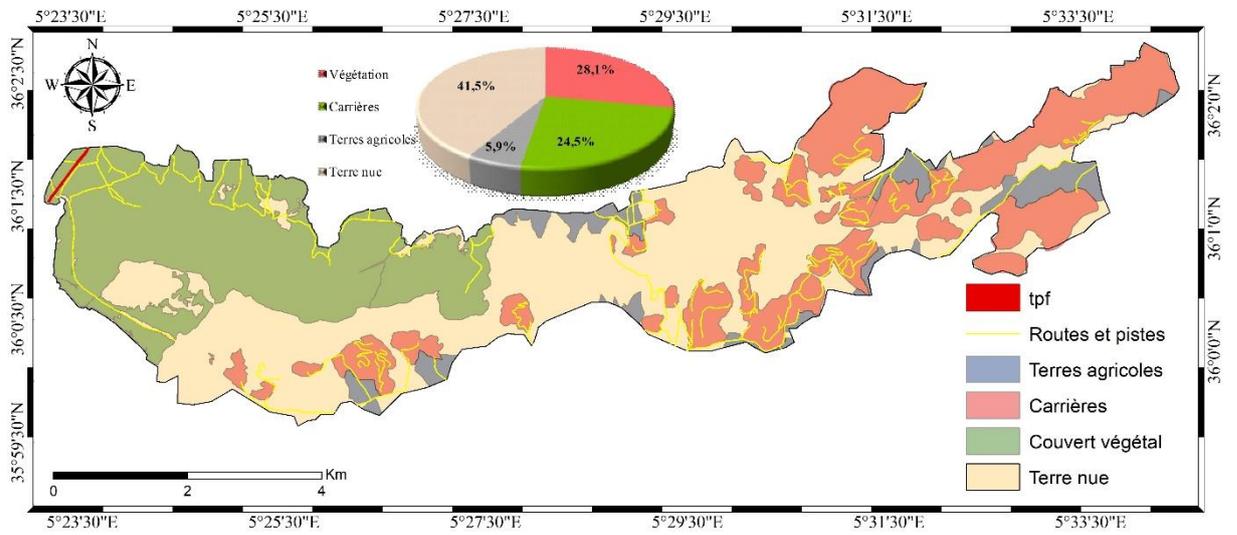


Figure 53. Occupation du sol de Djebel Youssef (Gharbi, 2022).

## 1-2. Etude de la végétation

### 1-2-1. Formations végétales de Djebel Boutaleb

Une formation végétale selon Maire (1926), est un groupement végétal d'aspect physiologique homogène. Selon Lacoste et Salanon 1969, la notion de formation s'appuie sur les caractères physiologiques des ensembles vivants et sur l'aspect général de la végétation. En 1973, Guinochet définit la formation végétale comme étant un concept construit à l'aide de la morphologie, le port et de la dominance de certaines espèces.

Les formations végétales principales de Djebel Boutaleb sont :

#### ❖ Les formations forestières

Ces formations sont à base de pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill) et de cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti). Elles peuvent être denses, trouées ou claires.

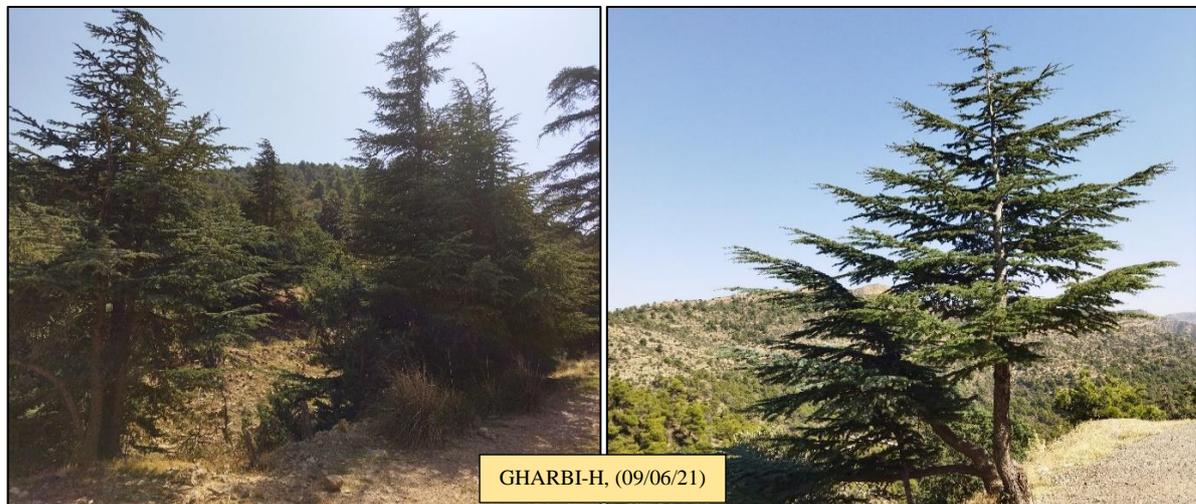
- ✓ **Le pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill) :** Il se développe essentiellement aux étages thermo et méso méditerranéens (Quezel, 1986) (Figure 54).

Dans le massif de Boutaleb, le pin d'Alep couvre une superficie importante sur les versants Nord, Sud et Ouest, entre 1000 et 1300m sous forme de forêt ou de matorral, il parvient à sa limite de répartition altitudinale supérieure vers 1500 m et cède sa place au chêne vert. Il est fréquemment parcouru par des incendies. Au bout d'un certain temps, il forme de belle futaie après leur passage ; et la majorité des pinèdes du massif de Boutaleb sont issues d'anciens incendies. Cependant, quand ces derniers sont très fréquents, il laisse la place à des garrigues basses à base de Cistes (*Cistus villosus* L. et *Cistus salvifolius* L.), de *Rosmarinus tournefortii* de Noé. et de *Genista microcephala* Coss. et Dur., (Madoui et Gehu, 2002). Il est concurrencé en hautes altitudes par le *Quercus ilex* L. et *Juniperus phoenicea* L. en basses altitudes.

- ✓ **Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) :** Il se développe aux étages oroméditerranéens à partir de 1400m jusqu'à 1800m d'altitude, il n'existe qu'en exposition Nord, il forme des peuplements denses et moyennement denses avec la présence de grande surface en dépérissement (Figure 55).



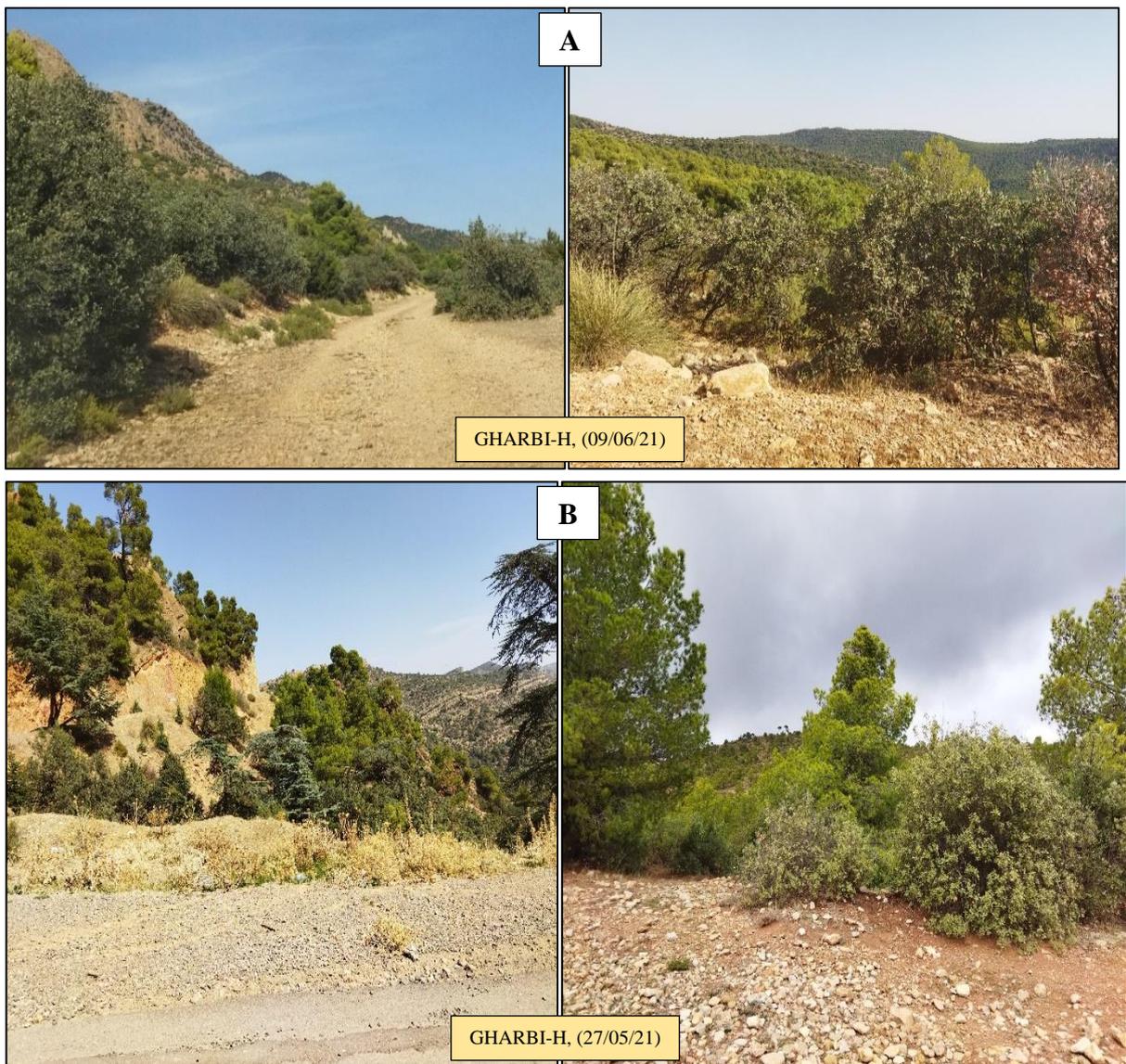
**Figure 54.** La forêt de *Pinus halepensis* Mill.



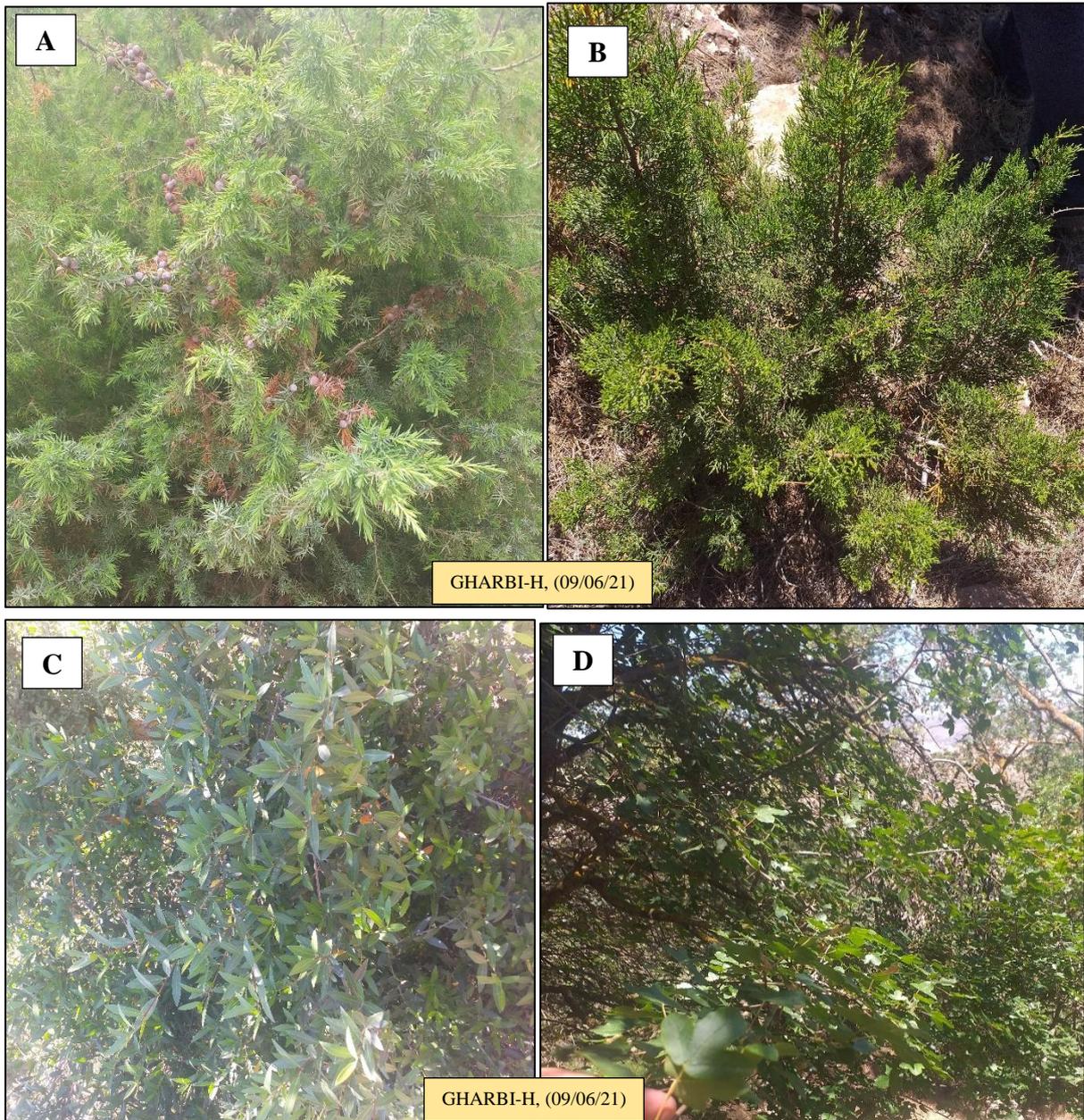
**Figure 55.** La forêt de *Cedrus atlantica* Manetti.

#### ❖ Matorral

Nous trouvons des formations à base de *Quercus ilex* L. occupant presque toute la partie Nord et Est du massif à partir de 1200m jusqu'à 1770 m d'altitude qui constitue sa limite de répartition altitudinale supérieure. Selon Lapie et Maige (1914), le chêne vert est une essence robuste, très plastique, qui s'accommode à différents types de climat. Il supporte autant les froids hivernaux que les grandes sécheresses estivales. Nous trouvons également des matorrals qui se développe, suivant la densité sur sol évolué ou dégradé à base de *Cedrus atlantica* Manetti. et à *Pinus halepensis* Mill. Ainsi que ceux à dominance de *Pistacia lentiscus* L., *Phillyrea angustifolia* (L.) Rouy., *Juniperus phoenicia* L., *Pistacia terebinthus* L., *Juniperus oxycedrus* L., *Globularia alypum* L., *Rosmarinus tournefortii* de Noé. et enfin *Thymus ciliatus* Desf. à partir de 900m d'altitude (Figure 56, 57, 58).



**Figure 56.** (A) Matorral de *Quercus ilex* L., (B) Mélange de *Quercus ilex* L., *Pinus halepensis* Mill. et *Cedrus atlantica* Manetti.



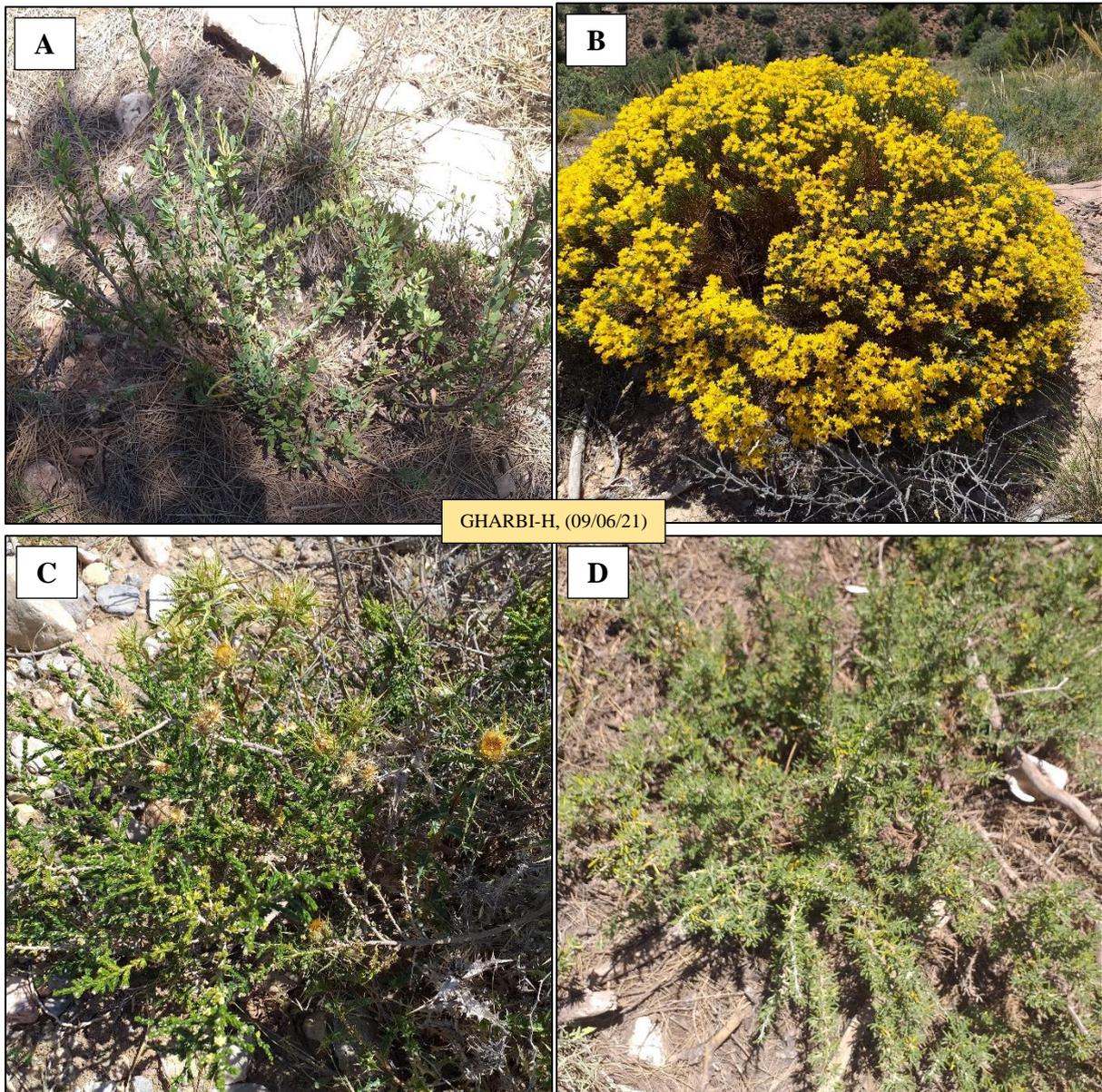
**Figure 57.** A) *Juniperus oxycedrus* L., B) *Juniperus phoenicia* L., C) *Phillyrea angustifolia* (L.) Rouy., D) *Acer monspessulanum* L.



**Figure 58.** *Pistacia lentiscus* L.

❖ **Formations basses**

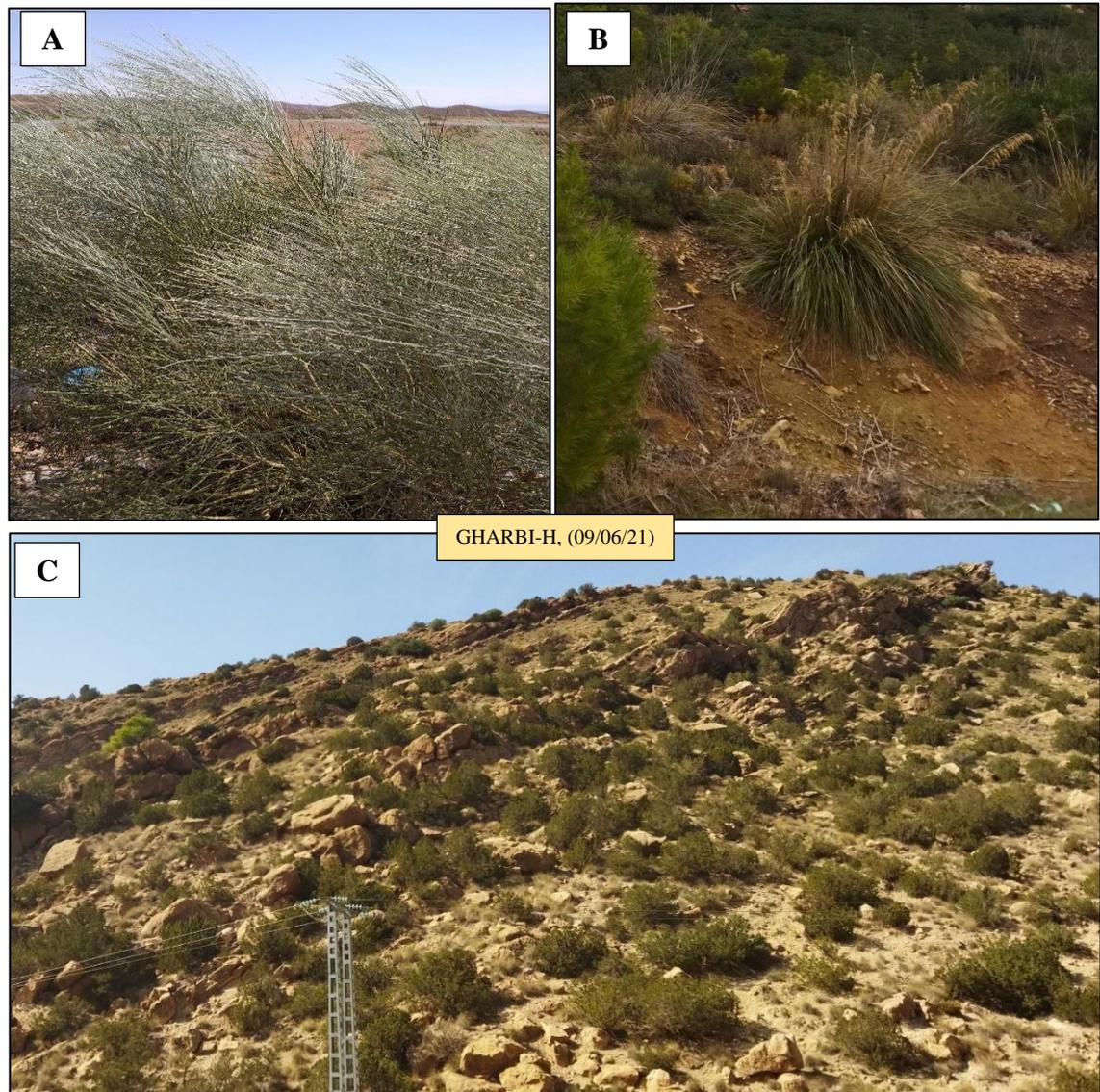
Les formations herbacées de Djebel Boutaleb constituées essentiellement de pelouses écorchées. Ces derniers se développent sur des sols dégradés et caillouteux à dominance de chamaephytes herbacés et xérophytes épineuses aux sommets de certains Djebels du massif et plus particulièrement au niveau du Djebel Afghan à plus de 1800m d'altitude. On cite à titre d'exemple : *Calicotome spinosa* (L.) Link, *Globularia alypum* L., *Thymaelea hirsuta* (L.) Endl. et *Rosmarinus officinalis* L. (Figure 59).



**Figure 59.** Formations basses de Djebel Boutaleb A) *Globularia alypum* L., B) *Calicotome spinosa* (L.) Link., C) *Thymaelea hirsuta* (L.) Endl., D) *Rosmarinus officinalise* L.

#### ❖ Formations steppiques

Sont des formations naturelles herbacées très ouvertes. Elles se développent, dans le massif, sur les sols dégradés rocailleux. Elles sont à dominance de xérophytes en touffes qui tapissent pratiquement tout le flanc Sud à partir de 800m d'altitude. Nous trouvons aussi des steppes chaméphytiques : *Retama raetam* (Forssk.) Webb., *Ampelodesmos mauritanicus* (Poir.) T. Durand et Schinz., et *Artimisia herba alba* Asso. (Figure 60).



**Figure 60.** Quelques formations steppiques de Djebel Boutaleb, A) *Retama raetam* (Forssk.) Webb., B) *Ampelodesmos mauritanicus* (Poir.) T. Durand et Schinz., C) *Artemisia herba alba* Asso.

### 1-2-2. Formations végétales de Djebel Youssef

D'après nos sorties réalisées sur terrain, les indications de services forestiers, les images de très haute résolution spatiale et le travail de Chermat (2013), nous avons constaté que les unités de formations végétales de Djebel Youssef rapportent aux trois ensembles physiologiques qui se succèdent dans l'espace suivant un gradient altitudinal :

#### ❖ Matorral

Ces matorrals sont à base de *Pinus halepensis* Mill., *Olea europea* L., *Cratægus azarolus* L., *Prunus prostrata* Labill., *Juniperus oxycedrus* L., *Pistacia atlantica* Desf.,

*Calicotome spinosa* (L.) Link., *Quercus ilex* L., *Genista mirocephala* Coss et Dur., *Phillyrea angustifolia* (L.) Rouy. et *Rhamnus alaternus* L.

Cette formation se trouve sur le versant Nord et Nord-ouest de Djebel Youssef occupant les altitudes entre 1270 et 1400m à recouvrement de 35 à 45 %.

#### ❖ Formations steppiques

On trouve dans le massif, deux types de formations steppiques (Figure 61) :

- **Steppe à *Stipa tenacissima* L. et *Launaea acanthoclada* Maire.** : Ce faciès à steppe mixte est caractérisé par l'abondance de *Launaea acanthoclada* Maire. et traduit la dégradation du matorral sur le versant Sud. Cette formation est constituée d'espèces de dégradation comme *Thymaelea hirsuta* (L.) Endl. et *Peganum harmala* L. La végétation colonise des terrains très caillouteux à une altitude moyenne de 1100m et recouvre environ 47% du sol ;
- **Steppe à *Artemisia herba-alba* Asso** : Cette steppe est constituée principalement d'*Artemisia herba alba* Asso., *Dactylis glomerata* L., *Poa bulbosa* L., *Trisetum flavescens* (L.) Beauv., *Bromus maritensis* L., *Filago germanica* L., *Hedysarum naudinianum* Coss., *Hippocrepis scabra* DC., *Pallenis spinosa* (L.) Coss., *Atractylis cancellata* L. et *Helichrysum stoechas* (L.) DC., Elle est observée sur le flanc Nord entre 1000 et 1250m d'altitude et constitue les pâturages de meilleure qualité, les espèces fourragères y sont nombreuses et surtout abondantes (Chermat, 2013).



**Figure 61.** A) *Thymaelea hirsuta* (L.) Endl., B) *Calicotome spinosa* L.

### ❖ Formations rupicoles

Ces formations sont installées dans les fissures entre les barres rocheuses essentiellement calcaires et occupent les falaises rocheuses à exposition Nord, on prend : *Asplenium trichomanes* L., *Silene atlantica* Coss., *Gymnogramme leptophylla* L.Desv., *Polypodium vulgare* L., *Campanula rotundifolia* L., et *Helichrysum stoechas* (L.) DC., (Chermat, 2013).

### 1-2-3. Répartition géographique de la végétation naturelle de Djebel Boutaleb

A partir de l'interprétation visuelle des images satellites hautes résolution, les sorties réalisées sur terrain et les données des services forestiers, nous avons réalisé la carte de la végétation de Djebel Boutaleb (Figure 62). Elle montre que la strate arborée est dominée par les formations résineuses de :

- ↳ Pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en formations naturelles pures occupent 9554,4ha soit 31,5%, de la zone d'étude. Ces peuplements se localisent généralement sur le versant Nord du massif, sur les revers Sud et sur la partie centrale ;
- ↳ Cèdre de l'Atlas pure (*Cedrus allantica* Manetti) occupe une étendue relativement importante soit 910,9ha représentant 3% de la superficie du massif. A l'échelle de la forêt de Boutaleb, la cédraie est répartie en deux tâches, l'une sur la partie sommitale et axiale (Afghan, Chellelou, Boutaleb) la plus importante, et l'autre au Centre-ouest (Ras Ahmed ben Tahar) moins importante. L'état de végétation de la cédraie est inquiétant (dépérissement parfois massif, couvert faible, sujets mutilés, régénération capricieuse) (Zerroug, 2012).

Quant au genévrier, on le trouve sous forme de garrigue (8,1%), de matorral (6,01%) ou encore en association avec *Quercus ilex* L. (10,9%). Les feuillus sont représentés exclusivement par le Tallis de *Quercus ilex* L. (10,8%) ou de matorral (13,5%). Les chênaies vertes occupent le centre et le centre-est du massif.

Concernant les reboisements, ils sont à base de *Pinus halepensis* Mill., ils occupent environ 4,9% de l'espace forestier et de *Cedrus allantica* Manetti (1,4%) sur le Nord-ouest du massif (Tableau 21), (Figure 63). Ce patrimoine joue un rôle primordial dans la protection des terres contre toute forme d'érosion et de dégradation. Et enfin les autres occupations non forestières (terrains nus ou rocheux, zones incendiées) s'étendant sur 2554,6 ha, soit (8,4%).

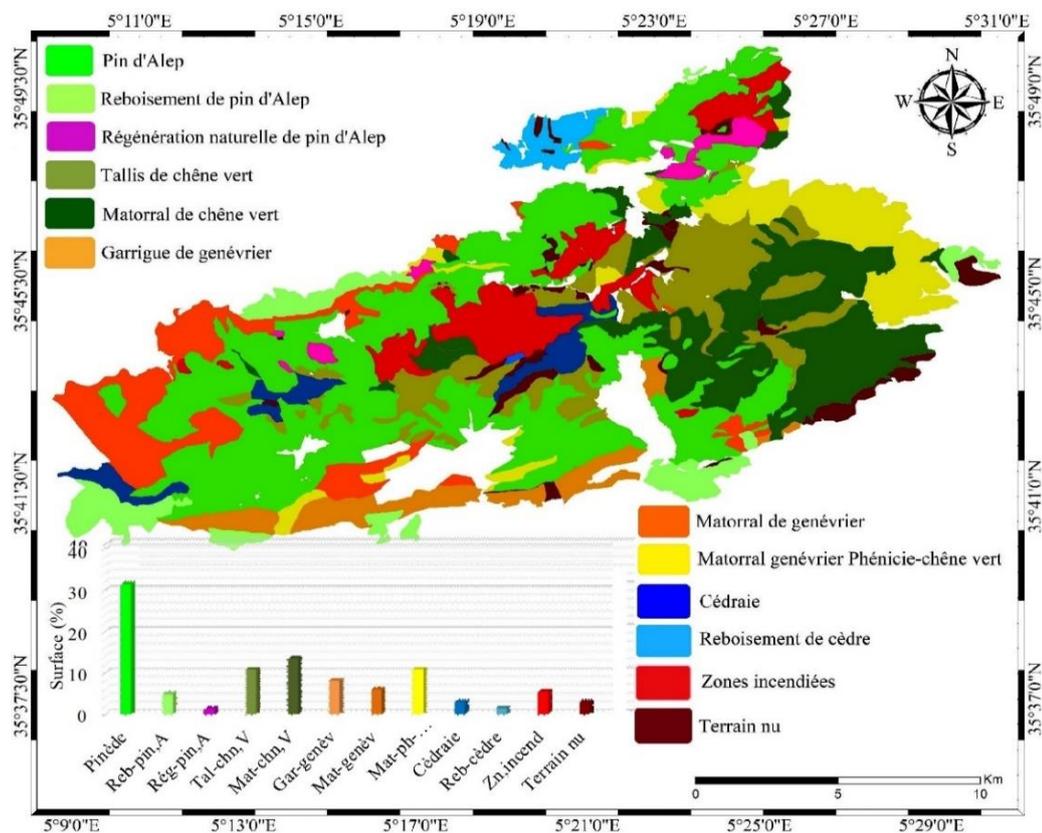


Figure 62. Répartition de la végétation de Djebel Boutaleb (Gharbi et Lazazga, 2021).

Tableau 21. Répartition des formations végétales de Djebel Boutaleb en (ha) et (%).

Type de peuplement	Surface (ha)	Surface (%)
Pinède	9554,4	31,5
Reboisement de pin d'Alep	1498,2	4,9
Régénération de pin d'Alep	400,7	1,3
Tallis de chêne vert	3264,3	10,8
Matorral de chêne vert	4109,01	13,5
Garrigue Genévrier	2471,3	8,1
Matorral de genévrier	1823,7	6,01
Matorral genévrier Phénicie-chêne vert	3307,35	10,9
Cédraie	910,92	3
Reboisement de cèdre	430,8	1,4
Zone incendiée	1651,8	5,4
Terrain nu	902,76	3
<b>Total</b>	<b>30325,24</b>	<b>100</b>



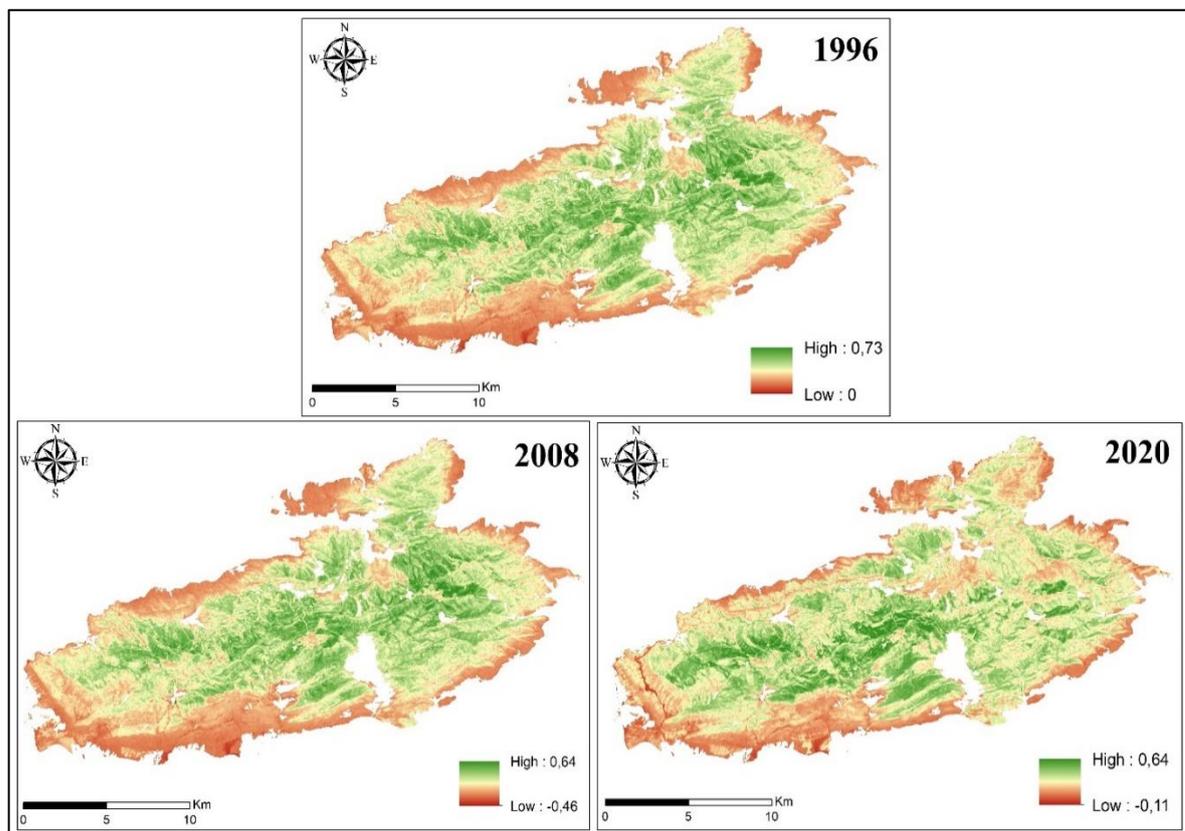
**Figure 63.** Reboisement de *Pinus halepensis* Mill.

## 2. Dynamique spatio-temporelle de la végétation dans les massifs de Boutaleb et Youssef entre 1996 et 2020.

### 2-1. Djebel Boutaleb

#### 2-1-1. Évolution de l'activité chlorophyllienne aux trois dates

Nous avons examiné la distribution de la couverture végétale sur l'ensemble de la zone d'étude à chaque date. Les résultats de l'NDVI indiquent une activité chlorophyllienne plus importante en 1996 qu'en 2008 et 2020. Elles comprises entre 0 et 0,73 en 1996, entre -0,46 et 0,64 en 2008 et entre -0,11 et 0,64 en 2020. Les valeurs les plus élevées sont trouvées dans les zones dont l'altitude varie entre 1276 et 1875m, indiquant une forte densité de la couverture végétale. Les valeurs moyennes ont été trouvées dans les zones dont l'altitude varie entre 876 et 1275m, indiquant des zones avec une couverture végétale modérée. Les faibles valeurs sont situées dans les régions de 705 à 875m d'altitude et indiquent des broussailles, des terres cultivées et des zones sans végétation : bâti, eau, rochers. (Figure 64).

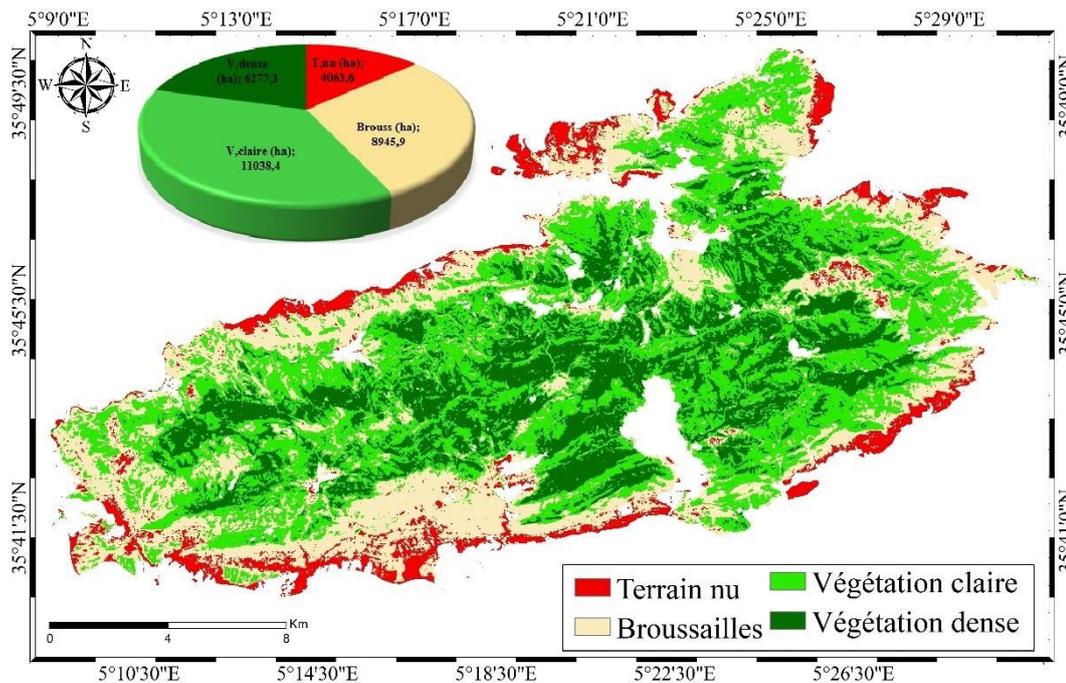


**Figure 64.** Carte de l'NDVI de Djebel Boutaleb en 1996, 2008 et 2020 (Gharbi, 2022).

### 2-1-2. L'état de l'occupation du sol en 1996, 2008 et 2020

En 1996, on remarque une dominance des forêts claires avec un taux de 36,4%, suivi par les broussailles (29,5%), les forêts denses (20,7%) et enfin les terrains nus (13,4%) (Figure 65). Concernant l'année 2008, l'occupation du sol est dominée par une végétation dense avec un taux de 38% soit 11493,3 ha, suivi par les forêts claires, les broussailles et enfin les terrains nus, avec 29% (8945,9 ha), 26% (7763,3 ha) et 7% (2122,8 ha) respectivement (Figures 66). En 2020, on remarque la dominance des forêts claires avec 33% (soit 9946,7 ha) et des forêts denses avec 31% (soit 9491,8 ha). En ce qui concerne les broussailles et les terrains nus, ils occupent respectivement 26% et 7% de la superficie totale (Figure 67).

Les superficies indiquent une perte des forêts claires et des broussailles, accompagnée d'une augmentation de la végétation dense.



**Figure 65.** Carte d'occupation du sol de Djebel Boutaleb en 1996 (Gharbi, 2022).

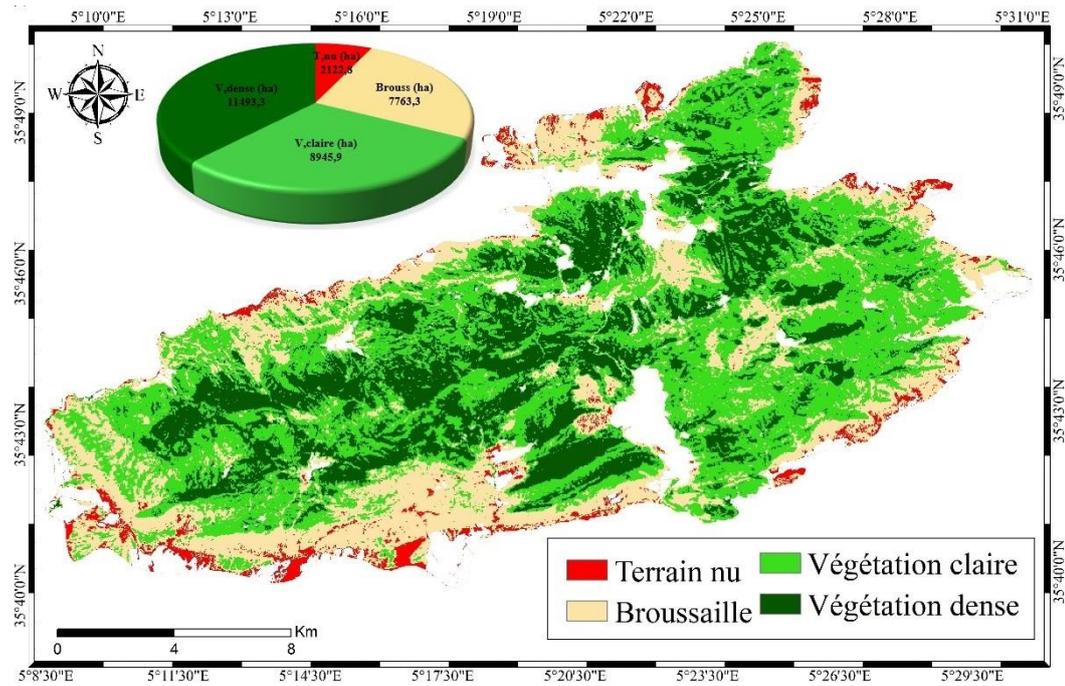


Figure 66. Carte d'occupation du sol de Djebel Boutaleb en 2008 (Gharbi, 2022).

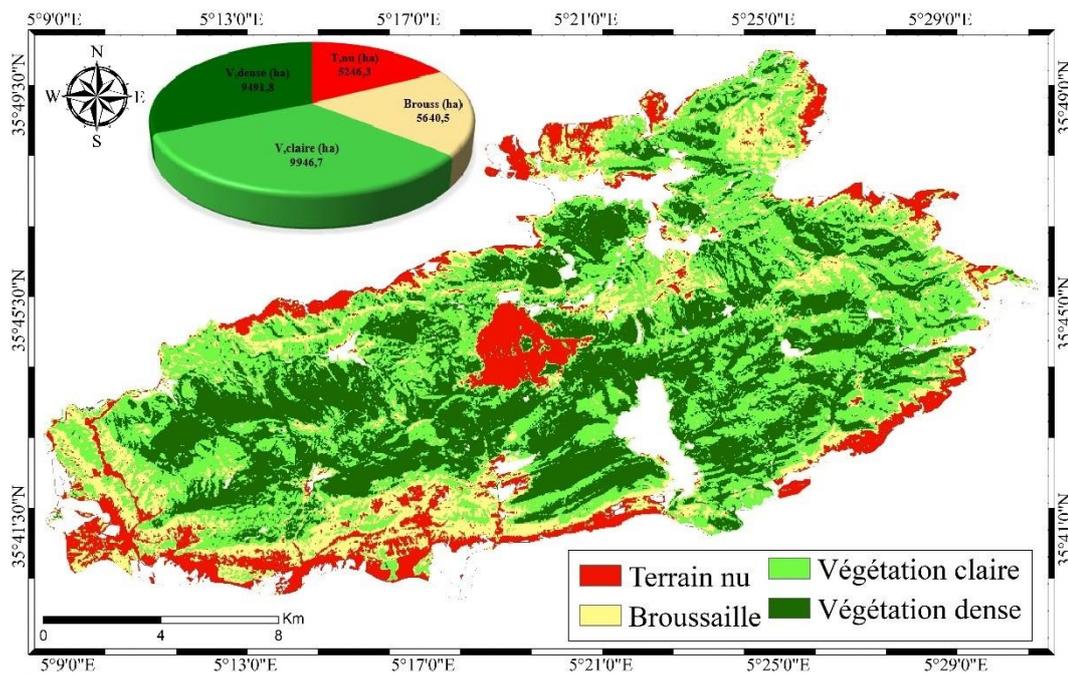


Figure 67. Carte d'occupation du sol de Djebel Boutaleb en 2020 (Gharbi, 2022).

### 2-1-3. Validation de la classification

La qualité de la classification supervisée est évaluée par des échantillons de validation obtenus par photo-interprétation et de relevés de terrain. Deux indices issus de la matrice de

confusion sont souvent utilisés pour la validation de la performance des classifications : la précision globale (la proportion des pixels bien classés calculée en pourcentage) et l'indice de Kappa (le rapport entre le nombre de pixels bien classés et le total des pixels sondés) (Gana, 2018). Le tableau 22 illustre les résultats obtenus :

**Tableau 22.** Les indices de précisions de la classification des images Landsat pour la période (1996, 2008 et 2020).

Les classes d'occupation du sol		Terrain nu	Broussailles	Végétation claire	Végétation dense	Précision globale	Coefficient de Kappa
1996	Précision cartographique	90%	85%	90%	95%	90%	87,7%
	Précision thématique	94,3%	88,4%	80%	95%		
2008	Précision cartographique	90 %	90 %	85 %	95 %	91 %	87,5 %
	Précision thématique	94,7 %	85,7 %	89,5 %	95%		
2020	Précision cartographique	100 %	85 %	95 %	87,5 %	91 %	88 %
	Précision thématique	100 %	89,4 %	73 %	97,2 %		

La précision dépasse 85 % pour la majorité des classes. Les forêts denses, les terrains nus et les broussailles sont particulièrement bien classées. Leur précision cartographique est fidèle avec (85-100%) de précision. Une confusion entre les forêts claires et les broussailles ont été remarquées. Ces confusions entre ces deux classes peuvent être expliquée par une réponse spectrale proche.

Quant aux valeurs du coefficient de Kappa, elles sont estimées à : 87,7%, 87,5% et 88% respectivement aux années 1996, 2008 et 2020, sachant que la valeur critique de ce dernier au-delà de laquelle une classification est jugée acceptable est de 75 % (Girard et Girard, 1989), donc, on peut dire qu'il y a une très bonne correspondance entre les observations de terrain et la cartographie issue de la classification de données de la télédétection.

### 2-1-4. Détection des changements

Le croisement entre deux cartes d'occupation du sol de deux dates différentes donnera des cartes de changements de différentes unités d'occupation du sol ainsi que leurs statistiques respectives. La quantification de cette dynamique a permis de dresser un bilan sur l'état de l'occupation du sol (Gharbi et Meziani, 2019).

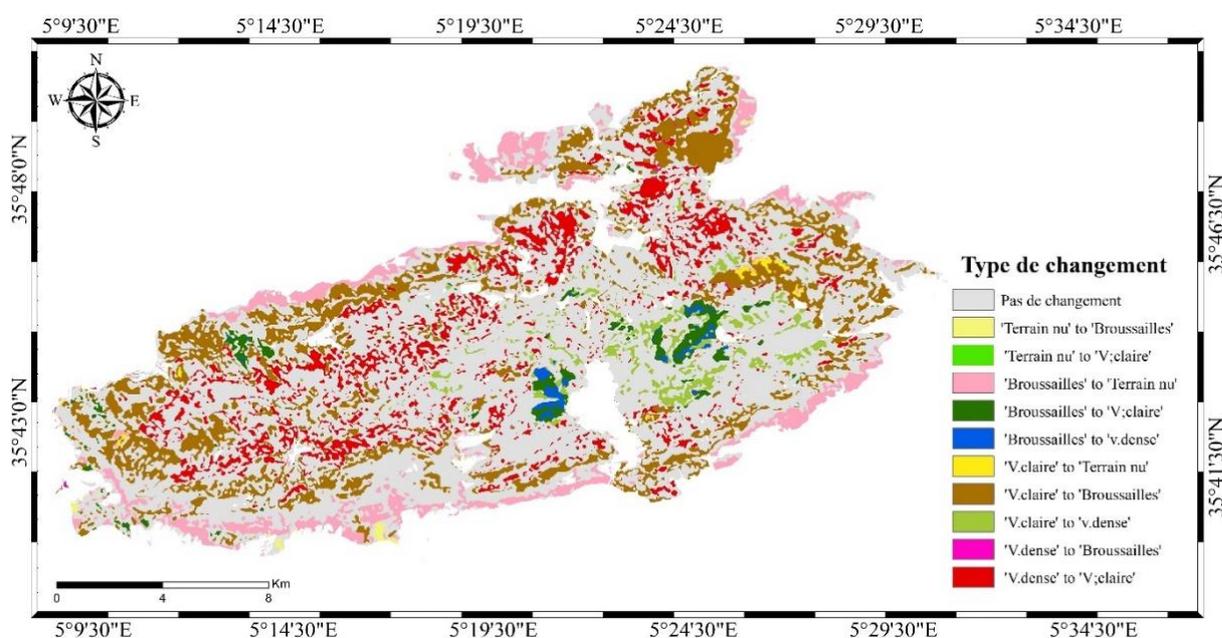
#### ❖ Analyse des changements d'occupation du sol entre 1996 et 2008

La figure 68, illustre spatialement et quantitativement, les différents changements survenus dans le massif de Boutaleb sur une période de 12ans. Durant cette période, 61,3% soit 18588,5 ha de la surface totale reste stable, par contre 38,7% a subi de changement.

Les forêts claires sont l'unité d'occupation du sol la plus touchés avec 17,7% de la surface totale occupé en 1996, répartie entre progression et régression.

On remarque une augmentation de la surface des forêts denses avec un taux de 5216 ha soit 17,2%. On a enregistré aussi une diminution de la surface de terrain nu, de broussailles et de végétation claire avec 1940,8 ha, 1182,6 ha et 2092,5 ha respectivement (Tableau 23).

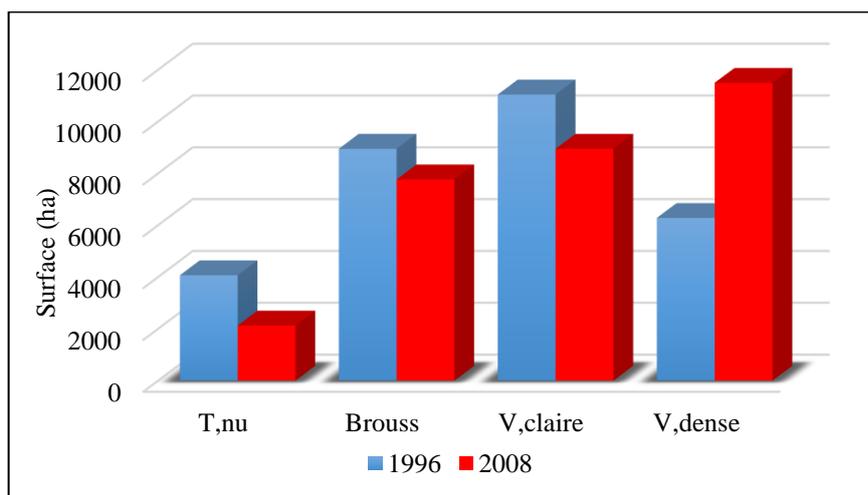
Entre 1996 et 2008, la végétation de Djebel Boutaleb a gagné 1582,7ha et perdu 10123,8ha de sa surface totale. Le bilan global de changement de la végétation, sur l'ensemble de la période, est négatif avec une perte de 8541,1ha de la surface totale du massif (Figure 69, Tableau 24).



**Figure 68.** Changements de l'occupation du sol de Djebel Boutaleb entre 1996 et 2008 (Gharbi, 2022).

**Tableau 23.** Taux de changement d'occupation du sol de Djebel Boutaleb entre 1996 et 2008.

Types d'occupation	1996		2008		Changement	
	S (ha)	S (%)	S (ha)	S (%)	S (ha)	S (%)
Terrain nu	4063,6	13,4	2122,8	7	-1940,8	-6,4
Broussailles	8945,9	29,5	7763,3	25,6	-1182,6	-3,9
Végétation claire	11038,4	36,4	8945,9	29,5	-2092,5	-6,9
Végétation dense	6277,3	20,7	11493,3	37,9	5216	17,2

**Figure 69.** Répartition des différents types d'occupation du sol de Djebel Boutaleb en 2008 et en 2020.**Tableau 24.** Changements de l'occupation du sol de Djebel Boutaleb entre 1996 et 2008.

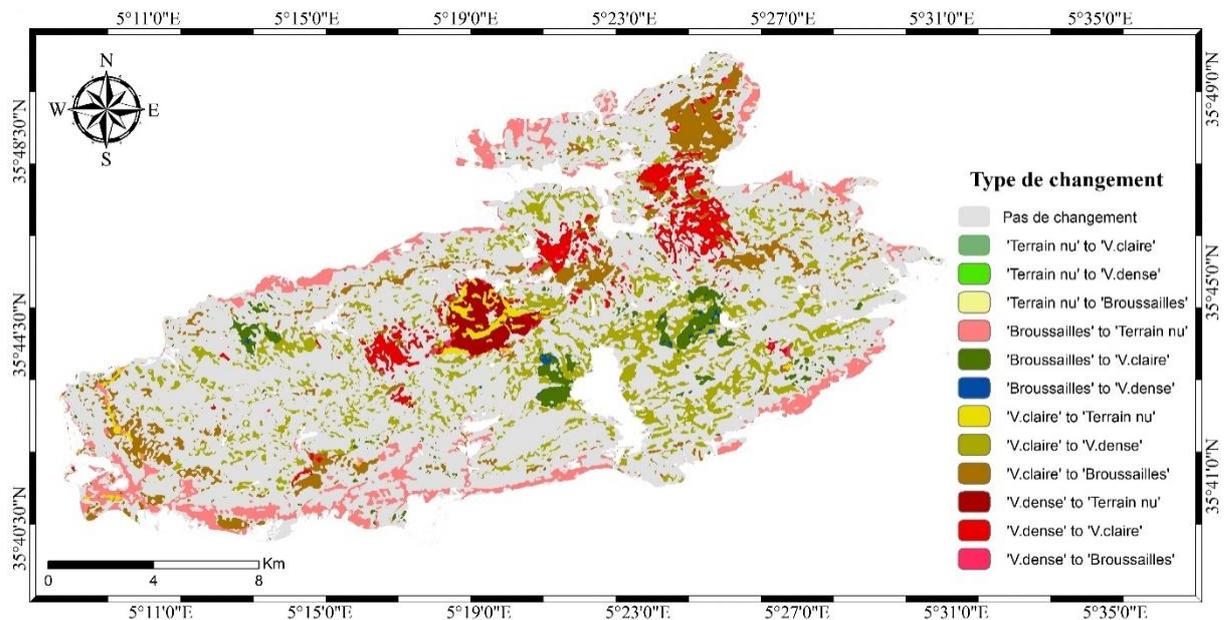
Type de changement	S (ha)	S (%)	Evolution
Pas de changement	18588,5	61,3	Stabilité
Terrain nu à Broussailles	272,8	1	Progression
Terrain nu à végétation claire	0,3	0,001	Progression
Terrain nu à végétation dense	6,1	0,02	Progression
Broussailles à terrain nu	2910,1	9,6	Régression
Broussailles à végétation claire	485	1,6	Progression
Broussailles à végétation dense	151,6	0,5	Progression
Végétation claire à terrain nu	60,6	0,2	Régression
Végétation claire à broussailles	4638	15,3	Régression
Végétation claire à végétation dense	666,9	2,2	Progression
Végétation dense à broussailles	30,1	0,1	Régression
Végétation dense à végétation claires	2485,7	8,2	Régression
Total	30314	100	/

### ❖ Analyse des changements d'occupation du sol entre 2008 et 2020

L'analyse de la carte de changement (Figure 70) et le tableau 25, issues par le croisement des cartes d'occupation du sol de l'année 2008 et 2020, permet de constater que 32,75% a subi de changement, par contre 67,25% de la zone d'étude reste stable. Parmi les unités d'occupation des sols qui ont subi des changements, on remarque que les forêts claires sont le plus touché avec 5064,3ha soit 16,75 % de la superficie occupée en 2008, répartie entre progression ou régression.

On remarque aussi une diminution de la surface des broussailles par 2122,8ha soit (7%) et des forêts denses par 2001,5 ha soit (6,6%). Une augmentation des sols nus par 3123,5ha soit (10,3%) a été enregistré.

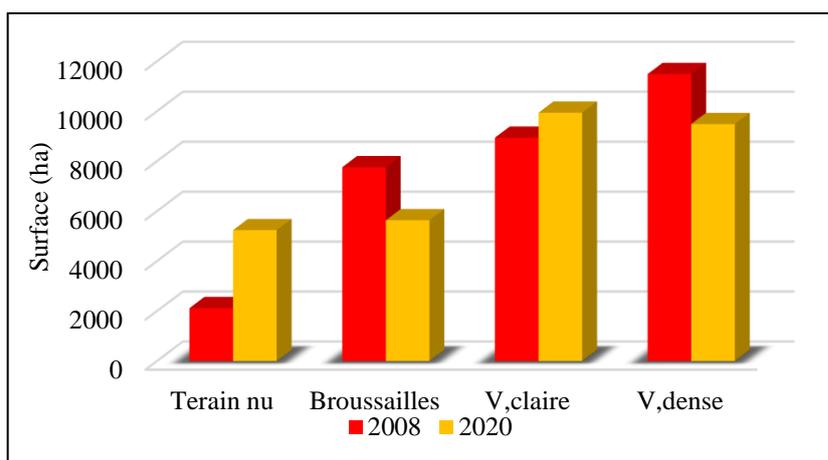
Sur une période de 12ans (2008-2020), la végétation de Djebel Boutaleb a progressé de 3506,6ha et régressé de 6416,8ha. On constate que le bilan global de changement de la végétation est, donc, négatif avec une perte de 2910,2ha de la surface totale du massif (Figure 71, Tableau 26).



**Figure 70.** Carte des changements de l'occupation du sol de Djebel Boutaleb entre 2008 et 2020 (Gharbi, 2022).

**Tableau 25.** Taux de changement d'occupation du sol de Djebel Boutaleb entre 2008 et 2020.

Types d'occupation	2008		2020		Changement (2008-2020)	
	S (ha)	S (%)	S (ha)	S (%)	S (ha)	S (%)
Terrain nu	2122,8	7	5246,3	17,3	3123,5	10,3
Broussailles	7763,3	25,6	5640,5	18,6	-2122,8	-7
Végétation claire	8945,9	29,5	9946,7	32,8	1000,8	3,3
Végétation dense	11493,3	37,9	9491,8	31,3	-2001,5	-6,6

**Figure 71.** Répartition des différents types d'occupation du sol de Djebel Boutaleb en 2008 et en 2020.**Tableau 26.** Changements de l'occupation du sol de Djebel Boutaleb entre 2008 et 2020.

Type de changement	S (%)	S (ha)	Evolution
Pas de changement	67,25	20390,6	<b>Stabilité</b>
Terrain nu à broussailles	0,004	1,2	<b>Progression</b>
Terrain nu à végétation dense	0,02	6,1	<b>Progression</b>
Terrain nu à végétation claire	0,04	12,1	<b>Progression</b>
Broussailles à terrain nu	9	2729,3	<b>Régression</b>
Broussailles à végétation claire	2,1	636,8	<b>Progression</b>
Broussailles à végétation dense	0,2	60,5	<b>Progression</b>
Végétation claire à terrain nu	0,8	242,6	<b>Régression</b>
Végétation claire à végétation dense	9,2	2789,9	<b>Progression</b>
Végétation claire à broussailles	6,7	2031,8	<b>Régression</b>
Végétation dense à terrain nu	1,3	394,2	<b>Régression</b>
Végétation dense à végétation claire	3,2	970,4	<b>Régression</b>
Végétation dense à broussaille	0,16	48,5	<b>Régression</b>
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>30314</b>	<b>/</b>

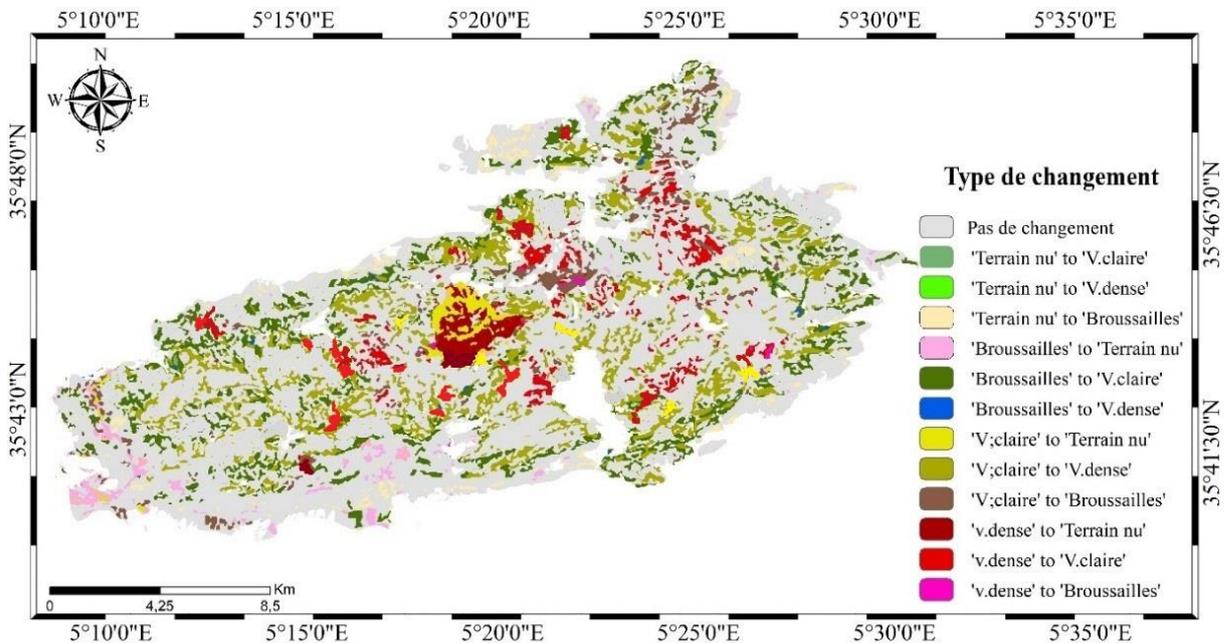
### ❖ Analyse des changements d'occupation du sol entre 1996 et 2020

L'analyse de la période globale étudiée (1996-2020) a permis de constater que 63,2% de la surface totale de Djebel Boutaleb n'a subi d'aucun changement, ce qui correspond à une superficie de 19158,4 ha (Figure 72).

De manière générale, les changements intervenus dans le paysage entre 1996 et 2020 indiquent une progression des surfaces de forêts denses par 3,9% et de terrain nu par 10,6% et une régression de forêts claires et de broussailles par 10,9% et 3,6% respectivement. En effet, la régression occupe le centre, cette région est souvent soumise à des feux, la partie Nord-est et le Sud-ouest du massif.

Les matrices de changements (Tableau 27), indiquent une progression importante de végétation claire, de broussailles et de terrains nus au détriment de la végétation dense (4348,8 ha), et de broussailles et de terrain nus au détriment de la végétation claire (3289,2ha).

Entre 1996 et 2020, la végétation de Djebel Boutaleb a progressé par 9,3% et a régressé par 27,5%. Le bilan global de changement de la végétation, sur l'ensemble de la période, est négatif avec une perte de 5517,1 ha soit 18,2% de la surface totale du massif (Tableau 28). Les formations les plus touchées sont celles de *Pinus halepensis* Mill., *Quercus ilex* L. et *Juniperus phoenicea* L.



**Figure 72.** Changements de l'occupation du sol de Djebel Boutaleb entre 1996 et 2020 (Gharbi, 2022).

**Tableau 27.** Taux de changement d'occupation du sol de Djebel Boutaleb entre 1996 et 2020.

Type d'occupation	1996		2020		Taux de changement	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
<b>Terrain nu</b>	4063,6	13,4	5246,3	17,3	1182,7	3,9
<b>Broussaille</b>	8945,9	29,5	5640,5	18,6	-3305,4	-10,9
<b>Végétation claire</b>	11038,4	36,4	9946,7	32,8	-1091,7	-3,6
<b>Végétation dense</b>	6277,3	20,7	9491,8	31,3	3214,5	10,6

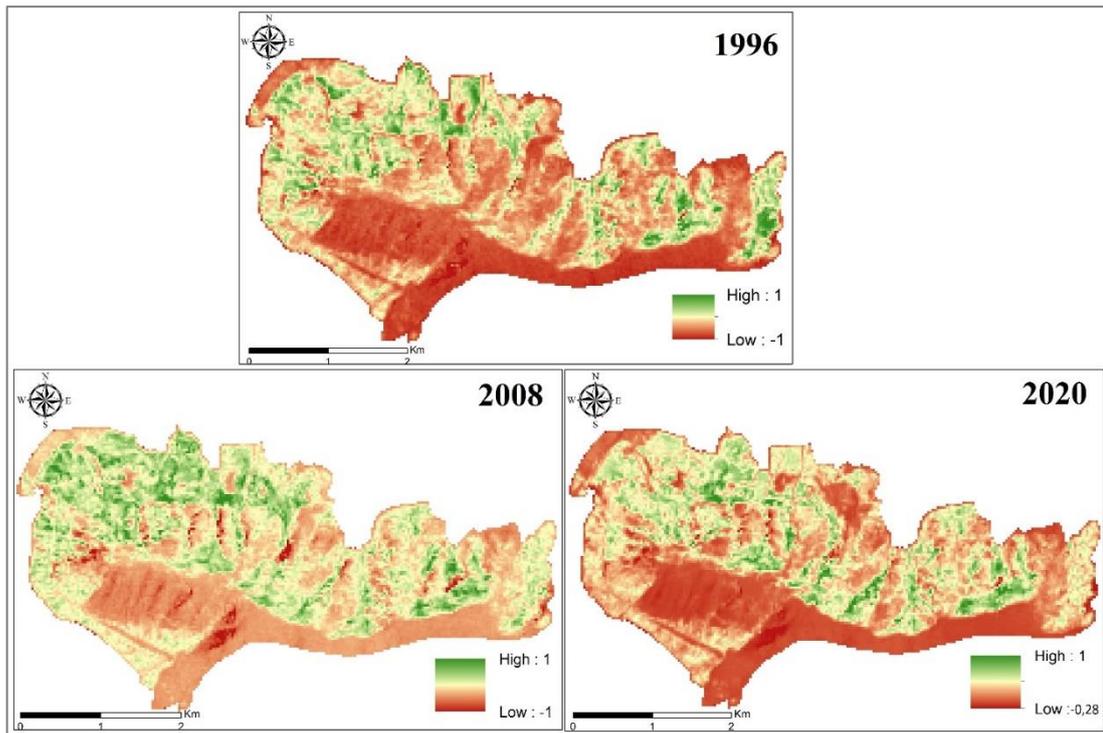
**Tableau 28.** Changements de l'occupation du sol de Djebel Boutaleb entre 1996 et 2020.

Type de changement	S (ha)	S (%)	Evolution
<b>Pas de changement</b>	19153,3	63,2	<b>Stabilité</b>
<b>Terrain nu à végétation claire</b>	299	1	<b>Progression</b>
<b>Terrain nu à végétation dense</b>	312,6	1	<b>Progression</b>
<b>Terrain nu à Broussailles</b>	769,3	2,5	<b>Progression</b>
<b>Broussailles à Terrain nu</b>	683,5	2,3	<b>Régression</b>
<b>Broussailles à végétation claire</b>	757	2,5	<b>Progression</b>
<b>Broussailles à végétation dense</b>	30,5	0,1	<b>Progression</b>
<b>Végétation claire à terrain nu</b>	14,8	0,05	<b>Régression</b>
<b>Végétation claire à végétation dense</b>	652,4	2,2	<b>Progression</b>
<b>Végétation claire à Broussailles</b>	3274,4	10,8	<b>Régression</b>
<b>Végétation dense à terrain nu</b>	1,3	0,004	<b>Régression</b>
<b>Végétation dense à végétation claire</b>	4280,4	14,1	<b>Régression</b>
<b>Végétation dense à broussailles</b>	67,1	0,2	<b>Régression</b>
<b>Total</b>	<b>30295,6</b>	<b>100</b>	<b>/</b>

## 2-2. Djebel Youssef

### 2-2-1. Évolution de l'activité chlorophyllienne aux trois dates

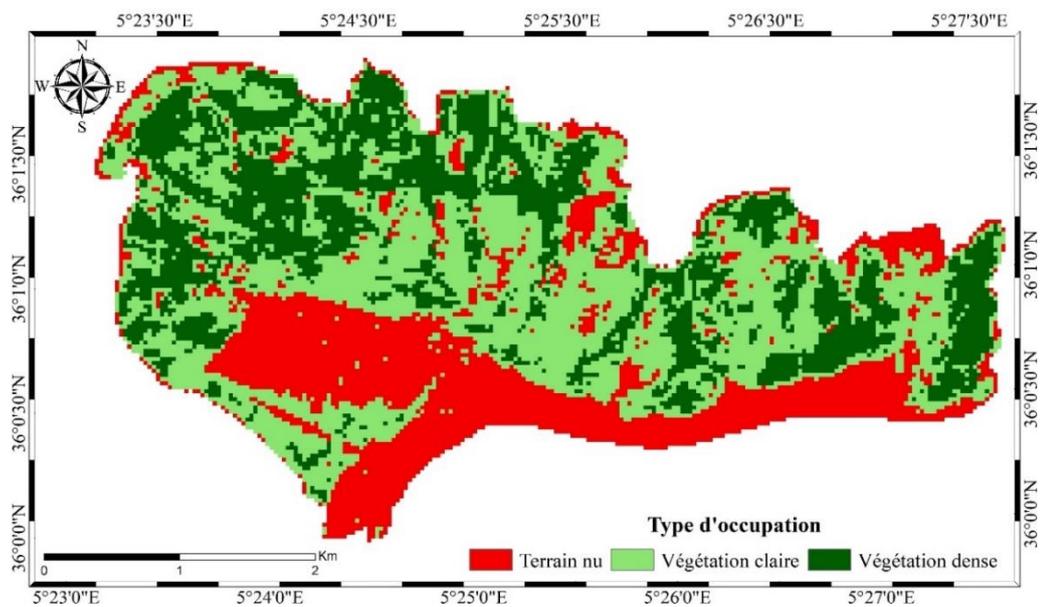
D'après la figure 73, on remarque une variabilité dans les valeurs de l'NDVI. Elles sont entre -1 et 1 pour les années 1996 et 2008, et entre -0,28 et 1 pour l'année 2020. Les valeurs les plus élevées sont trouvées principalement dans les hautes altitudes, cela indique une couverture végétale dense. En revanche, les valeurs moyennes ont été trouvées dans les zones de moyennes altitudes, indiquant des zones avec une couverture végétale modérée. Concernant les faibles valeurs, elles sont trouvées dans les régions de basses altitudes et indiquent des terres cultivées et des terrains sans végétation (sol nu).



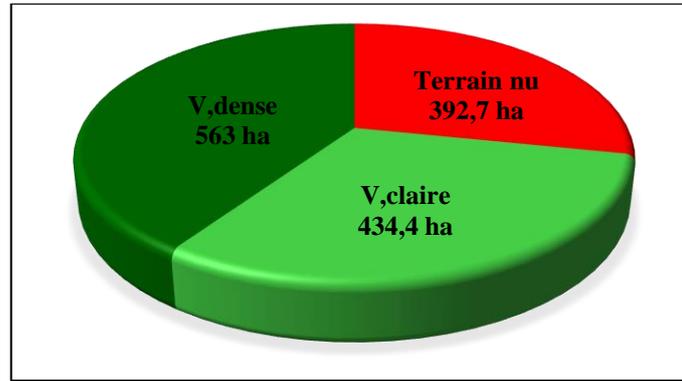
**Figure 73.** Carte de l'NDVI de Djebel Boutaleb en 1996, 2008 et 2020 (Gharbi, 2022).

### 2-2-2. L'état de l'occupation du sol en 1996, 2008 et 2020

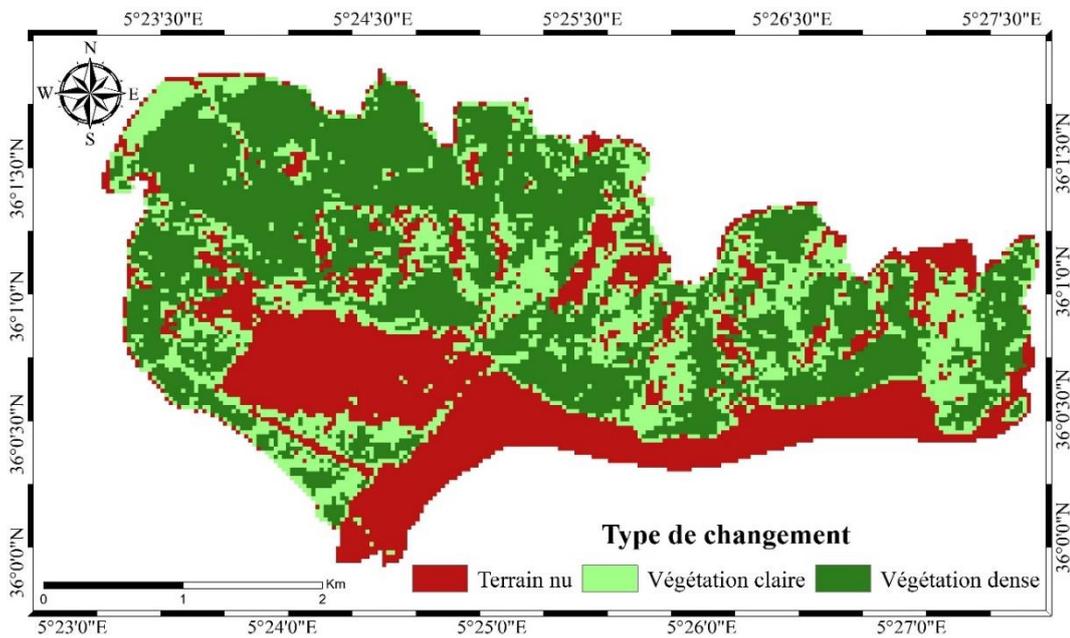
En 1996, 2008 et 2020, on remarque une dominance des forêts dense avec une surface estimé à 563 ha, 607,5ha et 647,8ha respectivement, suivi par les forêts claires (434,4 ha, 354,5 ha et 403,1 ha) et les terrains nus (392,7 ha, 428,1 ha et 339,2 ha) (Figures 74, 75, 76, 77, 78 et 79).



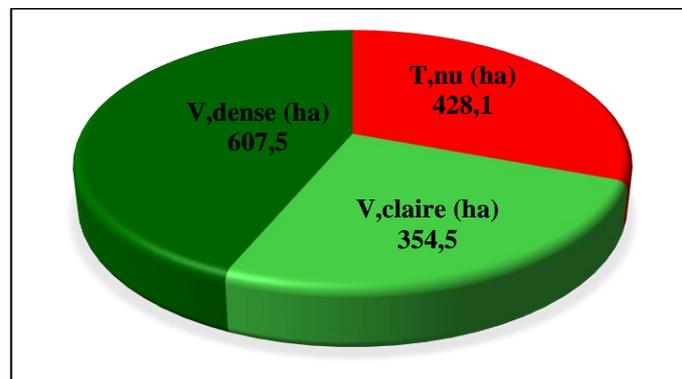
**Figure 74.** Carte d'occupation du sol de Djebel Youssef en 1996 (Gharbi, 2022).



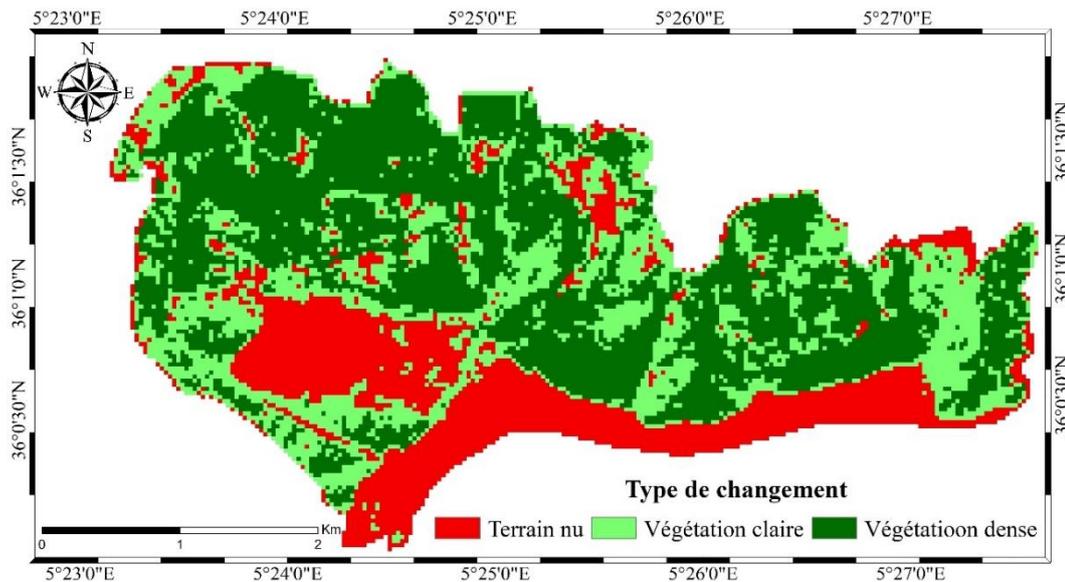
**Figure 75.** Répartition des différents types d'occupation du sol de Djebel Youssef en 1996.



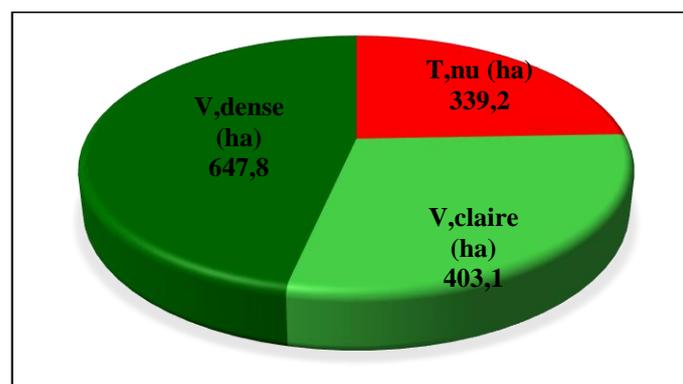
**Figure 76.** Carte d'occupation du sol de Djebel Youssef en 2008 (Gharbi, 2022).



**Figure 77.** Répartition des différents types d'occupation du sol de Djebel Youssef en 2008.



**Figure 78.** Carte d'occupation du sol de Djebel Youssef en 2020 (Gharbi, 2022).



**Figure 79.** Répartition des différents types d'occupation du sol de Djebel Youssef en 2008.

### 2-2-3. Validation de la classification

Le tableau 29 montre que la précision dépasse 89 % pour la majorité des classes.

Les classes sont particulièrement bien classées. Leur précision cartographique est fidèle avec (84-100%) de précision. La réponse spectrale des forêts denses est proche de celle des forêts claires, cela a permis d'enregistrer quelques confusions.

Concernant le coefficient de Kappa, il est estimé à 83,2% en 1996, 87,8% en 2008 et 89,3% en 2020. On peut dire, donc, qu'il y a une très bonne correspondance entre les observations de terrain et la cartographie issue de la classification de données de la télédétection.

**Tableau 29.** Les indices de précisions de la classification des images Landsat pour la période (1996, 2008 et 2020).

Les classes d'occupation du sol		Terrain nu	Végétation claire	Végétation dense	Précision globale	Coefficient de Kappa
1996	Précision cartographique	92,5%	88,6%	84%	89%	83,2%
	Précision thématique	92,5%	88,6%	84%		
2008	Précision cartographique	95 %	94,3 %	84 %	92 %	87,8 %
	Précision thématique	100%	84,6%	91,3%		
2020	Précision cartographique	92,5%	94,3%	92%	93 %	89,3 %
	Précision thématique	100%	89,2%	88,5%		

#### 2-2-4. Détection des changements

##### ❖ Analyse des changements d'occupation du sol entre 1996 et 2008

Durant les 12 ans, de 1996 à 2008, 72,5% de Djebel Youssef reste stable. Durant la même période, 22,5% soit 312,6 ha a subi de changement positif et 5% de changement négatif. On Remarque que la surface des forêts claires a diminué par 5,75% soit 79,9 ha. En revanche les terrains nus et les forêts dense ont progressé par 2,55% (soit 35,4 ha) et 3,2% (44,5%) (Figure 80 et 81, Tableau 30, Tableau 31).

Sur une période de 12ans, la végétation de Djebel Youssef a progressé de 313,2 ha et enregistré une perte de 68,6 ha. Le bilan global est positif avec une progression de 244,6 ha soit 17,5%.

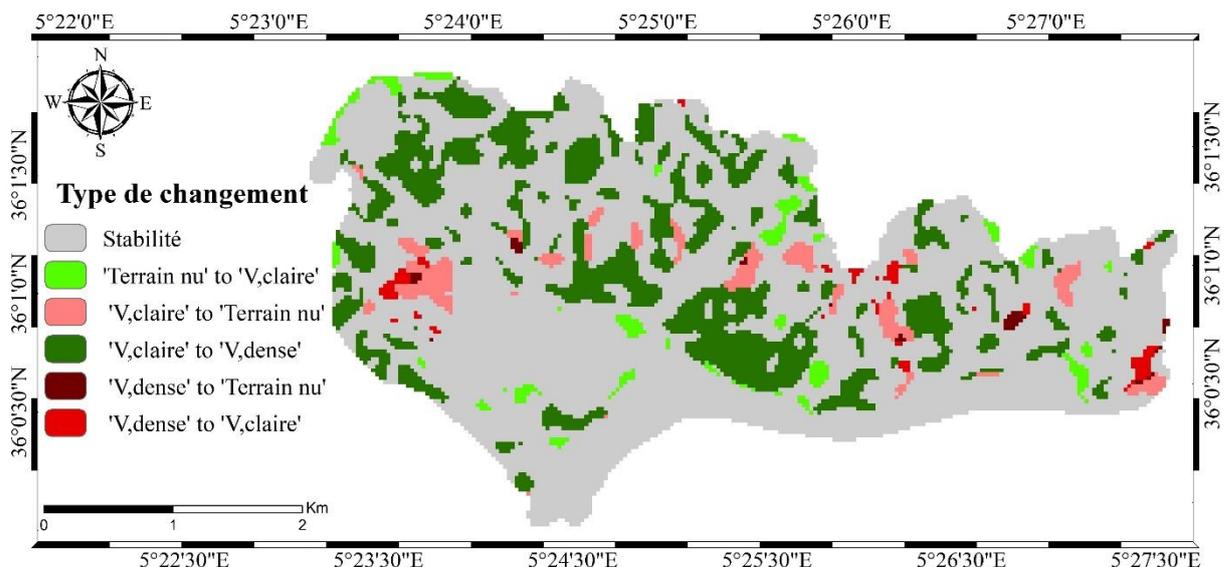


Figure 80. Carte des changements de l'occupation du sol de Djebel Youssef entre 1996 et 2008 (Gharbi, 2022).

Tableau 30. Taux de changement d'occupation du sol de Djebel Youssef entre 1996 et 2008.

Types d'occupation	1996		2008		Changement	
	S (%)	S (ha)	S (%)	S (ha)	S (%)	S (ha)
Terrain nu	28,25	392,7	30,8	428,1	2,55	35,4
Végétation claire	31,25	434,4	25,5	354,5	-5,75	-79,9
Végétation dense	40,5	563	43,7	607,5	3,2	44,5

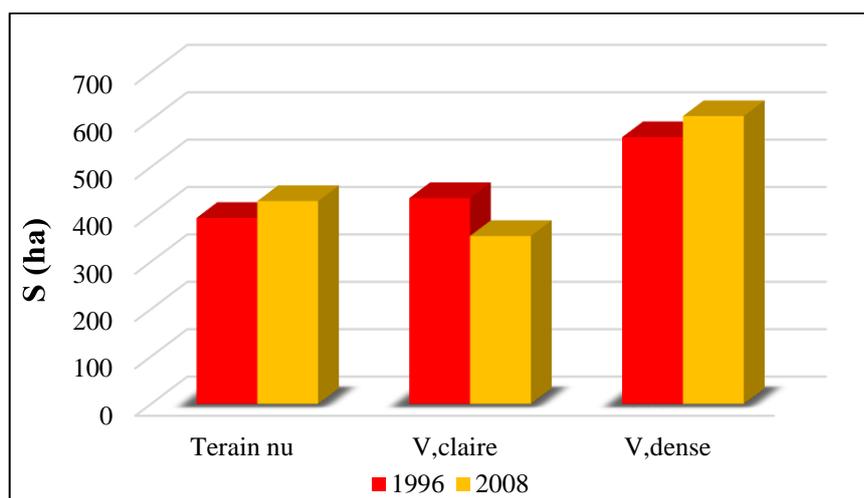


Figure 81. Répartition des différents types d'occupation du sol de Djebel Boutaleb en 1996 et en 2008.

**Tableau 31.** Changements de l'occupation du sol de Djebel Youssef entre 1996 et 2008.

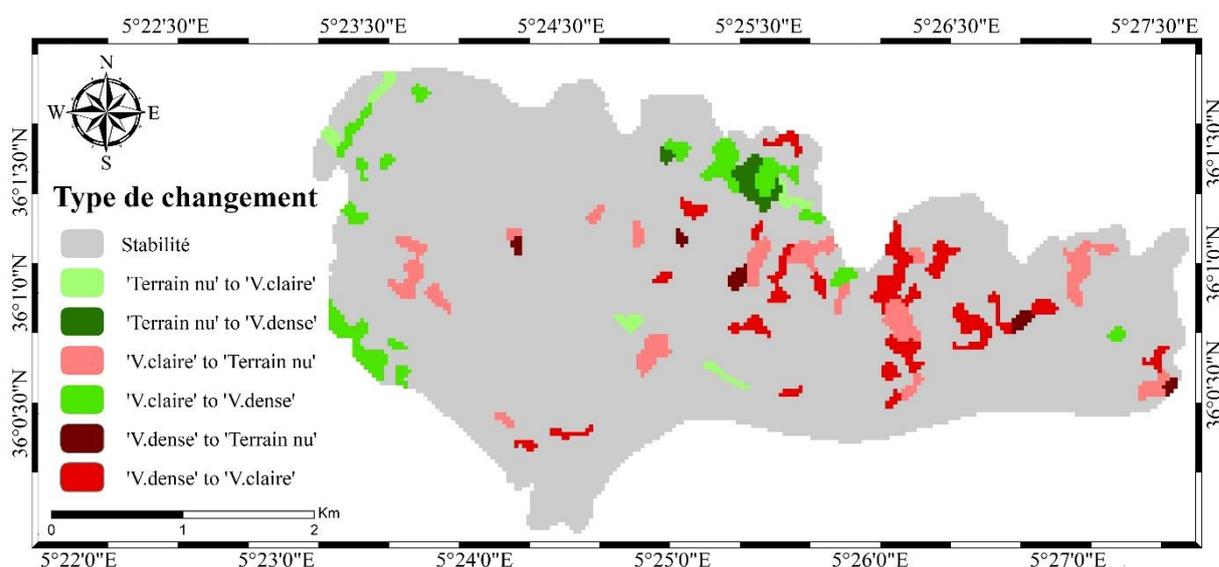
Type de changement	S (ha)	S (%)	Evolution
Pas de changement	1008,4	72,5	Stabilité
Terrain nu à végétation claire	35,2	2,5	Progression
Végétation claire à terrain nu	49,7	3,6	Régression
Végétation claire à végétation dense	278	20	Progression
Végétation dense à terrain nu	5,4	0,4	Régression
Végétation dense à végétation claire	13,5	1	Régression
<b>Total</b>	<b>1390,1</b>	<b>100</b>	/

#### ❖ Analyse des changements d'occupation du sol entre 2008 et 2020

Les figures 82 et 83 et les tableaux 32 et 33 montrent que 12% de la surface totale (soit 166,7 ha) a subi de changement, par contre 88% reste stable. Les terrains nus forêts claires comme dans le Djebel Boutaleb sont le plus touché avec 90,3ha soit 6,5% de la superficie occupée en 2008, répartie entre progression ou régression.

On remarque une diminution de la surface des sols par 88,9ha soit (6,4%) et une augmentation des forêts denses par 40,3ha soit (2,9%).

Entre 2008 et 2020, la végétation de Djebel Youssef a enregistré un gain de 59,7 ha et une perte de 107 ha. Le bilan global est négatif avec une perte de 47,3 ha soit 3,4%.



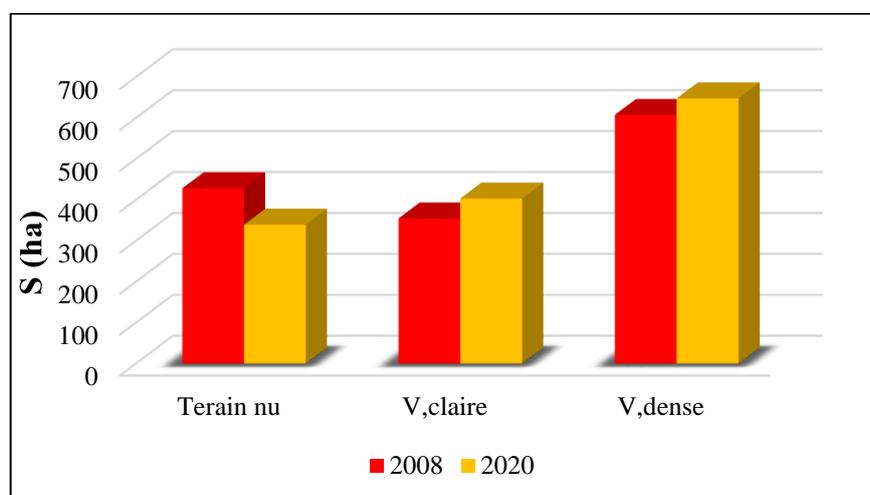
**Figure 82.** Carte des changements de l'occupation du sol de Djebel Youssef entre 2008 et 2020 (Gharbi, 2022).

**Tableau 32.** Taux de changement d'occupation du sol de Djebel Youssef entre 2008 et 2020.

Types d'occupation	2008		2020		Changement	
	S (%)	S (ha)	S (%)	S (ha)	S (%)	S (ha)
Terrain nu	30,8	428,1	24,4	339,2	-6,4	-88,9
Végétation claire	25,5	354,5	29	403,1	23,1	48,6
Végétation dense	43,7	607,5	46,6	647,8	2,9	40,3

**Tableau 33.** Changements de l'occupation du sol de Djebel Youssef entre 2008 et 2020.

Type de changement	S (%)	S (ha)	Evolution
Pas de changement	88	1223,4	Stabilité
Terrain nu à végétation claire	0,8	11,1	Progression
Terrain nu à végétation dense	0,6	8,3	Progression
Végétation claire à terrain nu	3,6	50	Régression
Végétation claire à végétation dense	2,9	40,3	Progression
Végétation dense à terrain nu	0,5	7	Régression
Végétation dense à Végétation claire	3,6	50	Régression
Total	100	1390,1	/

**Figure 83.** Répartition des différents types d'occupation du sol de Djebel Boutaleb en 2008 et en 2022.

#### ❖ Analyse des changements d'occupation du sol entre 1996 et 2020

L'analyse des bilans des 2 périodes étudiées, nous renseigne sur l'évolution de la végétation entre 1996 et 2020 (Figure 84, Tableau 34). On constate que 72,1% de la surface totale de Djebel Youssef reste stable, ce qui correspond à une superficie de 1002,1 ha sur une

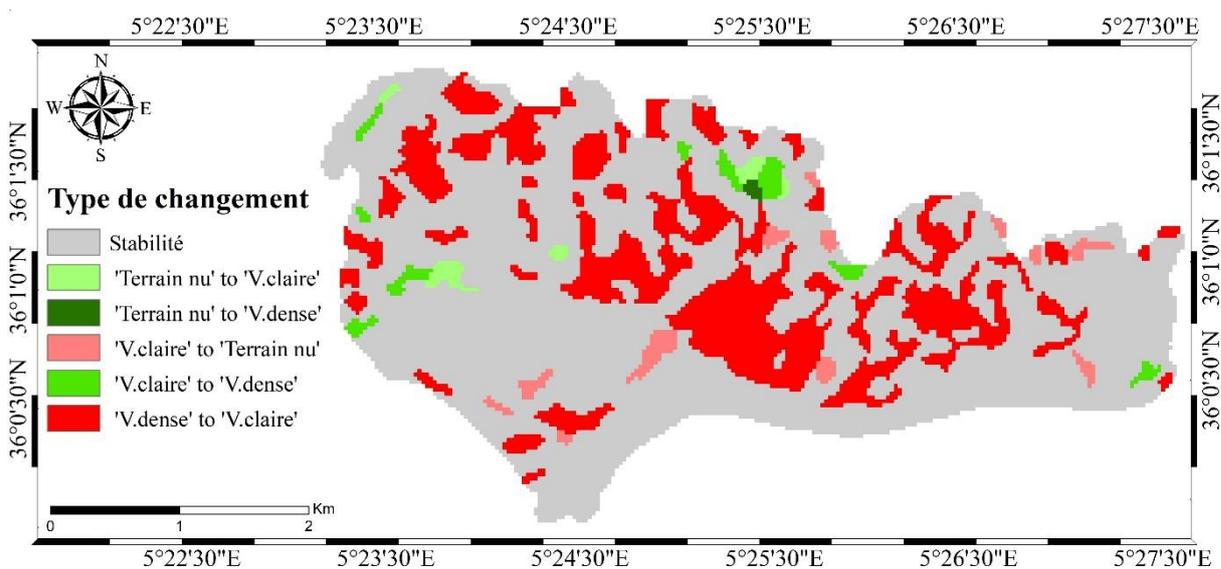
surface totale de 1390,1 ha. On remarque aussi un changement dans le reste du massif (27,9%). Ce changement est réparti entre progression et régression.

La surface des terrains nus a diminué par 3,85% ; cette diminution est considérée comme positive, car 0,9% de cette surface est devenu une forêt claire et 0,1% une forêt dense.

La surface de végétation claire a également enregistré une diminution de 2,25%. Elle est devenue des terrains nus. Quant à la végétation dense, elle a progressé par 6,1% (soit 84,8 ha).

Les matrices de changements (Tableau 35, Figure 85), indiquent une augmentation importante de la surface de végétation claire au détriment de la végétation dense (323,2 ha) et de terrain nu au détriment de la végétation claire (27,9 ha).

Sur une période de 24ans, la végétation de Djebel Youssef a enregistré un gain de 36,9 ha et une perte de 351,1 ha. Le bilan global est négatif avec une régression de 314,2 ha soit 22,6%.



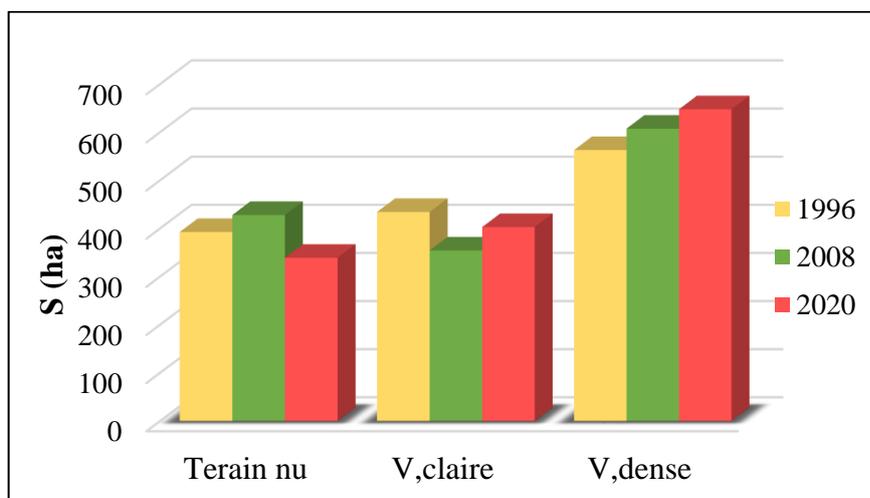
**Figure 84.** Carte des changements de l'occupation du sol de Djebel Youssef entre 1996 et 2020 (Gharbi, 2022).

**Tableau 34.** Taux de changement d'occupation du sol de Djebel Youssef entre 1996 et 2020.

Types d'occupation	1996		2020		Taux de changement	
	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)
<b>Terrain nu</b>	28,25	392,7	24,4	339,2	-3,85	-53,5
<b>Végétation claire</b>	31,25	434,4	29	403,1	-2,25	-31,3
<b>Végétation dense</b>	40,5	563	46,6	647,8	6,1	84,8

**Tableau 35.** Changements de l'occupation du sol de Djebel Youssef entre 1996 et 2020.

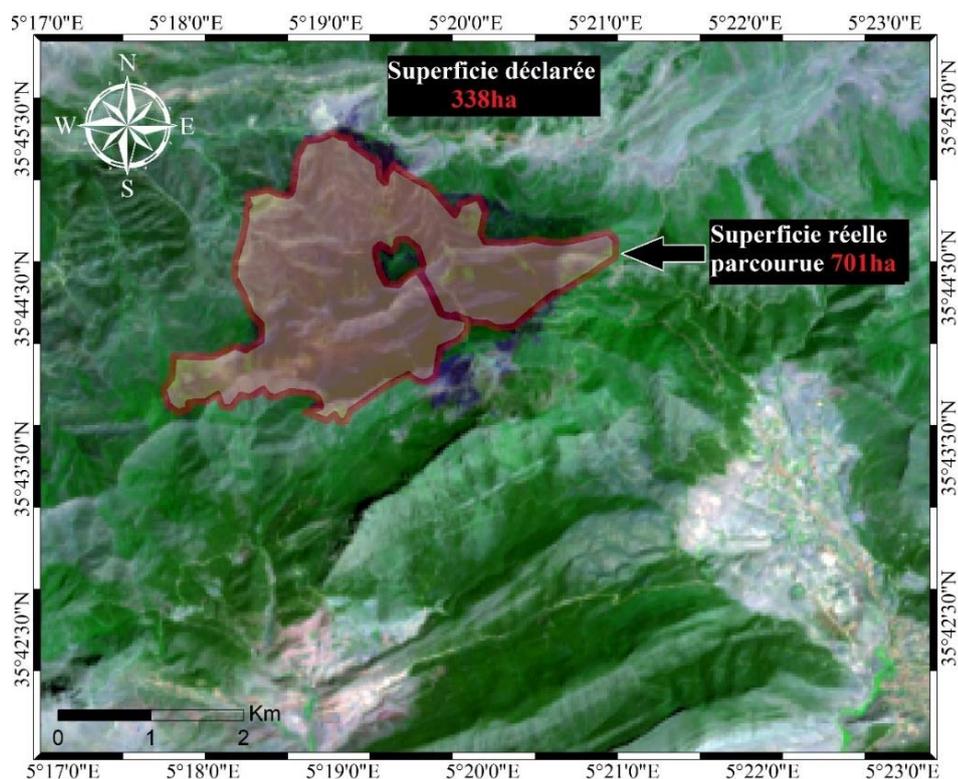
Type de changement	S (ha)	(%)	Evolution
Pas de changement	1002,1	72,1	Stabilité
Terrain nu à végétation claire	12,2	0,9	Progression
Terrain nu à végétation dense	1,8	0,1	Progression
Végétation claire à Terrain nu	27,9	2	Régression
Végétation claire à végétation dense	22,9	1,6	Progression
Végétation dense à végétation claire	323,2	23,3	Régression
<b>Total</b>	<b>1390,1</b>	<b>100</b>	/

**Figure 85.** Les superficies de chaque classe d'occupation du sol en 1996, 2008 et 2020.

### 3. Discussion de la dynamique spatio-temporelle de la végétation dans les massifs de Boutaleb et Youssef entre 1996 et 2020.

Une dynamique régressive a été enregistré à Djebel Boutaleb entre 1996 et 2020. Le rôle des feux, qui ont affecté plus de 2700 ha entre les deux dates, est loin d'être négligeable dans ce processus. Les feux sont, d'ailleurs, considérés par beaucoup d'auteurs comme un facteur important de la dégradation de la végétation (Madoui,1999 ; Madoui, 2013 ; Arfa, 2019).

Les départs de feu ne sont pas tous naturels. Le facteur humain, reste l'élément responsable de son déclenchement. Les incendies ont causé les plus grands ravages. Environ 2700ha détruits en Djebel Boutaleb entre 1982 et 2020 en moyen d'environ 72ha par an. Sachant que ces chiffres sont beaucoup plus élevés et ne peuvent pas refléter la réalité (Figure 86 et 87). Les conditions météorologiques et topographiques ainsi que la nature des peuplements composés essentiellement par des essences résineuses très inflammables (pin d'Alep) sont des facteurs très favorables à l'éclosion des incendies. Il est primordial de noter que la dégradation de la végétation s'accroît principalement proche de l'habitat rural, des routes et des pistes.



**Figure 86.** La surface parcourue par les feux vue par le satellite Landsat 8-OLI le 20-08-2020 (Gharbi, 2022).



**Figure 87.** Effet du feu de forêts dans le massif de Djebel Boutaleb

Le surpâturage est rangé par Ariori et Ozer (2005) dans les facteurs secondaires de dégradation, le plus souvent en empêchant la régénération naturelle des ligneux. Selon Solly, 2020, ils compromettent non seulement la régénération naturelle de la strate arbustive, mais également la repousse des rejets, surtout dans les forêts aménagées où est pratiquée la coupe du bois pour la production de charbon. Ils brûlent le tapis herbacé et certains arbres appréciés par le bétail, compromettant ainsi leur survie durant la saison sèche.

Selon Benabdeli, (1996), l'un des plus importants facteurs de dégradation de toutes les formations végétales forestières est le parcours qui a été, depuis que l'homme a pratiqué l'élevage pour sa nourriture et sa survie, un point de discordance entre l'éleveur et le forestier.

Les systèmes d'élevage de petits ruminants identifiés expriment un gradient de maîtrise allant des élevages très extensifs, où la survie de l'animal dépend exclusivement des ressources pastorales de la forêt et de leur variation selon les campagnes et les saisons, à des systèmes de plus en plus maîtrisés. Toutefois dans les systèmes plus soutenus, bien que la part des aliments distribués soit plus importante que dans le système pastoral, la participation des ressources sylvo-pastorales dans l'alimentation des troupeaux est stratégique et capitale ; leur part est variable selon les saisons, mais leur contribution est toujours effective, allant de 100% au printemps et parfois en été à des niveaux d'utilisation plus faibles en arrière-saison (20 à 50 %). Cela conduit à considérer que le rôle de la forêt dans l'alimentation des petits ruminants est

important et stratégique pour l'ensemble des systèmes d'élevage identifiés et existants dans le massif et sa périphérie.

Le surpâturage endommage la capacité écologique de l'écosystème (le tassement du sol, la destruction d'importantes espèces arbustives et herbacées, le broutage des jeunes pouces et la consommation des grains (Gana, 2018). Cette dégradation, selon Benabdeli (2000), est présentée par l'installation rapide des espèces résistantes et rustiques comme l'Asphodèle et Diss, qui ont des effets secondaires sur le sol (salinisation). Donc, le pâturage incontrôlé et excessif empêche la régénération des semis ou repousse et s'accompagne d'un débroussaillage qui conduit à la destruction progressive de la forêt.

D'après Madoui (2013), les délits de coupes sur le chêne vert pour le charbon et sur les bois précieux comme le cèdre ne sont pas négligeables. Le cas du Cèdre est déjà fragilisé par le phénomène de dépérissement (Bentouati et Bariteau, 2006) qui risque de le faire disparaître durant les prochaines décennies sous l'influence des changements climatiques.

Les coupes illicites sont observées sur les gros sujets de pin d'Alep et le genévrier. Le pin d'Alep est destiné à la fabrication des ustensiles de cuisine, et la distillation de genévrier oxycedre pour l'extraction de l'huile de Cade. Cette ancienne pratique est revenue en force de nos jours en raison de l'importance de la matière bois dans les ménages algériens. Il est beaucoup utilisé comme bois de chauffage et bois d'œuvre. Son écorce donnant du tanin est utilisée à des fins thérapeutiques et aussi à tanner du cuir (Madoui, 2013).

Les pratiques illicites se développent pour des raisons socio-économiques des populations riveraines et quand elles sont combinées avec les incendies elles appauvrissent énormément la couverture végétale du massif. Toutes les formes de perturbations font largement reculer les limites de la forêt. Les gestionnaires prennent conscience du danger des dégradations de l'écosystème forestier et l'émergence de répercussions négatives sur l'économie du massif qui est principalement agro-sylvo-pastorale, mais aussi sur l'écologie et le potentiel sylvicole que recèle le massif.

La relation socioéconomique de l'homme avec la forêt et les impacts de ses différentes activités sur les boisements à l'intérieur de cet écosystème, selon Madoui (2013), va nous éclairer sur le lien qui a existé et existe encore entre l'Homme, la forêt et les causes des feux. Comme nous allons le voir en détail, la majorité des causes connues en Algérie sont d'origine humaine et plus de 70% des feux sont d'origine inconnue et qui sont à notre avis également d'origine humaine.

L'érosion des sols est un autre facteur de dégradation qui dépend ainsi de nombreux facteurs comme (Figure 88) :

- ⇒ **La nature des sols** : Chaque type de roches présente une résistance différente vis-à-vis de l'érosion dont le marne, argile et gré, alluvions, calcaire ont une sensibilité très forte, forte moyenne et faible respectivement (Gana, 2018). Le marne et le gré se trouvent presque dans tout le massif de Djebel Boutaleb ; par contre, Djebel Youssef se caractérise principalement par des sols calcaires où le risque d'érosion est faible ;
- ⇒ **La pente** : Les fortes pentes sont en général à l'origine d'une érosion. Les pentes les plus abruptes ont une forte sensibilité. Elles se concentrent essentiellement dans les parties amonts caractérisés par un relief montagneux où la pente dépasse 50%. Quant aux pentes faibles et moyennes, elles sont réparties en aval où le risque d'érosion est moyen à faible ;
- ⇒ **L'exposition des pentes** : Les cartes d'exposition permettent de localiser les versants présentant le plus de risque à l'érosion. Les expositions Nord-ouest, Nord, Nord-est, Sud-ouest et Ouest présentent une forte sensibilité à l'érosion qui attaque les roches en polissant la surface. Ces versants sont caractérisés par des vents dominants. Les vents du Sud sont secs et chauds et soufflent surtout en Été. Ils ramènent une quantité de limon et de sable. Cela peut être nuisible pour la végétation. Dans le cas des vents du Nord, ils sont fréquents en hiver où une grande partie des précipitations provient de l'ascendance forcée de ces masses d'air sur les monts du site d'étude. Ces vents conduisent à une dégradation sévère de la végétation, en appauvrissant les sols et en déplaçant plusieurs particules ;
- ⇒ **Les types d'occupation du sol** : Le couvert végétal permet de protéger le sol contre l'impact de pluie, et ralentir la vitesse des eaux de ruissellement en favorisant l'infiltration. C'est un élément essentiel qui renseigne sur le degré de protection contre l'érosion. (Benkaci, 2018). Donc, le risque d'érosion augmente dans les zones où la couverture végétale est faible. D'après les cartes d'occupation qui ont été déjà élaborées, le versant Sud de Djebel Youssef contient un couvert végétal faible, donc, il est plus sensible que le versant Nord ;
- ⇒ **Les précipitations** : D'après Benkaci (2018), la pluie est considérée comme le facteur le plus important qui contrôle le risque d'érosion des sols, son impact apparaît directement sur la surface du sol par l'effet de battance où les agrégats sont brisés, les particules sont détachées et transportées par les eaux de ruissellements. Les régions qui

reçoivent plus de 550mm de précipitations sont plus vulnérables à l'érosion que les régions qui reçoivent moins de 500mm de précipitations où l'érosion est faible à moyenne. Le massif de Boutaleb est vulnérable à une forte érosion dans les hautes altitudes où la quantité de précipitation dépasse 500mm. Les moyennes et les basses altitudes sont moins sensibles. Concernant Djebel Youssef, il reçoit plus de 460mm dans les hautes altitudes où la sensibilité à l'érosion est moyenne.



**Figure 88.** L'impact d'érosion sur la végétation de Djebel Boutaleb.

L'état sanitaire des peuplements est considéré comme relativement médiocre, en égard à la présence très remarquable de la chenille processionnaire sur le pin d'Alep d'une part, et des foyers parasitaires sur les cèdres morts sur pieds ou morts gisants d'autre part. En outre, d'après la conservation des forêts de Sétif, le polypore sur le pin d'Alep et le cèdre, l'armillaire et le tramètes pini ont été signalés sur les deux résineux précités. Ces dernières attaques qui sont certes sporadiques n'en constituent pas moins des signes d'une forêt biologiquement en phase de risque d'interaction " sécheresse- parasitisme".

Il semble que jusqu'à maintenant les traitements réalisés sont discontinus et incomplets donc probablement peu efficaces.

En ce qui concerne le massif de Youssef, la progression du couvert végétal enregistrée entre 1996 et 2008 (17,5%) est due principalement, d'après la circonscription de Ain Oulmane, aux programmes de reboisement lancés par la conservation des forêts de la wilaya de Sétif. Elle a réalisé plusieurs campagne et plan de reboisement dans le but de restaurer les surfaces incendiées et augmenter celles boisées des différents types de peuplement. Il faut noter que la difficulté d'accès à certaines zones est parmi les raisons qui ont contribué à cette progression, car le facteur anthropique est la première cause de dégradation du couvert végétal.

Entre 2008 et 2020, une dynamique de régression est constatée, elle est due essentiellement aux pressions agricoles, le surpâturage, le défrichage, exploitation des produits forestiers ligneux, les maladies et surtout les travaux des carrières qui constituent la première cause de la dégradation des forêts. On ajoute aussi les incendies et les facteurs climatiques comme la fréquence des périodes sèches. On n'enregistre pas un grand nombre d'incendie. Cela est due essentiellement à l'inaccessibilité surtout aux versant Nord et la faible propagation des feu grâce à l'absence du sous-bois dans les zones reboisées.

Il faut noter aussi que plus le taux de recouvrement est faible, plus la végétation sera sujette à la pression anthropique et aux différents processus de l'érosion. Cela peut diminuer sa capacité à se protéger et se régénérer et par conséquent, il provoque le changement de mode d'occupation vers une autre classe.

Cette diminution du couvert forestier affecte non seulement la flore et la faune, mais aussi l'agriculture, à travers la diminution de la fertilité des sols et l'augmentation de l'érosion des sols. Elle affecte également l'élevage, à travers la disparition de zones de parcours pour le bétail, transformées en surfaces agricoles, et la destruction du tapis herbacé par la récurrence des feux (Solly *et al.*, 2020).

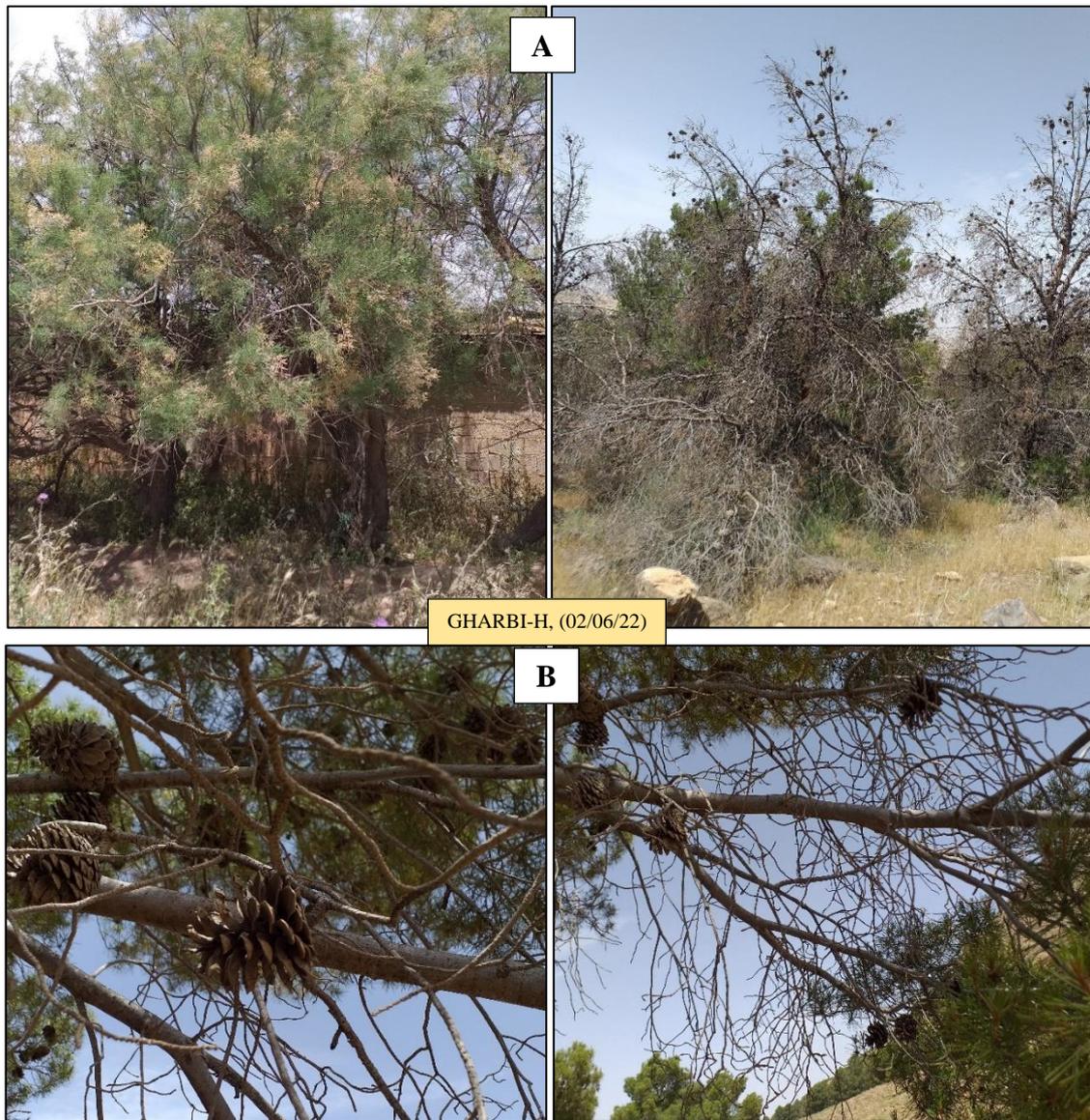
On a signalé la présence de la chenille processionnaire sur le pin d'Alep et la maladie de Phytoplasma ou encore appelée le balai de sorcière. Elle se manifeste par la formation d'une abondante ramification agglomérée en boule dense ou informe, le plus souvent stérile et composée de feuilles sous-développées. Cette maladie est provoquée par des champignons, des bactéries phytoplasmes, des plantes parasites ou plus rarement par des insectes mais elle peut aussi provenir d'une mutation interne. Elle entraîne un développement anormal de touffes de rameaux sur les tiges, ou les branches des arbres concernés et provoque des dépérissements, des dégénérescences et des jaunissements.

Une mutation dans les bourgeons entraîne la formation de balais de sorcières chez le Pin (Figure 89). Elle est transmissible lors d'un bouturage. La physionomie générale est bien différente, les aiguilles ne ressemblent pas aux aiguilles du Pin non infecté.

On a remarqué aussi le phénomène de dépérissement. La Figure 90, montre l'aspect d'un Pin d'Alep dépéri, planté dans le versant Sud de Djebel Youssef. D'après Manion (1981), le dépérissement est un phénomène causé par un ensemble de facteurs, abiotiques et biotiques (climat, sol, parasites, pathogènes par exemple), interagissant et se succédant d'une façon particulière, et qui entraînent une détérioration générale (portant notamment sur l'aspect et la croissance) et graduelle, se terminant souvent par la mort de l'arbre (Figure 90). Il se traduit par des symptômes visibles (mortalité de tiges, mortalité d'organes pérennes, réduction de la qualité et de la quantité du feuillage, diminution de la croissance) conduisant notamment à une transparence anormale du houppier en été.



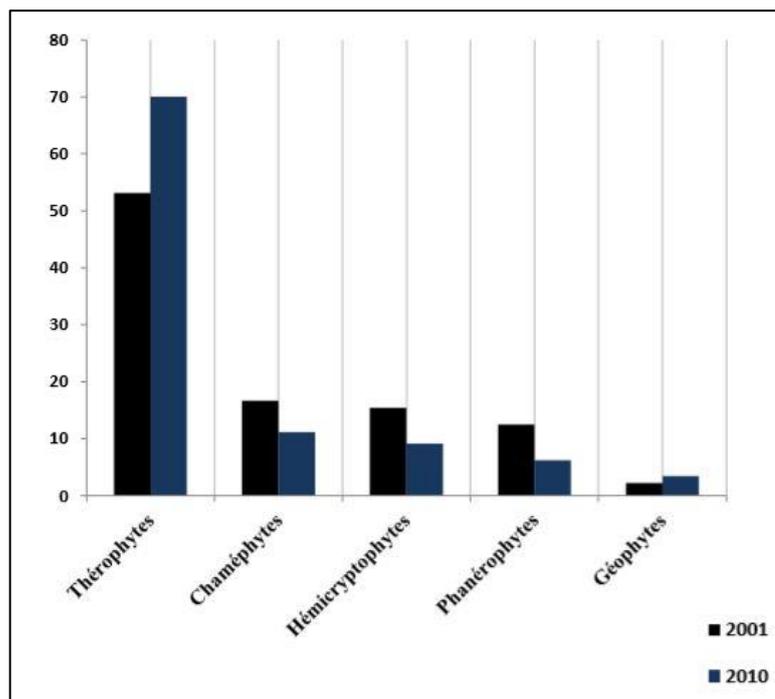
**Figure 89.** Balai de sorcière sur un pin d'Alep



**Figure 90.** (A) Sujets de pin d'Alep dépéris (Djebel Youssef), (B) Symptômes de dépérissement de pin d'Alep

D'après les résultats de Chermat (2013), la régression de la végétation de Djebel Youssef s'est accompagnée de la raréfaction des ligneux et de la prolifération des thérophytes. A une dématerrisation déjà très poussée a succédé une steppisation résultant d'une importante thérophytisation mise en lumière par l'analyse des spectres biologiques bruts et pondérés.

Le phénomène de thérophytisation est bien connu et démontré à maintes reprises en zone méditerranéenne. Il s'agit d'une tendance à l'augmentation de la richesse en thérophytes qui est un corollaire de la dégradation et de la désertification (Figure 91) (Chermat *et al.*, 2013).



**Figure 91.** Evolution des types biologiques sur djebel Youssef (Chermat, 2013).

Le surpâturage est occasionné par les éleveurs sédentaires et les nomades qui sillonnent la région du Sud au Nord avec des troupeaux composés essentiellement de race caprine et ovine et de quelques dromadaires (leurs nombres est aléatoires généralement de 100 à 250 têtes par éleveur).

L'élevage ovin et caprin qui dominait en 2004 avec un effectif de 5000 têtes supplémentés par 1500 têtes de bovins a changé en 2010. Le nombre des têtes des ovins et caprins élevées par les sédentaires est estimé à 7550 têtes.

Le nombre de bovin a triplé il est estimé à 3000 avec 1900 de vache litière dans cette zone. D'après ces résultats nous distinguons une tendance significative entre la densité des troupeaux et le biovolume végétal. Le système pastoral a subi ces dernières années des changements profonds, caractérisés par l'introduction de l'élevage bovin (Chermat, 2013).

Les perturbations climatiques sont une cause importante de la fragilité de ce milieu déjà très sensible, l'impact de la sécheresse sur les formations végétales se traduit par la désertification de ce massif. Il évolue, selon les résultats de Chermat (2013), vers une désertification inquiétante et prématurée. C'est un écosystème fragile, cette fragilité est déterminée par les facteurs physiques et biologiques qui caractérisent leurs milieux naturels ; mais c'est de l'action de l'homme qu'elle dépendra en définitive.

Les carrières à ciel ouvert de Djebel Youssef sont, également, considérées comme un facteur de dégradation de son couvert végétal. Elles se trouvent dans la partie Est, Sud-est et Nord-est. Elles occupent environ 955ha de la surface totale (Figure 92).



**Figure 92.** Les carrières de Djebel Youssef (Gharbi, 2022).

Les travaux d'exploitation des carrières provoquent la dégradation du site et donc la perturbation de la biodiversité végétale. L'effet de ces travaux peut être direct ou indirect, temporaire ou permanent, à l'intérieur ou à l'extérieur du site. Les poussières qui peuvent être émises en période sèche peuvent constituer une source de nuisances particulières pour la végétation les jours de vents violents et donc peuvent porter atteinte aux habitats d'espèces alentours (RMCL, 2013).

D'après une étude américaine, publiée sous le titre "Tree and forest effects on air quality and human health in the United States", les poussières issues des travaux d'exploitation des carrières qui se déposent sur les feuilles peuvent aussi ralentir la photosynthèse et donc potentiellement ralentir la réduction de la pollution par les arbres.

Un autre problème lié aux travaux d'exploitation des carrières est la favorisation d'espèces envahissantes. Les perturbations engendrées par le projet au niveau du substrat vont permettre l'installation de plantes pionnières dont certaines peuvent avoir un caractère envahissant, notamment lorsqu'il s'agit de plantes exotiques susceptibles de prendre le pas sur les espèces

indigènes. Ces perturbations seront importantes sur les terrains du projet même, mais également sur les zones alentours par dissémination (RMCL, 2013).

Selon Yahiaoui *et al.*, (2005), dans la région d'Ain Touta, les poussières ont un effet négatif sur l'ensemble de la végétation régionale. Cela s'observe sur les reboisements en pin d'Alep qui avaient été faits sur le piémont des massifs montagneux, il y plus de 30 ans. Aujourd'hui ces arbres sont recouverts de poussières blanches et sont en voie de dépérissement par assèchement et réduction de leur photosynthèse. Il en est de même pour toutes les cultures qui sont faites dans la plaine d'Ain Touta. La production agricole connaît une réduction des rendements et de la qualité des produits.

D'après Boukhamla et Boukouba, (2022), L'effet des poussières sur la flore est caractérisé par la dégradation de ces dernières avec le temps des plantes, le ralentissement du processus de photosynthèse qui constitue un écran pour l'évolution et le développement des diverses plantations, arbres et toute sorte d'agriculture. Autrement dit, diminution de leur durée de vie (rendement), et par voie de conséquence diminution de leur intérêt économique, social et paysagère.

#### **4. Apport de SIG et de la télédétection dans la gestion des feux de forêts de Djebel Boutaleb**

##### **4-1. Réseau de Défense des Forêts Contre les Incendies (D.F.C.I) de Djebel Boutaleb**

Le réseau de défense des forêts contre les incendies de Djebel Boutaleb est constitué principalement de tranchées pare-feu, postes de vigie et de points d'eau.

D'après Arfa (2019), les normes établies pour la forêt algérienne, en ce qui concerne les tranchées pare-feu, sont de 2,5 ha de T.P.F. pour 100 ha de forêt. En matière de tour de guet les normes sont d'une tour pour 7000 ha.

Dans le cas de Djebel Boutaleb, la surface totale des tranchées pare-feu est de 30ha, soit une moyenne d'environ 0,09ha de TPF pour 100 ha. Cette surface est insuffisante, sachant que l'existence des tranchées pares-feux non entretenus peut les rendre une source de départ de feu et inefficaces face aux incendies.

Quant aux tours de guet, il y a seulement 2, soit une tour pour 16500 ha. Son rôle est de détecter les départs de feux pour intervenir rapidement, dans un délai inférieur à 10 minutes.

Le massif de Boutaleb compte 13 points d'eau, soit un point d'eau pour 2538,5ha. Sa capacité de stockage est d'environ 96m<sup>3</sup>.

##### **4-2. Localisation des départs de feux déclarés au niveau de Djebel Boutaleb entre 1982 et 2020**

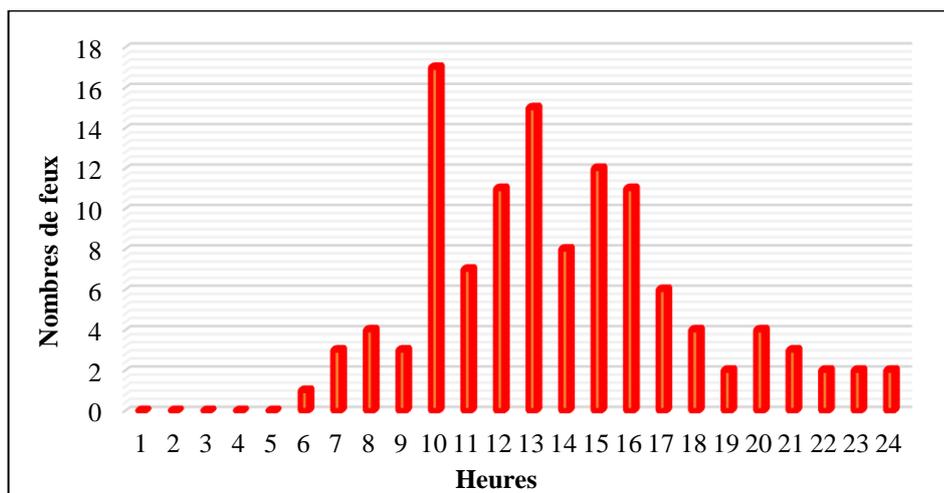
D'après Madoui (2000), les années 1956 et 1957 ont enregistré la plus grande surface détruite (10300 hectares) ; elles correspondaient à la guerre d'Algérie.

Durant la période 1982-2020, Djebel Boutaleb a enregistré 117 départs de feux avec plus de 2740ha détruit soit une moyenne de 23,43ha/feu. Sa localisation spatiale permet d'effectuer des analyses spatiotemporelles relatives aux feux de forêts.

##### **4-3. Analyse temporelle des feux de forêts entre 1982 et 2020**

###### **4-3-1. Fréquence horaire des feux de forêts**

La figure 93 et le tableau 36 montre que 82 départs de feu, soit 70,1% se sont déclenchés entre 10h et 16h où la température est élevée et le taux de l'humidité de l'air est faible, ce qui favorise le déclenchement et la propagation du feu. La surface brûlée durant cette tranche horaire est aussi plus importante. Elle est de 2540 ha, soit 82,4 %.



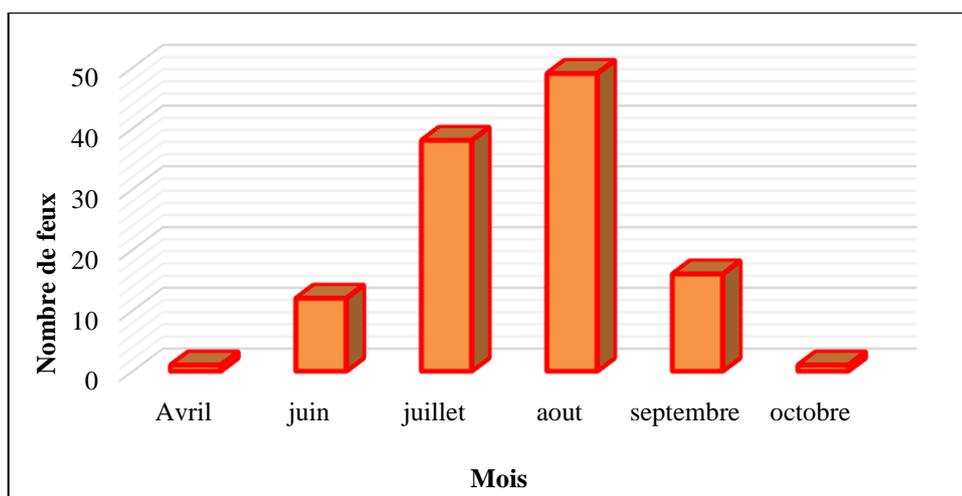
**Figure 93.** Fréquence horaire de feux de forêts de Djebel Boutaleb (1982-2020).

**Tableau 36.** Fréquence horaire de feux de forêts de Djebel Boutaleb (1982-2020).

Heure	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
S (ha)	20	18	70	5	119	212	1200	282	310	285	132	38	271	2	1,5	10	100	5	1,5

#### 4-3-2. Fréquence mensuelle des feux de forêts

Au cours des 38 ans (1982-2020), les feux de forêt évoluent d'avril à octobre, à l'exception du mois de mai. Cette période coïncide avec la saison sèche, ce qui favorise le développement des feux de forêts. On enregistre le plus grand nombre de foyers durant le mois d'août (le mois plus chaud et le plus sec), avec 49 départs de feux soit 41,9% suivi par le mois de juillet avec 38 départs. Concernant la superficie brûlée, elle est estimée à 1303,9ha soit 47,6% pour le mois d'août et à 1162ha soit 42,4% pour le mois de juillet (Figure 94, Tableau 37).



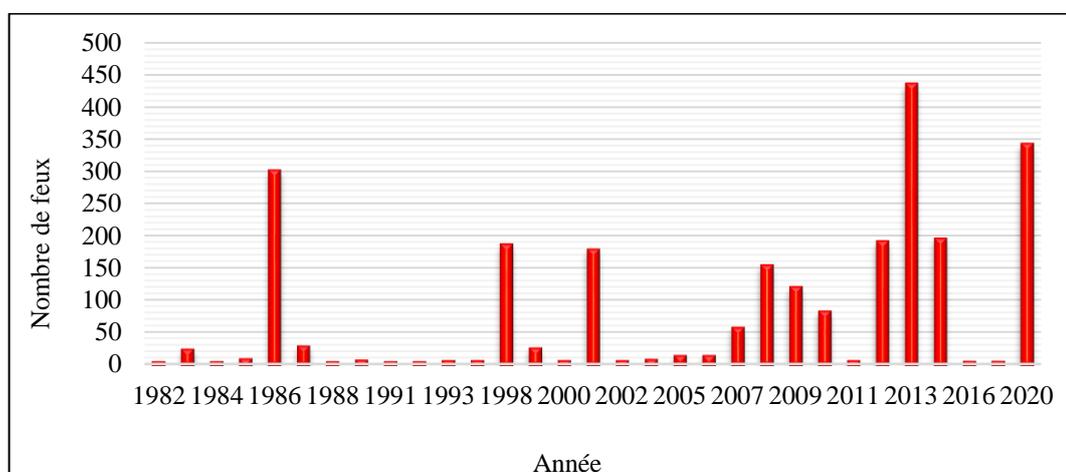
**Figure 94.** Fréquence mensuelle de feux de forêts de Djebel Boutaleb (1982-2020).

**Tableau 37.** Fréquence mensuelle de feux de forêts de Djebel Boutaleb (1982-2020).

Mois	Avril	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre
Surface brûlée (ha)	7	64,9	1162	1303,9	198,8	5

#### 4-3-3. Fréquence annuelle des feux de forêts

La moyenne annuelle de feux de forêts, entre 1982 et 2020 est de 3,1 feu/an et celle des surfaces brûlées est de 28,3 ha/an. La surface brûlée durant les années 1986, 1998, 2001, 2007, 2008, 2009, 2010, 2012, 2013, 2014 et 2020 est supérieure à cette moyenne. Les années 1986, 2013 et 2020 sont les plus destructrices, où 1069 ha ont été brûlé, soit 47% de la surface totale (Figure 95 et Tableau 38).



**Figure 95.** Fréquence annuelle de feux de forêts de Djebel Boutaleb (1982-2020).

**Tableau 38.** Fréquence annuelle de feux de forêts de Djebel Boutaleb (1982-2020).

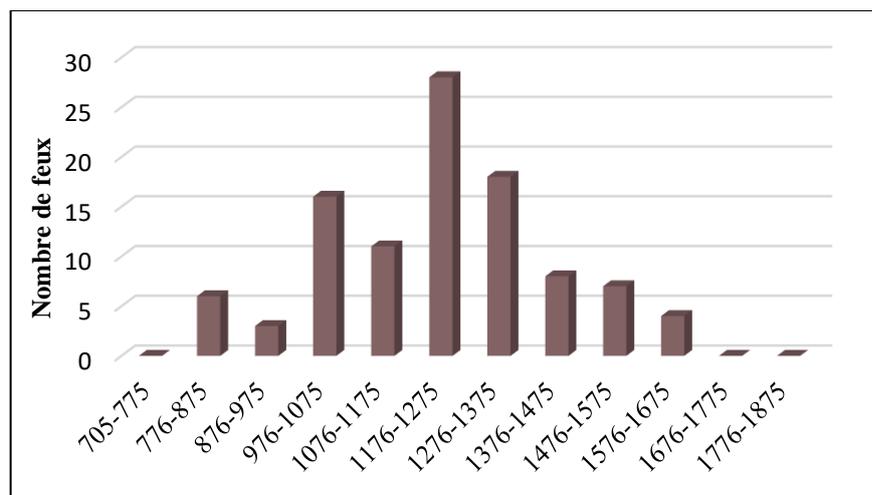
Année	1986	1998	2001	2007	2008	2009	2010	2012	2013	2014	2020
Surface (ha)	298	183	175	54	151	117	79	188	432	192	339

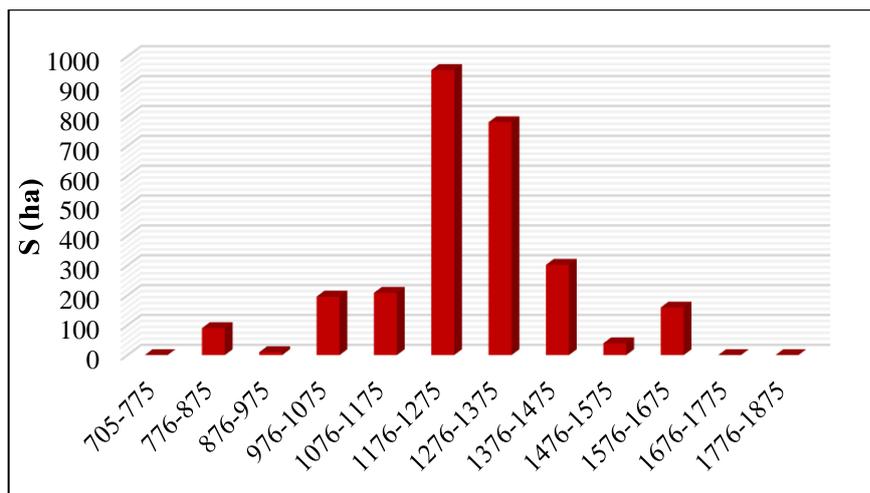
#### 4-4. Analyse topographique de feux de forêts entre 1982 et 2020

##### 4-4-1. Classes d'altitude des feux de forêts

La figure 96 montre qu'entre 1982 et 2020, les départs de feux enregistrés dans les massifs sont localisés entre 776 et 1675 m d'altitude. On note que le nombre de feux est élevé dans l'altitude moyenne qui comprise entre 976 et 1375 m avec 73 départs de feux.

Quant à la répartition des surfaces brûlées en fonction de l'altitude, on remarque que 89,1% des surfaces brûlées concerne les classes d'altitudes qui comprennent entre 976 à 1375 m (Figure 97).

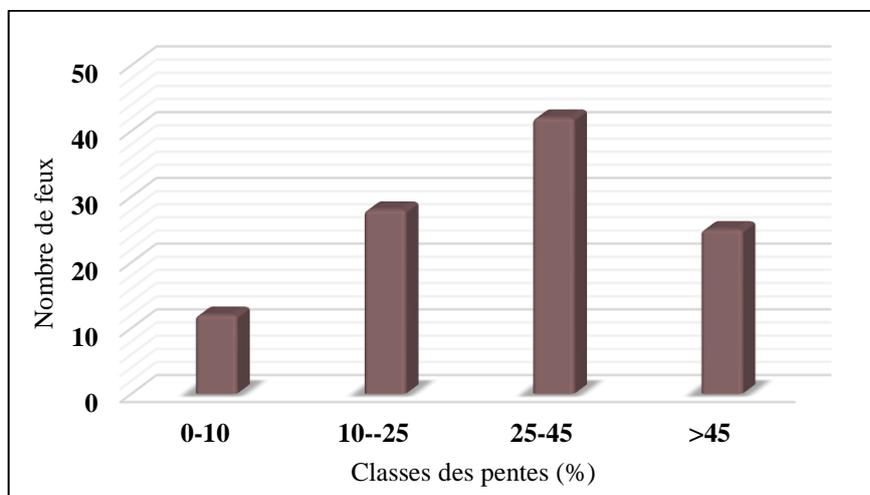
**Figure 96.** Répartition du nombre de feux de forêts en fonction de l'altitude



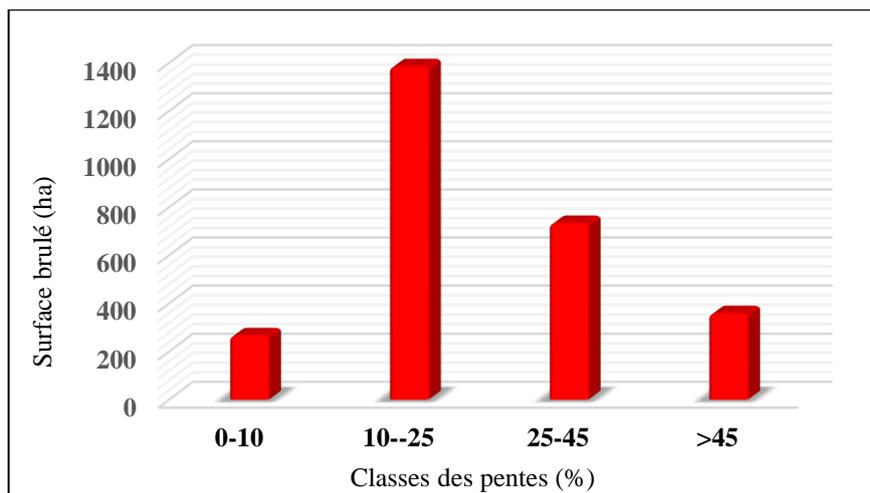
**Figure 97.** Répartition des surfaces de feux de forêts en fonction de l'altitude

#### 4-4-2. Classes des pentes des feux de forêts

D'après la figure 98, on constate que 29,2% des départs de feux sont localisés sur des pentes comprises entre 25 et 45%. En revanche, 50,5% des surfaces brûlées sont localisées sur des pentes comprises entre 10 et 25% (Figure 99).



**Figure 98.** Répartition du nombre de feux de forêts en fonction des classes des pentes.



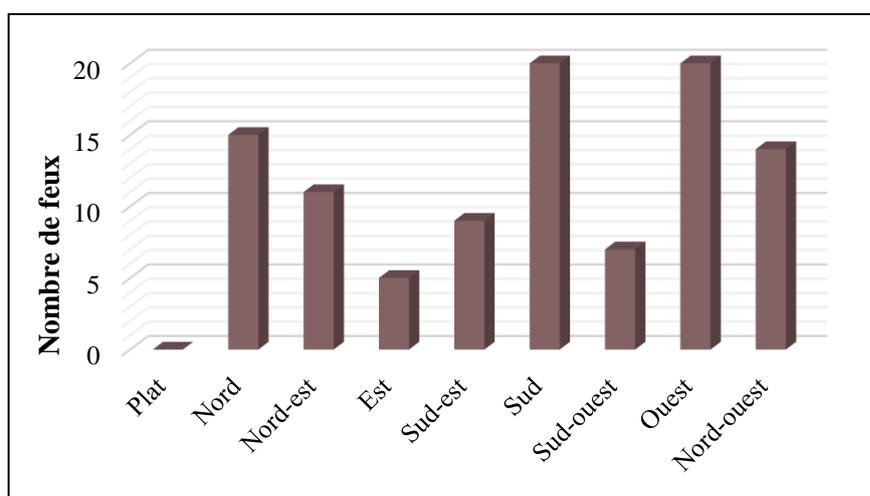
**Figure 99.** Répartition des surfaces de feux de forêts en fonction des classes des pentes.

#### 4-4-3. Classes d'orientation des pentes des feux de forêts

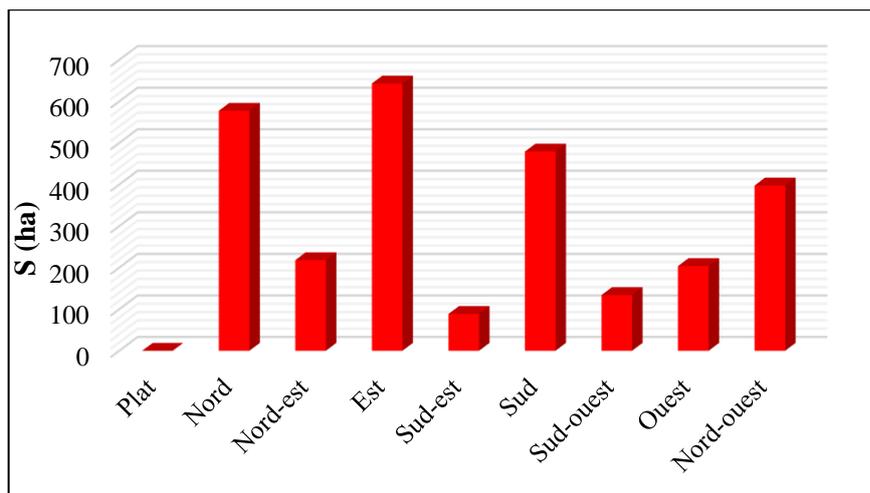
La figure 100 montre que les orientations Ouest et Sud enregistrent le plus grand nombre de départ de feu avec 20% pour chacune, alors que les orientations Est, Sud-ouest et Sud-est n'enregistrent que 5%, 7% et 9% respectivement.

La plus grande surface brûlée concerne l'exposition Est et Nord avec respectivement 23,5% et 21,1%, suivie par le Sud (17,5%) et le Nord-ouest avec (14,5%). Les autres orientations sont moins touchées (Figure 101).

Les surfaces brûlées sont donc plus importantes au niveau des versants Est et Nord humides et frais que sur les versants sud secs et chauds.



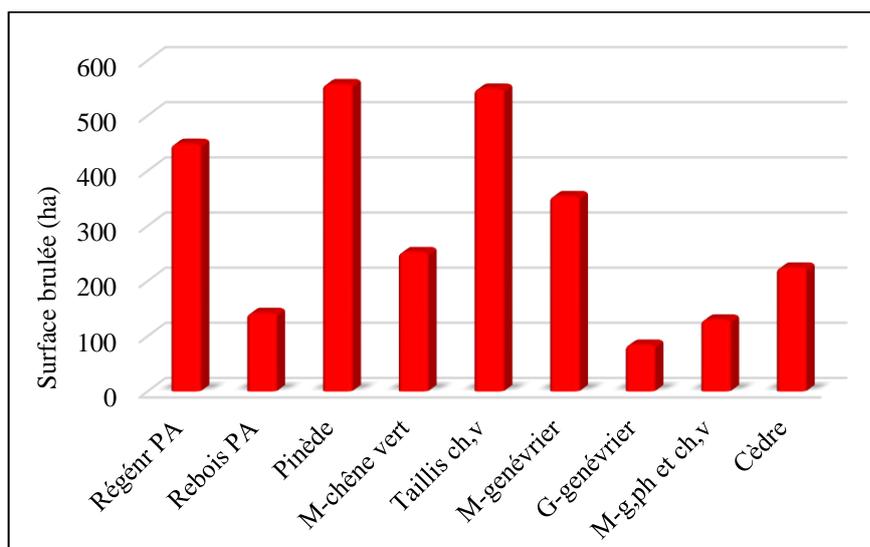
**Figure 100.** Répartition du nombre de feux de forêts en fonction d'orientation des pentes.



**Figure 101.** Répartition des surfaces de feux de forêts en fonction d'orientation des pentes.

#### 4-5. Analyse des feux de forêts par type de formations forestières entre 1982 et 2020

Le pin d'Alep régénéré et pure, l'espèce dominante dans le massif de Boutaleb, connaît la plus grande dégradation face aux incendies avec 16,4% (soit 448,7ha) et 20,3% (557 ha) respectivement. Le reboisement de pin d'Alep ne présente que 5,2%. La surface brûlée de taillis de chêne vert, de matorral de genévrier, de matorral de chêne vert et de cédraie présente 20%, 12,9%, 9,2% et 8,2% respectivement. Les autres formations ne totalisent que 7,8% dont 4,7% pour le matorral de genévrier de Phénicie et le chêne vert et 3,1% pour la garrigue de genévrier (Figure 102).

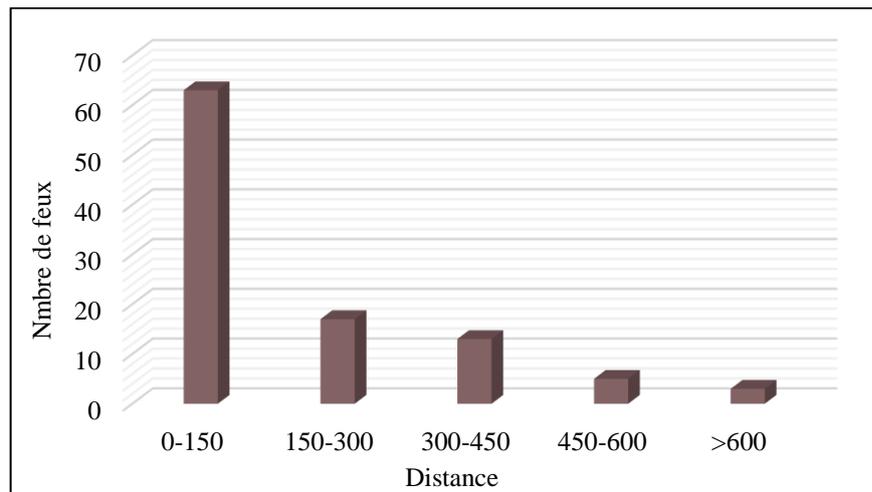


**Figure 102.** Répartition des surfaces de feux de forêts par type de formations forestières.

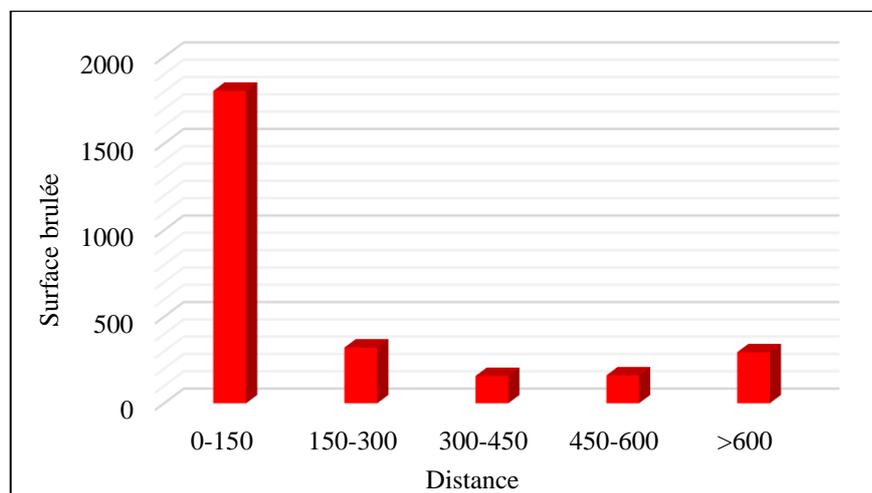
#### 4-6. Analyse spatiale des feux de forêts en fonction d'occupation humaine et de pistes forestières

##### 4-6-1. Analyse spatiale des feux de forêts en fonction de pistes forestières

Les résultats montrent que 93% des départs de feux sont localisés à moins de 450m d'une piste. On remarque que 63 feux sont localisés à moins de 150m d'une piste. La plus grande surface brûlée est localisée aussi à moins de 150m (Figure 103 et 104).



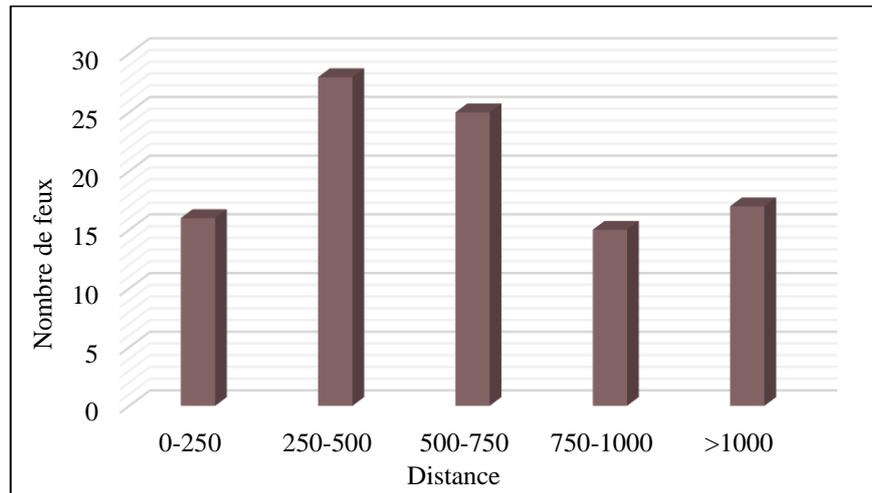
**Figure 103.** Répartition du nombre de feux de forêts en fonction de pistes forestières.



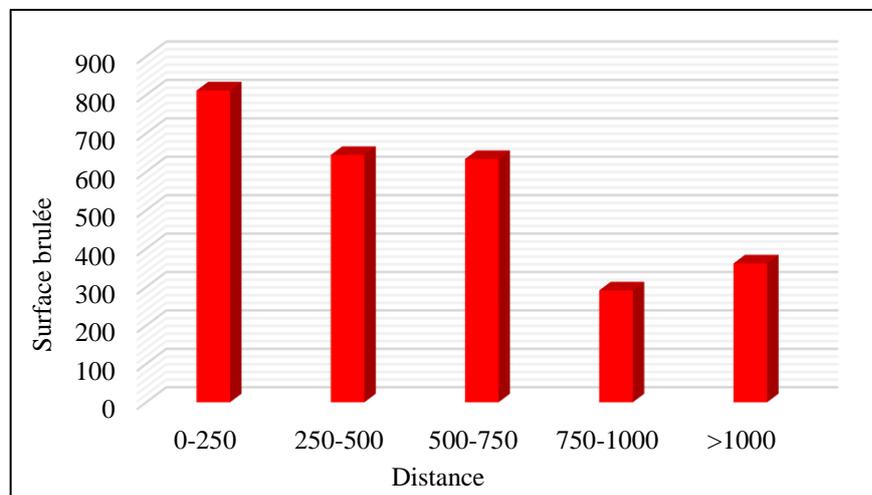
**Figure 104.** Répartition des surfaces des feux de forêts en fonction de pistes forestières.

#### 4-6-2. Analyse spatiale des feux de forêts en fonction d'occupation humaine

Les résultats obtenus montrent que 68,3% des départs de feu sont à moins de 750m des habitats et d'agriculture, alors qu'au-delà de 750m, ils ne sont plus que 31,7%. Même constat pour la surface brûlée, avec 76,2% à moins de 750m et 23,8% à plus de 750m (Figure 105 et 106).



**Figure 105.** Répartition de nombre de feux de forêts en fonction d'occupation humaine.

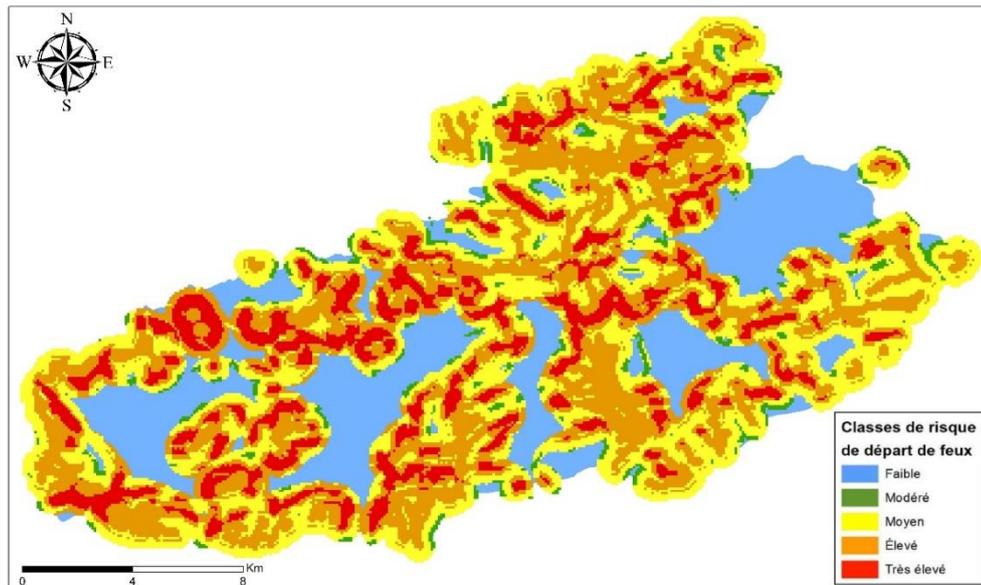


**Figure 106.** Répartition de surface de feux de forêts en fonction d'occupation humaine.

#### 4-7. Modélisation du risque de départ de feux au niveau de Djebel Boutaleb

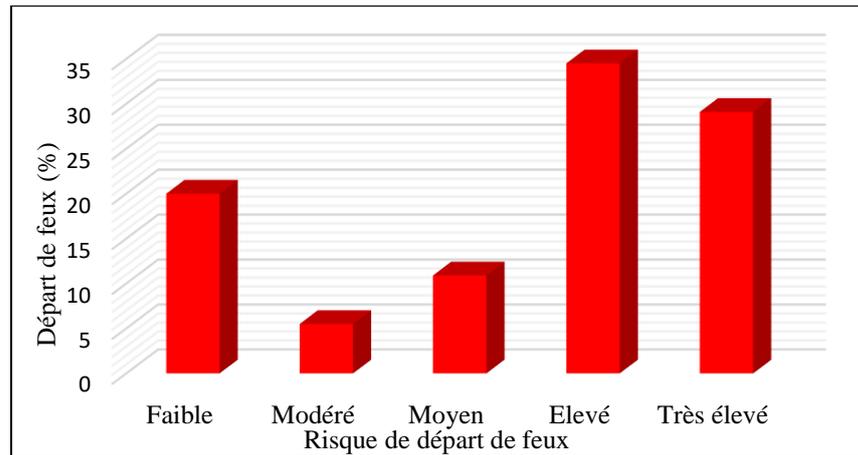
##### 4-7-1. Carte de risque de départ de feux de forêts

La carte de risque de départ de feu de forêts montre qu'environ 40% de Djebel Boutaleb présente un risque élevé à très élevé, avec 28,2% et 11,8% respectivement, suivi par les zones à risque faible (26,9%), moyen (25,8%) et enfin modéré (7,3%). Les zones de risque élevé à très élevé sont localisées proches d'habitat et de pistes forestières (Figure 107).



**Figure 107.** Carte de risque de départ de feux de forêts de Djebel Boutaleb (Gharbi, 2022).

Ces résultats sont comparés avec l'historique du nombre de feux de forêts de la période (1982-2020), qui montre que 63,6% de feux sont enregistrés au niveau des zones à risque élevé à très élevé. Quant aux zones à risque moyen, modéré et faible, on a enregistré 10,9%, 5,5% et 20% respectivement. Cela confirme la fiabilité de la carte de risque de départ de feux de forêts (Figure 108).

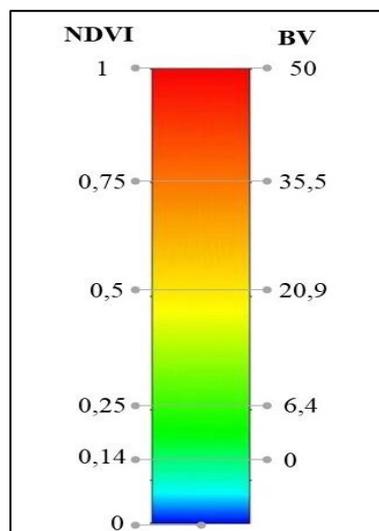


**Figure 108.** Répartition du nombre de feux de forêts suivant les classes de risque IDF.

#### 4-7-2. Modélisation de la combustibilité de Djebel Boutaleb

##### ❖ Estimation du biovolume

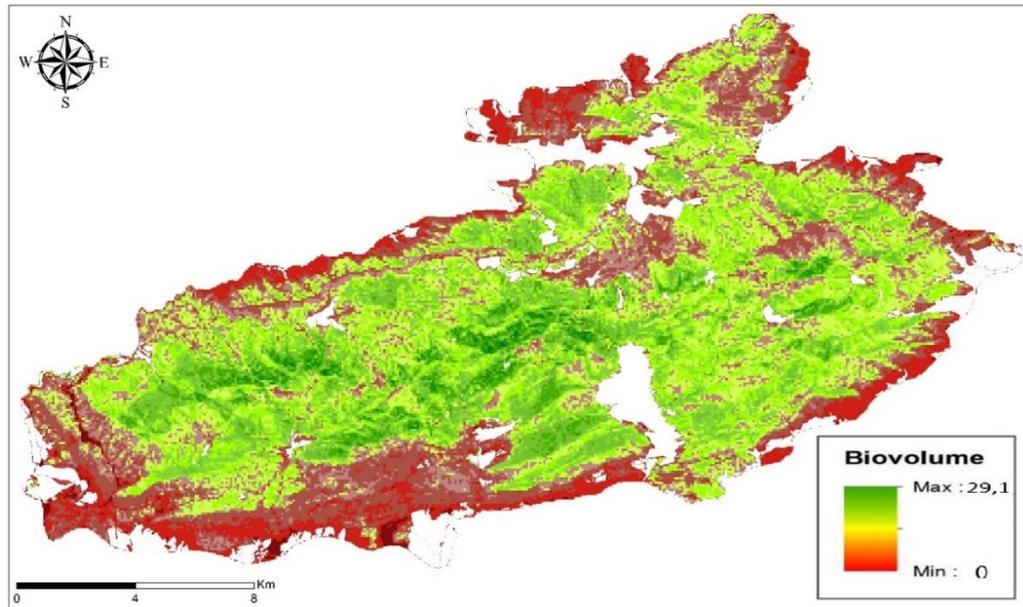
Une échelle d'équivalence entre les valeurs de l'NDVI, variant entre 0,14 et 1, et du biovolume, variant entre 0 et 50, doit se mettre en place pour estimer le biovolume global de la végétation, en faisant correspondre ces deux intervalles, dont, la valeur 0,1 de l'NDVI sera équivalente à la valeur 0 du biovolume et celle de 1 correspondra à 50 (Figure 109).



**Figure 109.** Echelle d'équivalence entre les valeurs de l'NDVI et du biovolume.

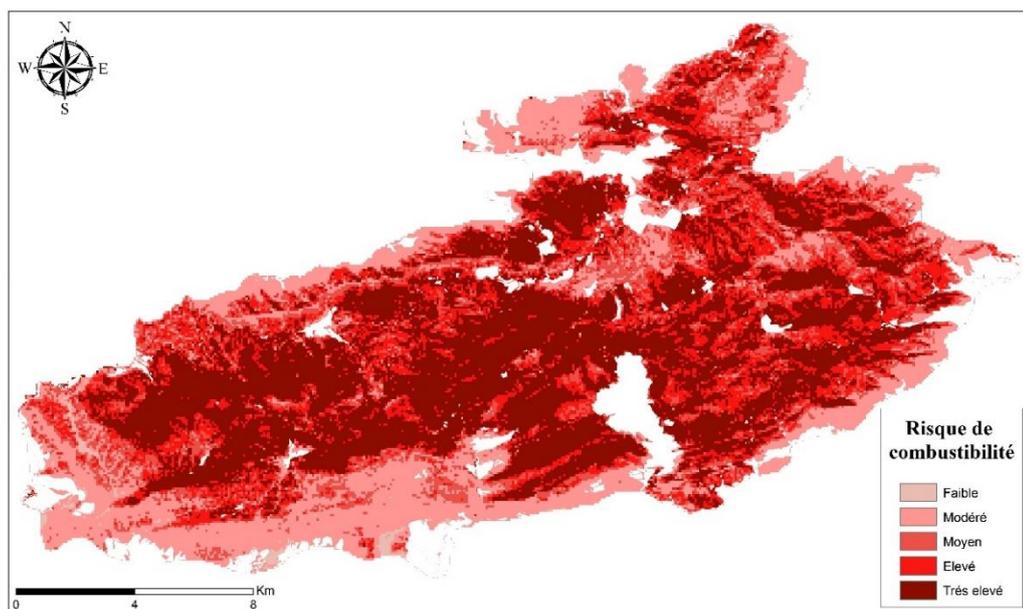
Les valeurs de l'NDVI ont été validées sur terrain grâce aux coordonnées GPS. Afin de calculer l'indice de combustibilité, il est nécessaire de combiner la couche "Biovolume"

à la couche "Végétation" qui renferme les notes d'intensité calorifique des espèces dominantes de Djebel Boutaleb. La figure 110, montre que les valeurs du biovolume varient entre 0 et 29,1.



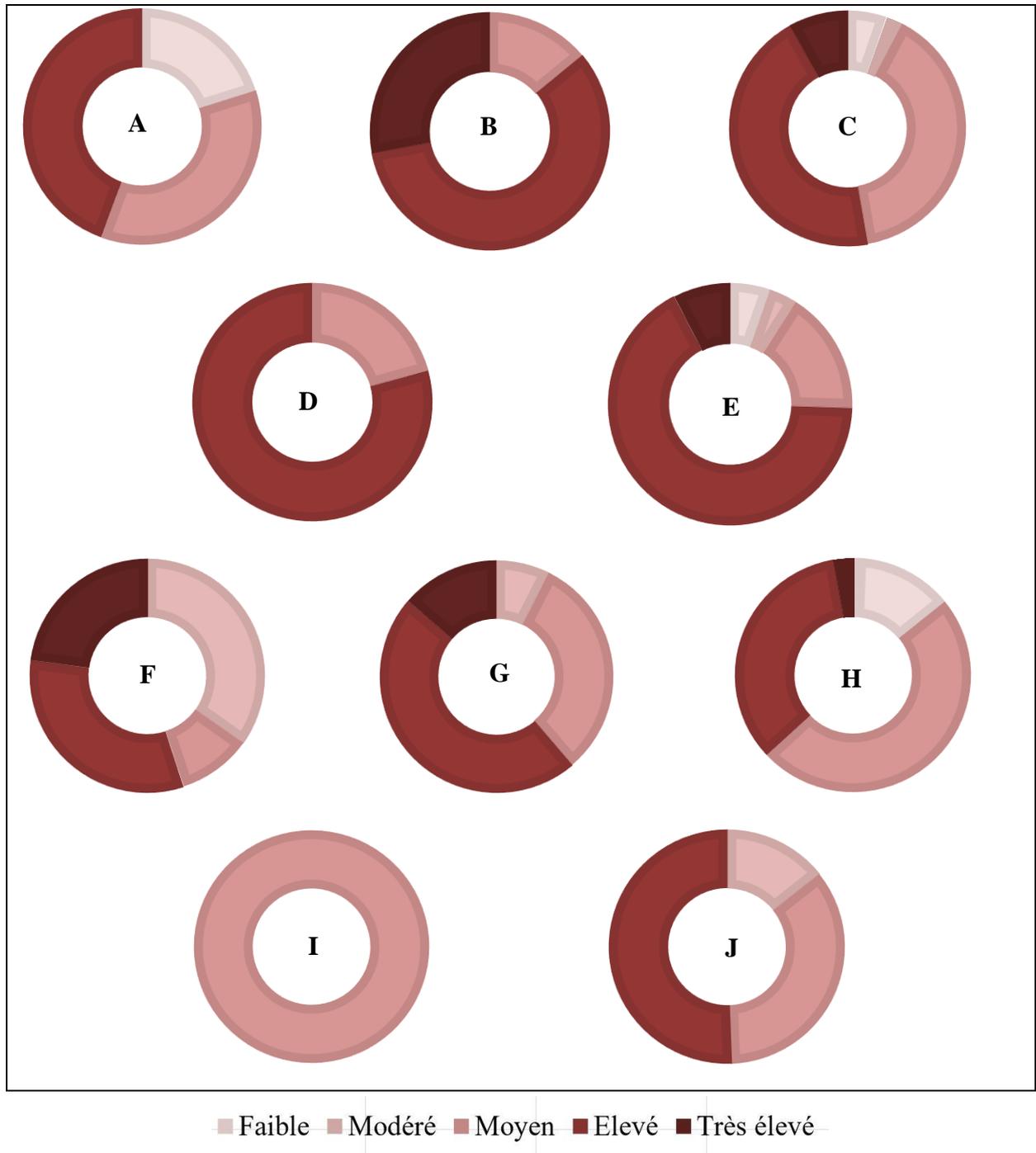
**Figure 110.** Carte du biovolume de Djebel Boutaleb (Gharbi, 2022).

L'examen de la carte de combustibilité ci-dessous (Figure 111), montre que 37% de Djebel Boutaleb présente un indice de combustibilité très élevé, alors que 28% présente un indice de combustibilité modéré, 18,9% élevé, 13,6% moyen et uniquement 1,8% de la surface totale situent dans des régions forestières de risque faible.



**Figure 111.** Carte de risque de combustibilité de Djebel Boutaleb (Gharbi, 2022).

La répartition des niveaux du risque de combustibilité pour chaque formation forestière est présentée dans la figure 112.



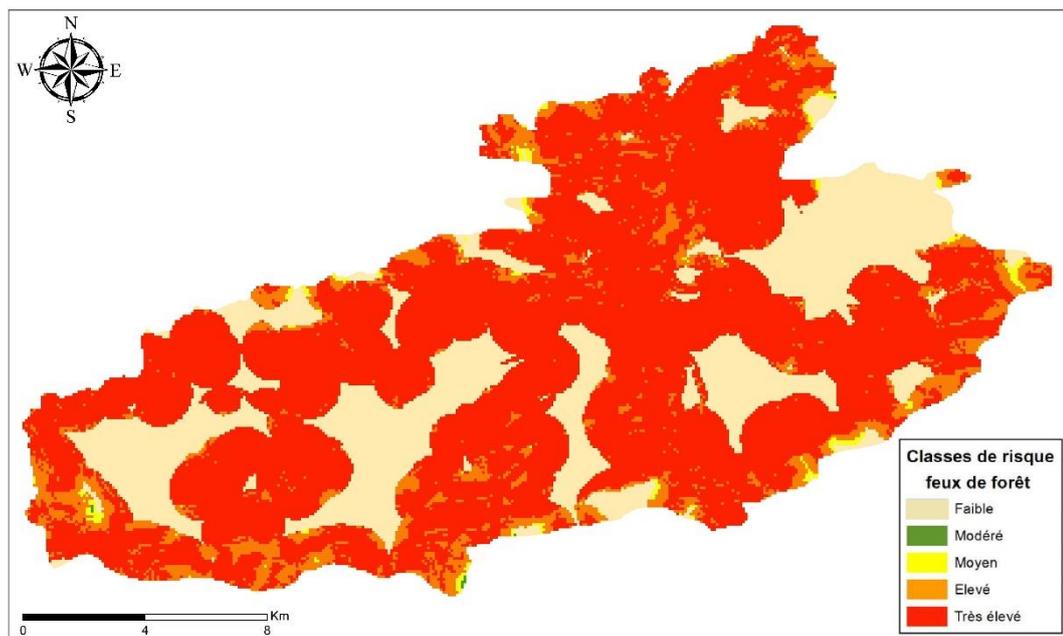
**Figure 112.** Répartition des niveaux du risque de combustibilité pour chaque formation forestière de Djebel Boutaleb.

A) Reboisement de pin d'Alep, B) Régénération de pin d'Alep, C) Forêt de pin d'Alep, D) Taillis de chêne vert, E) Matorral de chêne vert, F) Matorral de genévrier, G) Garrigue de genévrier Matorral, H) G-Phénicie et Ch-vert, I) Reboisement de cèdre de l'Atlas, J) Forêt de Cèdre de l'Atlas.

Toutes les formations présentent un risque élevé de combustibilité à des degrés différents. Quant au risque très élevé, il concerne en premier lieu le pin d'Alep régénéré et le matorral de genévrier, suivis par la garrigue de genévrier, la pinède, le matorral de chêne vert et le matorral de genévrier de Phénicie et chêne vert respectivement. Ces résultats sont confirmés par le bilan des feux de forêts étudié ci-dessus.

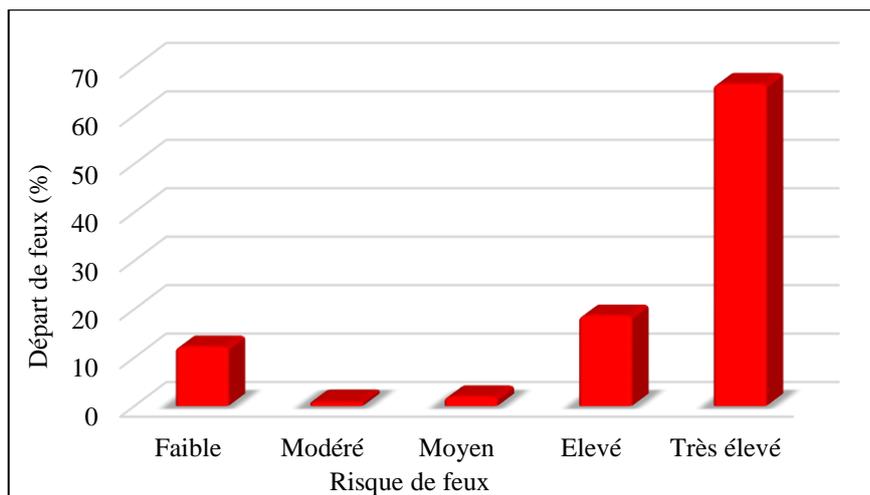
#### 4-7-3. Modélisation du risque feux de forêts de Djebel Boutaleb

Le résultat de l'intersection entre les deux couches "Classes IDF" et "Classes IC", nous donne la carte de risque de feux de forêts dans Djebel Boutaleb où les valeurs sont représentées en 5 classes (Figure 113). D'après cette figure, il apparaît nettement que 49,9% de la surface totale présente un indice de risque très élevé, 9,8% et 35,5% présente respectivement un risque élevé et faible. Alors qu'uniquement 3,7% présente un indice moyen et 1,1% situent dans des zones de risque modéré.



**Figure 113.** Carte de Risque feux de forêt de Djebel Boutaleb (Gharbi, 2022).

Après avoir comparé ces résultats avec l'historique du nombre de feux de la période (1982-2020), on note que 85% de départs de feu surviennent dans des zones à risque élevé et très élevé avec respectivement 66,4% et 18,6%. Alors que ceux à risque moyen, modéré et faible, représentent 1,9%, 5,5% et 20% respectivement. Ces résultats confirment la fiabilité et la pertinence de la carte de risque de départ de feux de forêts (Figure 114).



**Figure 114.** Répartition du nombre de feux suivant les classes de risque IRF.

La carte du risque des feux de forêts ne constitue pas un moyen de lutte contre les incendies, mais, plutôt, permettra aux forestiers et aux gestionnaires de mettre en place les équipements nécessaires qui aident à la lutte contre les feux.

#### 4-8. Analyse de l'efficacité du réseau DFCI face aux incendies

Sur les 13 points d'eau, les zones à risque très élevé totalisent 11 points. La distribution spatiale couvre, donc, d'importantes zones, ce qui facilite l'intervention sur les départs de feux, à condition qu'elle soit rapide.

Concernant les tours de guet, les deux disponibles (Aouzour et Afghane) sont opérationnelles. Son rôle principal est la prévention et la détection des feux de forêts. Le calcul du champ de visibilité de ces 2 tours de guet et leur superposition aux zones à risque feux de forêts permet de constater que 83,9% de zones visibles concerne les classes de risque très élevé. Mais il faut noter que cette visibilité ne concerne que la partie Sud-Est du versant Sud et quelques zones de la partie Nord.

Quant aux TPF, ils doivent être débroussaillés afin de limiter la propagation des feux. Avec un volume total de 30,2ha et un volume moyen de 0,09ha pour chaque 100ha. Ce volume est insuffisant en égard les normes établies pour la forêt algérienne, qui sont de 2,5ha de TPF pour 100 ha de forêt. Les deux TPF couvrent les zones de risque très élevé, donc sa distribution spatiale est importante.

Et enfin les pistes forestières de Djebel Boutaleb, Elles jouent un rôle primordial dans la gestion des forêts en facilitant l'intervention et la surveillance des feux. Leur distribution spatiale

montre que 94,6% de pistes sont localisé dans les zones exposées au risque très élevé de feu de forêt. Malheureusement, la majorité de ces pistes est difficilement accessible voir inaccessible pour les moyens d'intervention à cause du manque d'entretien et d'aménagement ce qui réduit son efficacité face aux incendies.

## 5. Discussion de l'apport de SIG et de la télédétection dans la gestion des feux de forêts de Djebel Boutaleb

Après l'analyse des résultats, les mois de départ de feux de forêts coïncident avec la saison sèche, ce qui favorise leur développement.

Les zones de moyenne altitude sont plus touchées par les feux de forêt que les régions à haute et à basse altitude. Cela peut être expliqué par l'importance des surfaces forestières à moyennes altitudes et à l'action anthropique exercée par la population.

La moitié des surfaces brûlées sont localisées sur des pentes comprises entre 10 et 25%. D'après Allal et Dalouche (2020), les pentes inférieures à 20% comptabilisent 26% des départs de feu. Arfa (2019) à son tour a montré que les classes de pente moyenne, comprises entre 10 et 25%, sont les plus dominantes, elles concernent 70,94% des massifs forestiers.

Les surfaces brûlées sont plus importantes au niveau des versants Est et Nord humides et frais que sur les versants Sud secs et chauds. Allal et Dalouche (2020), ont trouvé que les orientations Sud et Sud-est sont les plus touchées avec 41,43% de la totalité des départs de feux, alors que les orientations nord et nord-est ne représentent que 25,84% et l'ouest seulement 6,15%. Alors que Arfa (2019) a trouvé que la plus grande surface brûlée concerne l'exposition Nord-ouest avec 28%, suivie par le Nord et le Nord-est avec respectivement 13% et 12%. L'orientation Sud-ouest reste la moins touchée par les feux de forêts au niveau des massifs de la wilaya d'El Tarf.

La surface incendiée de reboisement de pin d'Alep est moins importante, cela peut être expliqué par la faible richesse floristique et la pauvreté en sous-bois.

D'après Meddour (1992), les formations de pinède sont les plus touchées par les incendies. Après un incendie, cette espèce ne se reproduit que par voie sexuée (semencier obligatoire). Sa croissance est donc lente, au moins durant les 10 premières années après incendie. Dans les premières années, le nombre de plantules est en général relativement faible. Elles augmentent ensuite jusqu'à un maximum pour enfin décroître lorsque la pinède approche de sa maturité. Trabaud *et al.*, (1985 b) ont montré qu'un des facteurs pouvant influencer la densité des plantules est le nombre de pins adultes présent avant l'incendie. Ainsi, plus la densité de pins est élevée avant l'incendie, plus les plantules de pins seront denses après l'incendie.

Selon Madoui (1999), le chêne vert est essentiellement utilisé par les riverains comme bois de chauffage. Comme le signalait Boudy en 1955, le chêne vert était déjà très utilisé comme source d'énergie pendant la guerre de 39-45 et il l'est encore aujourd'hui.

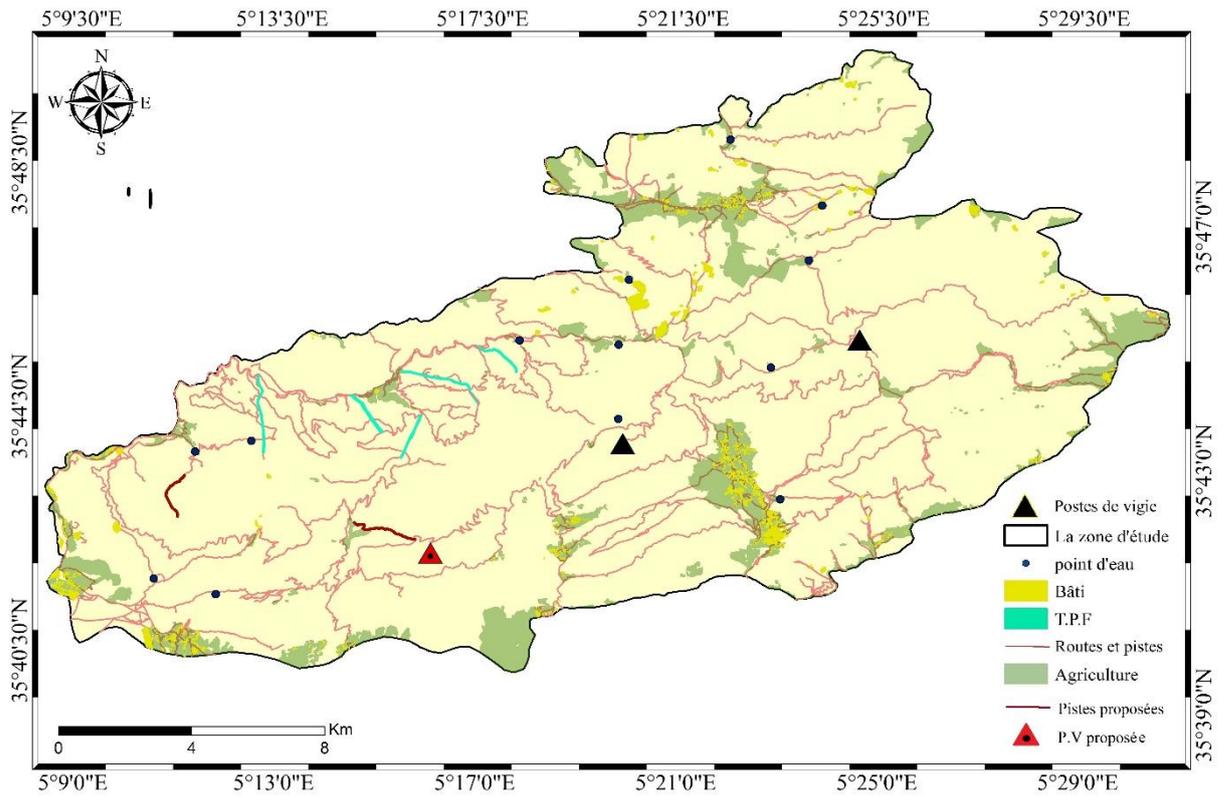
En revanche, la diminution de la surface du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Mannetti) à Djebel Boutaleb est due surtout, comme d'ailleurs dans tout le Maghreb, à la surexploitation pratiquée sur cette essence du fait de l'excellente qualité de son bois et au phénomène de dépérissement.

Les pistes forestières facilitent l'accès aux forêts, ce qui constitue un réel danger on terme de départ de feu. Selon Madoui (2013), durant ses dernières sorties sur terrains à Boutaleb, il a observé des bouteilles vides de boissons alcoolisées à plus de 1500 m d'altitude. En basse altitude, des amas de déchets de vers de ces bouteilles polluent les cours d'eau ; situation inimaginable avant les années 90. Ces déchets, ne polluent pas uniquement les milieux naturels, mais constituent une source d'allumage en Été et pourraient provoquer, de nouveau, des feux de forêts dans des milieux qui sont déjà fragilisés par la mise à feu volontaire qui ont eu au cours ces dernières années. Ce qu'il l'a craint depuis les années 2000 en Algérie, on le vit actuellement avec un grand danger qui se dessine favorisé par l'ouverture des pistes et dont la solution ne peut voir le jour à court terme.

D'après Cherki (2011), le réseau de routes et de pistes joue un rôle de premier ordre dans la gestion de ce massif et rend aussi très facile l'accès à la forêt ainsi que sa fréquentation par les visiteurs, et par conséquent augmente et accroît les risques de déclenchement du feu par négligence.

La proximité des villages et d'agriculture présente un risque élevé de départs de feux. D'après Arfa (2019), le défrichage par le feu, utilisé par certains agriculteurs, reste la principale cause des départs de feux de forêts. Chaque année de nombreux délits concernant les défrichements sont signalés par la conservation des forêts de la wilaya de Sétif.

À la lumière des résultats obtenus, et pour diminuer le risque de départ de feux de forêts, nous proposons l'augmentation du nombre de tours de guet afin d'augmenter la surface de visibilité, l'entretien de tranchées pare-feu annuellement et l'ouverture et l'aménagement des pistes inaccessibles ou difficilement accessible. De ce fait, nous proposons une tour de guet et l'ouverture de deux pistes forestières (Figure 115).



**CONCLUSION**

En Algérie, les régions semi-arides sont sensibles aux aléas climatiques. Pour les Hautes Plaines Sétifiennes, les actions anthropiques aggravées par les facteurs climatiques affectent négativement l'évolution de la végétation.

L'utilisation des données de télédétection a permis de cartographier et de quantifier l'ampleur des dynamiques paysagères intervenus entre 1996 et 2020 dans Djebel Boutaleb et Djebel Youssef à travers une classification dirigée des trois images Landsat (TM5 et OLI8). Elle a permis également d'élaborer des cartes du milieu physique et des cartes climatiques.

De manière générale, les résultats ont révélé une régression des forêts denses de Djebel Youssef en faveur des végétations claires, puis des végétations claires au profit des terrains nus. Concernant Djebel Boutaleb, les résultats indiquent une progression importante de végétation claire, de broussailles et de terrains nus au détriment de la végétation dense. La régression enregistrée au niveau de ces deux massifs est sous l'effet combiné des aléas climatiques, des feux répétés, du surpâturage et de la coupe illicite du bois.

Sur une période de 24ans, la végétation de Djebel Youssef a enregistré un bilan global négatif avec une régression de 314,2 ha soit 22,6%. Même constat pour Djebel Boutaleb ; qui a enregistré un bilan global négatif avec une perte de 5517,1 ha soit 18,2% de la surface totale du massif.

Le but de l'utilisation de ces techniques est de créer une base de données géographique qui regroupe toutes les couches thématiques relatives à la dynamique de végétation et les causes de sa dégradation. Cette géodatabase offre la possibilité d'aménager les milieux naturels contre les feux et les différentes activités humaines qui menacent la biodiversité, en mettant en évidence l'impacts de ces activités.

En termes de perspective, il serait intéressant de :

- ↳ Utiliser des images satellitaires à des résolution plus élevées que celles utilisées dans notre étude afin de donner des résultats plus précisés pour définir les zones de progression ou de régression ;
- ↳ Elargir la base de données géographique relative à la dynamique de la végétation à l'ensemble des autres massifs ;
- ↳ Sensibiliser la population rurale aux dangers des incendies et aux moyens de les prévenir ;
- ↳ Définir précisément la relation climat-sol-végétation afin de modéliser l'évolution de cette dernière ;

- ↳ Augmenter le nombre de pistes forestières, de points d'eau, de TPF, et de tours de guet afin de rendre l'espace végétale moins vulnérable à la propagation des feux et intervenir plus rapidement et plus efficacement ;
- ↳ Le contrôle continu de pâturage qui permet de nettoyer les zones à forte densité de sous-bois surtout durant la saison sèche ;
- ↳ Adopter une stratégie d'aménagement et de réhabilitation avec des techniques de conservation en tenant compte le côté écologique et socio-économique dans le cadre de la gestion durable des ressources naturelles.

**RÉFÉRENCES**

**BIBLIOGRAPHIQUES**



- Abdelbaki A., 2012. Utilisation des SIG et télédétection dans l'étude de la dynamique du couvert végétal dans le sous bassin versant de Oued Bouguedfine (Wilaya de Chelef). Mémoire de magistère. Université Hassiba Ben Bouali, Chlef, Algérie, 110p.
- Abdelguerfi A. et Ramadane S.A., 2003. Autoécologie du complexe d'espèce *Medicago ciliaris-M.intertexta* en Algérie. *Acta Bot Gallica*, 150 : pp. 253-265.
- Aidoud A., 1989. Les écosystèmes steppiques pâturés d'Algérie : fonctionnement, évaluation et dynamique des ressources végétales. Thèse de Doctorat., Université. SCI. Technol.H. Boumediene Alger, 250 p.
- Allal A. et Dalouche D. 2020. Analyse météorologique et topographique des feux de forêt : cas de la wilaya d'Annaba (période 1985-2018). Mémoire de master., Université Mentouri Constantine, Algérie, 51p.
- Almeida-Filho R. et Shimabukuro Y.E., 2002. Digital processing of a Landsat-TM time series for mapping and monitoring degraded areas caused by independent gold miners, Roraima State, Brazilian Amazon. *Remote Sensing of Environment*, 79 (1) : pp. 42-50.
- Ammar Khoudja M., 1986. Etude de la dynamique de la végétation du maquis dans la région de MECHTRAS (Grande Kabylie). Mémoire ingénieur., ENSA, El Harrach, Algérie, 71 p.
- Arfa A.M.T., 2008. Les incendies de forêt en Algérie : stratégies de prévention et plans de gestion. Thèse Magistère en Ecologie et Environnement., Université Mentouri Constantine, Algérie, 132 p.
- Arfa A.M.T., 2019. Application du SIG et de la télédétection pour un outil cartographique d'aide à la gestion des feux de forêts dans la wilaya d'El Tarf. Thèse de doctorat en science., Université Mentouri Constantine, Algérie, 230p.
- Arino O., Gross D., Ranera F., Bourg L., Leroy M., Bicheron P., Latham J. *et al.*, 2007. GlobCover: ESA service for global land cover from MERIS. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'07, 23-28 juillet, Barcelone, Espagne : pp. 2412-2415.
- Arrouays D., Balesdent J., Germon J.C., Jayet P.A., Soussana, J.F. et Stengel P., 2002. Stocker du carbone dans les sols agricoles en France". Expertise scientifique collective. INRA. Paris, INRA, 332 p.

- Athan T. 2010. Quantum GIS, Manuel Utilisation, Version 1,3. 'Mimas' Quantum GIS Development Team. 10p.

**-B-**

- Barber J.R., 1987. Remote sensing techniques for monitoring and mapping moisture content of grassland vegetation in Victoria to indicate statewide fuel flammability. In Symp. Computer modelling and remote sensing in relation to bushfires in Australia.
- Barbero M., Loisel R., Médail F. et Quézel P., 2001. Signification biogéographique et biodiversité des forêts du bassin méditerranéen. *Bocconea*, 13 : pp.11-25.
- Barbier A.M., 2006. Elaboration de méthodologies innovantes de traitements des données satellitales dans un cadre agro-environnemental. Rapport du stage de Master 2 Professionnel en Géomatique (SIGMA), INP ENSAT., Université de Toulouse, France, 44 p.
- Barry J.P., Celles J.C. et Faurel L., 1974. Notice de la carte internationale du tapis végétal et des conditions écologiques. Feuille d'Alger au 1/1 000 000. CRBT, Alger, 42p.
- Belhadj-Aissa M., Belhadj-Aissa A. et Smara Y., 2003. Application du SIG et de la télédétection dans la gestion des feux en Algérie. 2nd FIG Regional Conference, Marrakech, Morocco, 2(5), 16 p.
- Benabdeli K., 1996. Aspects physionomico-structural et dynamique des écosystèmes forestiers face à la pression anthropozoogène dans les monts de Tlemcen et les monts de Daya (Algérie septentrionale occidentale). Thèse Doctorat en Science., Université Sidi Bel Abbes, 356 p
- Benguerai A. et Benabdeli K., 2009. Contribution à l'élaboration d'un SIG pour une région steppique : wilaya de Naâma (Algérie). *Mediterranea. Série de Estudios Biologicos*. <http://doi.org/10.14198/mdtra2009.20.05> .
- Benkaci S., Dehbia A., Oumellal A. et Remini B. 2018., Modélisation De L'érosion Du Bassin Haut Et Moyen Cheliff Par L'application Model Builder Sur Arcgis. *Journal Of Materials And Engineering Structures*, 5 : pp. 81-9.
- Benslimane D., Dustdar S. et Sheth. A., 2008. "Services Mashups : The New Generation of Web Applications,". *IEEE Internet Computing*, 12(5) : pp. 13-15.

- Blanchi R., Jappiot M. et Alexandrian D., 2002. Forest Fire risk assessment and cartography. A methodological approach. Proceedings of the IV International Conference on Forest Fire Research, Luso (Portugal).
- Blondel J., 1995. La dynamique de la forêt naturelle. Forêt médit, 16: pp 239-246.
- Blum A., Feldman L., Bresler F., Jouanny P., Briançon S. et Régent D., 1995. Intérêt du calcul du coefficient Kappa dans l'évaluation d'une méthode d'imagerie. J. Radiol., t. 76 (7) : pp. 441-443.
- Bonn F., 1996. Précis de télédétection, vol.1 : Principes et méthodes, Sainte-Foy : Presses Universitaires du Québec, 485 p.
- Boudy P., 1955. Economie forestière nord-africaine. Tome IV, Description forestière de l'Algérie et de la Tunisie. Ed. Larose, Paris, 483 p.
- Boukhamla S. et Boukouba M., 2022. Apport du SIG à l'étude d'impact sur l'environnement (EIE) De l'exploitation des carrières à ciel ouvert : Cas de la mine de fer, Dj. Ouenza, N-E algérien. Mémoire de master., Université Larbi Tebessi, Tébessa, 150p.
- Brabant P., 1992. Pédologie et système d'information géographique : Comment introduire les cartes de sols et les autres données sur les sols dans les SIG. Cah. Orstom, sér. Pédol, XXVII (2) : pp. 315-345.
- Burgan R.E., Klaver R.W. et Klaver J.M., 1998. Fuel models and fire potential from satellite and observations. International Journal of Wildland Fire, n°8 : pp. 159-170.

-C-

- Carrier A., 1996. Contribution de l'imagerie satellitaire Noaa à la cartographie des grands feux de forêts du Québec Boréal 1962 à 1994. Univ. Québec, Chicoutimi, 20p.
- Chang C.C. et Turner B. L., 2019. Ecological succession in a changing world. Journal of Ecology, 107(2) : pp.503-509. doi: 10.1111/1365-2745.13132.
- Chenot J., 2018. Réhabilitation écologique d'écosystèmes dégradés par l'exploitation des carrières : faire avec, refaire ou laisser faire la nature. Thèse de doctorat en Biologie végétale., Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, France, 295p.

- Cherki K., 2011. Analyse de la répartition spatiale des incendies de forêt en fonction des facteurs anthropiques, écologiques et biophysiques. Le cas de la forêt de la Mâamora (Maroc septentrional). Etudes caribéennes. <https://doi.org/10.4000/etudescaribeennes.10978>
- Chermat S., 1999. Les étages de végétation en Algérie Nord-Orientale/Approche phytosociologique. Thèse de Magister., Univ. Ferhat Abbas, Sétif, 114p. + annexes.
- Chermat S., 2013. Etude phytosociologique et pastorale des djebels Youssef et Zdimm (Hautes plaines Sétifiennes). Thèse de doctorat., Université Ferhat Abbas Sétif 1, 264p.
- Chermat S., Djellouli Y. et Gharzouli R., 2013. Dynamique régressive de la végétation des hautes plaines sétifiennes : érosion de la diversité floristique du djebel Youssef (Algérie). Revue d'écologie (La terre et la vie), Vol. 68 n° 1.
- Chermat S. et Bounar R., 2020., Demarcation and protection of *Pistacia atlantica* Desf. In Setifian Steppe (North-Est of Algeria). Journal of EcoAgriTourism, 16 (2) : pp.45-50.
- Chételat J., 2005. Eléments méthodologiques de diagnostic paysager utilisant les systèmes d'information géographique. Thèse, Doct., Ecole polytechnique, Lausanne, 14p.
- Chuvieco E. et Congalton R.G., 1989. Application of remote sensing and GIS to forest fire hazard mapping. Rem. Sens. Environ., 29 : pp. 147-159.
- Clauzel S., 2014. Dynamiques de l'occupation du sol et mutations des usages dans les zones humides urbaines. Étude comparée des hortillonnages d'Amiens (France) et des chinampas de Xochimilco (Mexique). Thèse de doctorat en géographie., Université Paris-Sorbonne – Paris, 374p.
- Clements F.E., 1916. Plant Succession : Analysis of the Development of Végétation. Carnegie Institution of Washington Publication Sciences, 252 : pp. 501-512.
- Clevers J., Bartholomeus H.S.M. et de Wit A., 2004. Land Cover Classification with the Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS). 24th EARSeL Symposium "New Strategies for European Remote Sensing". Durbovnik, Croatie, EARSEL : pp. 354-362.
- Congalton R.G., 1991. A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data. Remote Sensing of Environment, (46) : pp.37-35.
- Corgne S., 2004. Modélisation prédictive de l'occupation des sols en contexte agricole intensif. Thèse de Géographie., Université de Rennes 2, Rennes, 230 p.

- Daget P., 1977. Le bioclimat méditerranéen : Caractères généraux, modes de caractérisation. *Vegetatio*, 34(1) : pp. 1-20.
- Dauriac F., 2004. Suivi multi-échelle par télédétection et spectroscopie de l'état hydrique de la végétation méditerranéenne pour la prévention du risque de feu de forêt. Thèse de doctorat, Unité Mixte de Recherche Cemagref - ENGREF "structures et systèmes Spatiaux", Montpellier, 221 p.
- De By RA. et Rolf A., 2000. Principles of geographic information systems. The International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), Hengelosestraat, Vol.99.
- Debrach J., 1953. Notes sur les climats du Maroc occidental. *Maroc médical*, 32 (342) : pp. 1122-1134.
- Derdjini H., 2017. Cartographie des changements de l'occupation du sol dans la plaine de la Mitidja à partir des images landsat. Mémoire de master, école nationale supérieure d'hydraulique -Arbaoui Abdellah, 78p.
- Djoufack-Manetsa V., 2011. Étude multi-échelles des précipitations et du couvert végétal au Cameroun : Analyses spatiales, tendances temporelles, facteurs climatiques et anthropiques de variabilité du NDVI. Thèse de doctorat., Université de Bourgogne ; Université de Yaoundé, Yaoundé, 321p.
- Duchaufour P., 1977. Pédologie : pédogénèse et classification. Masson éd. Tom. 1, 477p.
- Ducrot D., 2005. Méthode d'analyse et d'interprétation d'images télédétection de multisources. Extraction de caractéristiques du paysage., HDR, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 240p.
- Duminil T., 2007. Exploitation de données de télédétection en vue d'étudier la mise en place de l'écotourisme dans la région de Andavadoaka (Madagascar). Rapport de stage 2ème année SUPARGO, Montpellier, 19p.

**-E-**

- ESRI., 2004. Utilisation d'Arc Map, Arc GIS 9, ESRI 380 New York Street Realands. ESRI France 21, 646p.
- Emberger L., 1955. Une Classification biogéographique des climats. Trav.Lab. Bot. Géo. Zool. Fac. Scien. Série Bot, 7 : pp. 3-43.

**-F-**

- Fadhli F., 2011. Segmentation des images satellites très haute résolution spatiale., Thèse de magister. Université Usto, 81p.
- Faleh A., Lakhouaja H., Sadiki A. et Chaaouan Dj., 2012. Sig, Teledetection Et Evaluation De Risqued'incendie De Forets « Exemple Du Massif Forestier Khezana (Province De Chaouene ». Papeles de Geografia, 55-56 : pp. 37-48.
- Fillol E., Baret F., Weiss M., Dedieu G., Demarez V., Gouaux P. et Ducrot D., 2006. Cover fraction estimation from high resolution SPOT HRVet HRG and medium resolution SPOTVEGETATION sensors. Validation and comparison over South-West France. Second Recent Advances in Quantitive Remote Sensing Symposium, Torrent, Espagne, Global Change Unit : pp. 659-663.
- Foley J. A., Defries R., Asner G.P., Barford C., Bonan G., Carpenter S.R., Chapin S.F. *et al.*, 2005. Global Consequences of Land Use. Science, 309 (5734) : pp. 570-574.
- Fournier A., 2011. Influence de la structure des couverts végétaux en télédétection de la fluorescence chlorophyllienne. Thèse de doctorat., Ecole Polytechnique, Paris, 250p.
- Friedl M.A., McIver D.K., Hodges J.C.F., Zhang X.Y., Muchoney D., Strahler A.H., Woodcock C.E. *et al.*, 2002. Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. Remote Sensing of Environment, 83 (1-2) : pp. 287-302.

**-G-**

- Gana M., 2018. Valorisation des potentialités écologiques dans la wilaya de Constantine : Analyse cartographique de la structure des paysages et de la dynamique de

l'occupation et l'utilisation du sol par télédétection et SIG. Thèse de doctorat., Université Des Freres Mentouri Constantine, 281p.

- Gharbi H. et Meziani M., 2019. Etude diachronique de la végétation au niveau du parc national de Chréa (Algérie). Mémoire de master., Université des Frères Mentouri Constantine 1, Algérie, 54p.
- Gharbi H., Chermat S. et Gana M., 2022. Plant cover analysis and diachronic evolution using GIS and Remote Sensing : Djebel Boutaleb (Nord -est of Algeria). Journal of EcoAgriTourism, 19(1) : pp. 9-20.
- Girard M.C. et Girard C.M., 1989. Télédétection appliquée, zones tempérées et intertropicales. 2ème éd. Paris, Masson, 260 p.
- Glaçon J., 1967. Recherche sur la géologie et les gîtes métallifères du Tell Sétifien (Algérie). Bull de géol. n° 32. O.T.I.
- Guettouche M.S., Derias A., Boutiba M., Bounif M., Guendouz M. et Boudella A., 2011. A fire risk modelling and spatialization by GIS. Journal of Geographic Information System, Vol. 3 N°3 : pp. 254-265.
- Guinochet M., 1973. La Phytosociologie- Masson éd., Paris, 227 p.
- Guray E., 2008. Reconnaissance d'objets cartographiques dans les images satellitaires à haute résolution. Thèse de doctorat en informatique. Paris.
- Guyot G., 1984. Caractérisation spectrale des couverts végétaux dans le visible et le proche infrarouge, application à la télédétection. Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection, n°95 : pp. 5-14.

## -H-

- Hachemi M.A., 2014. Apport de la géomatique dans la protection des forêts contre les incendies (cas la forêt Fenouane Ain el Hdjar, Saida). Mémoire Master en Ecologie et Environnement, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 82 p.
- Hadjadj M.F., 2011. Apport des SIG et des images satellites pour la cartographie numérique de la forêt du Chettabah (Wilaya de Constantine) : modélisation climatique et classification. Mémoire de master., Université El-Hadj Lakhdar, Batna, Algérie, 178p.

- Hansen M.C., DeFries R.S., Townshend J.R.G., Sohlberg R., Dimiceli C. et Carroll M., 2002. Towards an operational MODIS continuous field of percent tree cover algorithm: examples using AVHRR and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 83 (1-2) : pp. 303-319.
- Hanski I., 2005. Landscape fragmentation, biodiversity loss and the societal response, *EMBO reports*, 6 (5) : pp. 388-392.
- Hutchinson M.F., 1995. Stochastic space-time weather models from ground-based data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 73 : pp. 237-264.

**-I-**

- IAAT., 2003. Cahier méthodologique sur la mise en œuvre d'un SIG. Territoires numériques, 10p.

**-J-**

- Jacquemoud S., 1993. Inversion of the PROSPECT+ SAIL canopy reflectance model from AVIRIS equivalent spectra: theoretical study. *Remote Sensing of Environment*, 44 (2) : pp. 281-292.
- Jappiot M., Blanchi R. et Alexandrian D., 2003. Cartographie du risque d'incendie de forêt : besoins, méthodes et données. Essai de normalisation. *Forêt Méditerranéenne t. XXIV, n° 4* : pp. 427-434.
- Johnston. et McCoy J., 1993. *Using Arcgis Spatial Analyst*, Environmental Systems Research Institute, ESRI Press (ISBN-10: 1589480058), 240 p.
- Justice C.O., Vermote E., Townshend J.R.G., Defries R., Roy D.P., Hall D.K., Salomonson V.V. *et al.*, 1998. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) : Land Remote Sensing for Global Research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36 (4) : pp. 1228-1249.

**-K-**

- Kanev D., 1972. Etude de la forêt domaniale du Boutaleb. Secrétariat d'état aux forêts et au reboisement (Mission bulgare). CNRF, 150 p.
- Kefifa A., 2014. Contribution à l'étude et à la cartographie de l'impact des pressions anthropozoogènes et climatiques sur les ressources naturelles des monts de Saïda (Algérie). Thèse de doctorat en Sciences d'Agronomie et des Forêts., Université. Abou Bakr Belkaid de Tlemcen. Algérie, 113p.
- Khader M., Benabdeli K., Mederbal K., Fekir Y., Gueddime R. et Mekouss B., 2009. Etude du risque incendie à l'aide de la géomatique : cas de la forêt de Nesmoth (Algérie). *Mediterranea Serie de Estudios Biológicos, Época II N° 20* : pp. 10-38.
- Khedam R., 2008. Contribution au développement de méthodologies de fusion /classification contextuelles d'images satellitaires multi-sources. Application à la cartographie thématique du milieu urbain de la ville d'Alger. Thèse de doctorat., Univ. Houari Boumediene, Alger, 6p.
- Konecny M., Zlatanova S., Bandrova T., 2010. Geographic Information And Cartography For Risk And Crisis Management : Towards Better Solutions. *Lecture Notes In Geoinformation And Cartography* : pp. 55-94.
- Kourtz P., 1977. An application of LANDSAT digital technology to forest fire fuel type mapping. *Canadian symposium on remote sensing*, Vol. 2 : pp.1111-1115.

**-L-**

- Labed K., Hamdadou D. et Fizuzi H., 2009. Proposition d'un processus décisionnel pour l'aménagement du territoire. *PRODUSMAGT, Journées d'animation scientifique*, Alger, 1p.
- Lacoste A. et Salanon R., 2001. *Elément de biogéographie et d'écologie*. 2ème éd. Revetaugm. Paris, 318 p.
- Laffly D., 1997. *Ecologie, Télédétection et SIG : les écotypes du grand tétras dans le Haut- Jura*. Ed. MAPPEMONDE. Univ. Pau et des Pays de l'Adour, 27p.

- Lahmar R., Bedrani S., Elloumi L., Zgdouni L., Bedrani S., 1993. Intensification céréalière dans les hautes plaines Sétifiennes : quelques résultats. *Chiers options méditerranéennes*, 2(1) : pp. 93-97.
- Lapie G. et Maige A., 1914. *Flore forestière de l'Algérie*, 357p.
- Lecerf R., 2008. Suivi des changements d'occupation et d'utilisation des sols d'origine anthropique et climatique à l'échelle régionale par télédétection moyenne résolution (application à la Bretagne). Thèse de doctorat en géographie., Université de Rennes 2, 327p.
- Legrain M., 2002. *Dictionnaire encyclopédique* Ed. Larousse, France : pp. 1119-1253.
- Le Houérou H.N., 1969. La végétation de la Tunisie steppique (avec référence aux végétations analogues d'Algérie, Lybie et Maroc). *Ann.Inst.Nat.Rech.Agron.Tunis*, 42 (5), 561p.
- Le Houérou H.N., Claudin J., Haywood M. et Donadieu J., 1975. Etude phytocéologique du Hodna. AGS., FAO, Rome, 154 p., 2 carte Coul. 1/200 000.
- Li G. et Weng Q., 2010. Fine-scale population estimation : How Landsat ETM+ imagery can improve population distribution mapping. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 36(3) : pp. 155-165.
- Lhomme S., 2013. Introduction à géomatique : (Complément de cours). Université de Genève, 1p.
- Letreuche B.N., 1991. Les reboisements en Algérie et leur perspective d'avenir. Vol. I. OPU, Alger. 294 p.
- Lili Chabaane Z., Chakroun H., Guidara H., Bargaoui H., Abdelmoula K., Khaldi A., Caloz R. et Boussema M.R., 2008. Télédétection et modélisation spatiale pour la cartographie des risques des feux de forêts dans le massif de Djebel Mansour en Tunisie. Les XI<sup>ème</sup> Journées Scientifiques du Réseau Télédétection de l'AUF 03 au 07 novembre 2008 Antananarivo (Madagascar) Télédétection et Gestion de l'Environnement.
- Lovett A. et Appleton K., 2008. *GIS for Environmental Decision-Making*, CRC Press ; 1 édition (ISBN-10 : 0849374235), 99p.

- Madoui A., 1995. Contribution à l'étude de l'impact écologique des feux de forêts sur la végétation du massif du Bou-Taleb (Sétif). Thèse de Magister., Université Ferhat Abbas, Sétif 1, Algérie, 281p.
- Madoui A. et Gehu J-M., 1999. Etat de la végétation dans la forêt du Bou-Taleb Mont du Hodna, Algérie. Forêt méditerranéenne t. XX( 4), pp. 162-168.
- Madoui A., 2002. Les incendies de forêt en Algérie : Historique, bilan et analyse. Forêt méditerranéenne, 23(1) : pp. 23-30.
- Madoui, A. et Gehu J.M., 2002. Effect of forest fire on the reconstitution of Aleppo pine forests in some sites in the domanical forest of Bou-Taleb, mount of Hodna, Algeria, Millpress Science Publishers Rotterdam, Netherlands.
- Madoui A., 2013. Les incendies de forêts en Algérie. Étude de l'évolution après feu des peuplements de *Pinus halepensis* Mill. dans l'Est algérien. Cas de la forêt de Bou-Taleb, du reboisement de Zenadia et du parc national d'el Kala. Thèse de doctorat., Université 133p.
- Maire R., 1926. Carte géographique de l'Algérie et la Tunisie-Gouv. Algérie.1 carte h.t. Alger, vol 1, 78p.
- Manion P.D., 1981. Tree Disease Concepts. 2e éd. New-Jersey, USA, Prentice-Hall, 402 p.
- Marage D., 2004. Structure et fonctionnement du peuplement ligneux dans le *Trochiscantho Abietetum*. Essai de caractérisation des phases sylvigénétiques et sylviculturales. Application dans le bassin versant de Gap-Chaudun (05). ENGREF, Nancy, Rapport final, Convention ONF/ENGREF, 19 p.
- M.A.T.E., 2003. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. Rapport sur l'état et l'avenir de l'environnement, 465 p.
- May R.M., Lawton J.H. et Stork N. E., 1995. Assessing extinction rates. Extinction Rates. J. H. e. M. Lawton, R.M. Oxford, Oxford University Press : pp. 1–24.
- Meddour R., 1992. Régénération naturelle de *Cedrus atlantica* Man. et de divers pins après incendie dans l'arboretum de Meurdja (Algérie). Forêt méditerranéenne, XIII (4) : pp. 275-287.

- Meribai y., 2011. La conservation de la biodiversité dans les parcs nationaux du Nord de l'Algérie. Etat des lieux et perspectives amélioration des capacités. Mémoire de magister en sciences agronomiques., ENSA. El Harrach, Alger, 144 p.
- Merikhi R., 1995. Contribution à l'étude de la végétation des monts du Hodna (Etude phytosociologique du massif de boutaleb). Thèse de magister., Université de Ferhat Abbes Sétif 1, Algérie, 178 p.
- Mihi A., 2002. La forêt de Zenadia (Haute Plaine Sétifienne) Diagnostic et perspective de protection. Mémoire de Magister., Université Ferhat Abbes, Sétif 1, Algérie, 142 p.
- Mile J., 1979. Vegetation dynamics. Chapman and Hall éd. Lendon, 80 p.
- Moquet A., 2003. Apports de la télédétection pour la cartographie d'habitats terrestres en zones humides méditerranéenne, application aux habitats de la réserve nationale de Camargue. PEE d'ingénieur agronome., Ecole national supérieur d'Agronomie et des industries alimentaires. Nancy, 64 p.
- Morton D.C., DeFries R.S., Shimabukuro Y.E., Anderson L.O., Arai E., del Bon Espirito-Santo F., Freitas R. et Morisette J., 2006. Cropland expansion changes deforestation dynamics in the southern Brazilian Amazon. Proceedings of the National Academy of Sciences, 103(39) : 14637.

-N-

- Nedjar F. et Zouatine C.E., 2019. Analyse de la variabilité thermique à Constantine (Algérie) pour la période 1998-2017. Mémoire de master., Université de Constantine 1, 105 p.
- Nedjraoui D. et Bédrani S., 2008. La désertification dans les steppes algériennes : causes, impacts et actions de lutte. Vertigo, 8(1).
- Nicolas V., Chocat B., Lourdière D., Pierre Dupont S., Le Fur S. *et al.*, 2013. Ingénierie écologique appliquée aux milieux aquatiques. Pourquoi ? Comment ? ASTEE, 357 p.

**-O-**

- Oudjet A. et Rabia A., 2008. Conception et réalisation d'un système d'information géographique (SIG) pour l'aide à la gestion des ressources en eau. Mém. Ing., I.N.I. Alger, 21p.
- Ozenda P., 1975. Sur les étages de végétation dans les montagnes du bassin méditerranéen. Doc. Cart. Ecol., XVI : pp. 1-32.

**-P-**

- Pain-Orcet M., Lo Seen D., Fauvet N., Trébuchon J.F. et Dipapoundji B. 1998. Les cartes, la télédétection et les SIG, des outils pour la gestion et l'aménagement des forêts tropicales d'Afrique Centrale. Édit. CIRAD-Forêt, série "FORAFRI 1998", rapport 12, Montpellier, 27 p.
- Peduzzi P., 2009. Assessing global exposure and vulnerability towards natural hazards : the Disaster Risk Index. Nat.Hazards Earth Syst.Sci, 9 : pp. 1149-1159.
- Peterson D., Resetar S., Brower J. et Diver R., 1999. Forest Monitoring and Remote Sensing, A Survey of Accomplishments and Opportunities for the Future. Spring, Verlag Berlin Heidelberg : pp. 98-180.
- Pew K.L. et Larsen C.P.S., 2001. GIS analysis of spatial and temporal patterns of human caused wildfires in the temperate rain forest of Vancouver Island, Canada. Forest Ecology and Management, 140 : pp. 1-18.
- Puissant A., 2003. Information géographique et images à très haute résolution utilité et applications en milieu urbain. Thèse de Doctorat en géographie., Université Louis Pasteur Strasbourg I, 448 p.

**-Q-**

- QuezeL P., 1976. Les forêts du pourtour méditerranéen. Forêts et maquis méditerranéen : écologie, conservation et aménagement''. Notes techniques du MAB N° 2, UNESCO, Paris : 1023.

- Quezel P., 1986. Les pins du groupe LIHalepensis, Ecologie, Végétation, Ecophysologie. Options Méditerranéennes, N°1, 13 p.
- Quezel P., 2000. Réflexions sur l'évolution de la flore et de la végétation au Meghreb méditerranéen. Ibis Press, Paris, 117 p.
- Quezel P. et Medail F., 2003. Ecologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen. Elsevier éd, 513 p +annexes.

## -R-

- Ramade F., 1994. Eléments d'écologie, Ecologie fondamentale. 2ème édition. Paris. 185p.
- Ramos F., 2003. Modélisation et validation d'un système d'information géographique 3D opérationnel. Thèse de Doctorat., Univ. Marne-La Vallée, France, 48p.
- RMCL., 2013. Exploitation d'une carrière et d'une installation de criblage-concassage, Commune d'Arches. Effets du projet sur l'environnement et mesures de protection : pp. 251-456.
- Roder A., Hill J., Duguay B., Alloza J.A. et Vallejo R., 2008. Using long time series of Landsat data to monitor fire events and post-fire dynamics and identify driving factors. A case study in the Ayora region (eastern Spain). Remote Sensing of Environment, 112 (1) : pp. 259-273.
- Rondeaux G., Steven M. et Baret F., 1996. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. Remote Sensing of Environment, 55(2) : pp. 95-107.

## -S-

- Saidi N., 1984. Dynamique de la végétation du maquis dans les chaînes de Dj Zerouela et de Dj Bou-Zegra (Atlas tellien). Mémoire ingénieur., ENSA, El Harrach, Algérie, 131 p.
- Sala O. E., Chapin F.S., Armesto J.J., Berlow E., Bloomfield J., Dirzo R., Huber-Sanwald E. *et al.*, 2000. Biodiversity: global biodiversity scenarios for the year 2100. Science, 287 (5459) : pp. 1770-1774.

- Sanda Gonda H., 2010. Cartographie de la dynamique de l'occupation des sols et de l'érosion dans la ville de Niamey et sa périphérie. Mémoire de Maîtrise., université Abdou Moumouni de niamey, 62p.
- Sandro., 2009. Vers l'Analyse Spatio-Multidimensionnelle à l'aide du Geobrowser Google Earth., University de Naples "Federico II", Napoli, Italy .XXVII<sup>o</sup>, Congrès INFORSID, Toulouse.
- Sedjar A., 2012. Biodiversité et dynamique de la végétation dans un écosystème forestier - Cas de djebel Boutaleb-. Mémoire de magister., Université Ferhat Abbas Sétif 1, Algérie, 137 p.
- Servigne S. et Libourel T.R., 2006. Fondements des bases de données spatiales. Traité IGAT : Information Géographique et Aménagement du Territoire, 250p. ISBN 2-7462-1378-8.
- Seltzer P., 1946. Le climat de l'Algérie. Trav. Inst. Météorol. Phys. Globe, Alger, Vol. 1, 219 p.
- Shaw P., 2005. Estimating local extinction rates over successive time-frames. Biological Conservation. 121 (2) : pp. 281-287.
- Skidmore D., 2002. A theoretical model of pedagogical discourse. Disability, Culture and Education, 1(2) : pp. 119-131.
- Solly B., Dieye EH., Mballo I., Sy O., Sane T. et Thior M., 2020. Dynamique spatio-temporelle des paysages forestiers dans le Sud du Sénégal : cas du département de Vélingara. Physio-Géo, 15 : pp. 41-67.
- Soto G., 1997. *Atriplex nummularia*, espèce pionnière contre la désertification. FAO. XI congrès Forestier Mondial. Antalya- Turquie, Vol2, 2p.
- Soudani K., 2005. Introduction générale à la télédétection. Cours en ligne., Fac des sciences d'Orsay-Unv paris Sud XI, 26p.
- Sylla D., 2014. Modélisation spatio-temporelle de la vulnérabilité de du milieu a la dégradation des sols en milieu semi-aride à partir de données radar. Environmental Sciences., Université de de Sherbrooke, French.

**-T-**

- Tabopda G. et Fotsing J.M., 2010. Quantification de l'évolution du couvert végétal dans la réserve forestière de Laf-Madjam au Nord du Cameroun par télédétection satellitale. *Sécheresse*, 21 (3) : pp. 169-178.
- Tadjeddine B., 2001. Diagnostic écologique et proposition d'un modèle d'aménagement : cas des systèmes écologiques fragilisés de la région d'El Baidh (Algérie). Thèse de Magistère., Centre Universitaire de Mascara, 116p.
- Tarhouni M., Ouled Belgacem A., Neffati M. et Chaieb M., 2007. Dynamique des groupements végétaux dans une aire protégée de Tunisie méridionale. *Cahiers Agriculture*, 16 (1), 7p.
- Thierno A.W., 2008. Initiation à Map Info Professional, étapes cartographique et élémentaire avec Map Info Professional. Ed. ENPC-LVMT, Marne, 3p.
- Townshend J.R.G. et Justice C.O., 1988. Selecting the spatial resolution of satellite sensors required for global monitoring of land transformations. *International Journal of Remote Sensing*, 9 (2) : pp. 187-236.
- Townshend J.R.G. et Justice C.O., 2002. Towards operational monitoring of terrestrial systems by moderate-resolution remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 83 (1-2) : pp. 351-359.
- Trabaud L., 1980. Impact biologique et écologique des feux de végétation sur l'organisation, la structure et l'évolution de la végétation des zones de garrigues du basLanguedoc. Thèse de doctorat d'état Montpellier.
- Trabaud L., Grosman J. et Walter T., 1985. Recovery of burnt *Pinus halepensis* Mill. forests. I. Understorey and litter phytomass development after wildfire. *Forest Ecology and Management*, 12(3-4) : pp. 269-277.

**-U-**

- UVED., 2008. ENVCAL. Suivi de l'environnement par télédétection, Cours en ligne. Université Paris I, Panthéon-Sorbonne.

**-V-**

- Vega-Garcia C., Woodard P.M. et Lee B.S., 1993. Geographic and temporal factors that seem to explain human-caused fire occurrence in Withecourt Forest, Alberta. In Proceedings of GIS'93 Symposium, Vancouver, British Columbia : pp. 115-119.
- Verbyla D.L., 2002. Pratical GIS Analysis. 1ére édi. CRC press, 304p. <http://doi.org/10.4324/9780203217931>.

**-W-**

- Wardlow B.D., Egbert S.L. et Kastens J.H., 2007. Analysis of time-series MODIS 250 m vegetation index data for crop classification in the U.S. Central Great Plains. Remote Sensing of Environment, 108 (3) : pp. 290-310.
- Wardlow, B.D., Kastens J.H. et Egbert S.L., 2006. Using USDA crop progress data for the evaluation of greenup onset date calculated from MODIS 250-meter data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 72 (11) : pp. 1225-1234.
- Weber C. et Puissant A., 2003. Urbanization pressure and modeling of urban growth: example of the Tunis Metropolitan Area. Remote Sensing of Environment, 86(3) : pp. 341-352.
- Wessels K.J., De Fries R.S., Dempewolf J., Anderson L.O., Hansen A.J., Powell S.L. et Moran E.F., 2004. Mapping regional land cover with MODIS data for biological conservation : Examples from the Greater Yellowstone Ecosystem, USA and Para State, Brazil. Remote Sensing of Environment, 92 (1) : pp. 67-83.
- Wittkuhn R.S., et Hamilton T., 2010. Using fire history data to map temporal sequences of fire return intervals and seasons. Fire Ecology, 6 (2) : pp. 97-114.

**-Z-**

- Zerroug k., 2012. Elaboration d'un système d'information géographique (flore) dans la Wilaya de Sétif. Mémoire de magister., Université Ferhat Abbes Sétif 1, Algérie, 146p.

- Zhang X., Friedl M.A., Schaaf C.B., Strahler A.H., Hodges J.C.F., Gao F., Reed B.C. et Huete A., 2003. Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 84 (3) : pp. 471-475.
- Zida W.A., 2020. Dynamique du couvert végétal forestier des agrosystèmes sahéliens du Nord du Burkina Faso après les sécheresses des années 1970-1980 : implication des pratiques d'aménagement des terres. Thèse de doc-Sci., Université du Québec (Montréal), 196p.

# Journal of EcoAgriTourism

Bulletin of Agri-ecology, Agri-food, Bioengineering and Agritourism

Vol. 18 (2022), No 1 (44)

## Journal of EcoAgriTourism

ISSN: 1844-8577

Journal of EcoAgriTourism is a follow up, by translation in English of "Revista de EcoAgroTurism"

ISSN: 1841-642X, first issued in 2005

ISSN: 1844-8577



**EcoAgriTourism**, in the light of its multidisciplinary character, is a wide-open journal which brings together the opinions of specialists from both academic and economic environment, fostering fruitful collaborations.

The journal's structure covers all aspects of the fields approached, the focus being on original and current researches with applications in agriculture, food industry and rural tourism. Collaborators may feel free to undertake biological and technical aspects as well as aspects with social, cultural and environmental impact. Information of general interest is also welcome for the agriecology-food-tourism axis

Prof. Romulus Gruia Ph. D.

The Journal of EcoAgroTurism aims at approaching analyses, methodologies, options and references within the journal's framework.



**Department of Ecobiotechnologies and Equipment for Food and Agriculture**

Transilvania University of Braşov  
Bd. Eroilor nr. 29, 500036, Braşov,  
Tel & Fax: 0268-415326, Tel:  
0268-413000/161



**Journal's Director**

Prof. Romulus GRUIA Ph. D.

**Editor-in-Chief**

Prof. eng. Liviu GACEU Ph. D. Habil.

**Scientific Board**

Assoc. Prof. Ganesh Bora, Ph.D., Mississippi State University, United States;  
Prof. Maria Isabel Bernuga, Ph.D., University Castilla La Mancha, Spain;  
Prof. Mark Shamtsyan Ph.D. State Institute of Technology, St. Petersburg, Rusia;  
Prof. Miklos Herdon, Ph.D. Hab., University of Debrecen, Hungary;  
Prof. Ray F. Iunius, Ph.D., Director Business Development SA, Switzerland;  
Prof. Stefan Stefanov, Ph.D., University of Food Technologies, Plovdiv, Bulgaria;  
Prof. Valerii Sukmanov, Ph.D. Hab., University of Donuet, Ukraine;  
Prof. Werner Hofacker, Ph.D., University of Applied Sciences, Konstanz, Germany;



**Technical Board**

Simona SOICA  
Oana Bianca OPREA  
Raisa SAMOILA  
Raducu MICU  
Bernadett DENES  
Cristina RUSU  
Nicoleta TINEA  
Andrei APARASCHIVEI  
Amalia ADAM  
Luiza VOICILA

**Published by:**

*Transilvania* University Press  
500091 Brasov, B-dul Iuliu Maniu 41 A  
Tel: 0268-476050  
Fax: 0268-476051  
E-mail: editura@unitbv.ro  
Co-editor: Romanian Society for Information Technology in Agriculture, Food, Environment and Tourism  
www.rosita.ro/jeat  
ISSN: 1844-8577

**Center for Biodiversity in Agriculture and Forestry INCE/Romanian Academy-Research point ICDT/Transilvania University of Brasov**  
Romanian Society for Information Technology in Agriculture, Food, Environment and Tourism (ROSITA)



# PLANT COVER ANALYSIS AND DIACHRONIC EVOLUTION USING GIS AND REMOTE SENSING: DJEBEL BOUTALEB (NORD -EST OF ALGERIA)

H. GHARBI<sup>1</sup>, S. CHERMAT<sup>2\*</sup>, M.GANA<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratory of urban project town territory (LPUVIT), University Ferhat Abbas Setif 1, 19000, Algeria. [hanen.gharbi@univ-setif.dz](mailto:hanen.gharbi@univ-setif.dz)

<sup>2</sup> Laboratory of urban project town (LPUVIT), University Ferhat Abbas Setif 1, 19000, Algeria. [s.chermat@univ-setif.dz](mailto:s.chermat@univ-setif.dz)

<sup>3</sup> Laboratory of development and valorisation of phyto-genetics resources, University of Freres Mentouri Constantine, 25000, Algeria. [gana.mohammed@umc.edu.dz](mailto:gana.mohammed@umc.edu.dz)

\*Corresponding author: [s.chermat@univ-setif.dz](mailto:s.chermat@univ-setif.dz), [sabahchermat@yahoo.fr](mailto:sabahchermat@yahoo.fr).

**Abstract:** *The forest vegetation of Djebel Boutaleb is experiencing degradation in its entirety under the effect of burly anthropogenic pressure and climatic risks. Hence, the vegetation cover requires analyzes to conserve and protect it with a better knowledge of the composition and the vegetation dynamics of this ecosystem.*

*For that, spatio-temporal studies of vegetation evolution have been applied using multi-temporal Landsat imagery. An NDVI classification technique was used to generate thematic maps, with 4 major classes. The use of remote sensing data and geographic information system (GIS) has made it possible to detect important changes in vegetation cover over 35 years.*

*The results showed that between 1984 and 2019, the overall estimation of the evolution of the vegetation of Djebel Boutaleb is positive; with a negligible strong gain estimated 0.17% and an insignificant progression estimated at 72.67%.*

**Keywords:** *Djebel Boutaleb, Evolution, GIS, NDVI, Remote Sensing, Vegetation*

## 1. Introduction

Algeria's northern regions, where climatic and environmental conditions help the development of forest formations, cover 250,000 km<sup>2</sup>, i.e. a little more than 10% of the total area. (Ghennai, 2014) [1].

Algerian forests have experienced, over time, numerous aggressions by man through his different activities which threaten their sustainability; either intentionally and by need, ignoring their impacts on the environment; or involuntarily persuaded that the resources they offer are infinite [2].

In Djebel Boutaleb, which is part of the Mediterranean forests, the forest vegetation, under the effect of anthropogenic actions, worsened by climatic conditions is experiencing degradation in its entirety [3-7]. Hence, the vegetation cover requires analyzes to conserve and protect it with a better knowledge of the

composition and the vegetation dynamics of this ecosystem. Studies which are interested in its vegetation are less important than that of geological ones.

The Boutaleb Massif has not been subject to any diachronic study. This is the reason we proposed, for the first time, to study its vegetation cover regression with a spatio-temporal study using Geographic Information System (GIS) and remote sensing.

Among the works carried out on cartography:

- Chalifoux et al, (2006);
- Alhaskeer (2013);
- Chevigny (2014);
- Molina et al, (2016) [8-11];
- Gana (2017a);
- Gana (2017b);
- Gana (2018) [12, 13, 14];
- Benkaci et al. (2018);
- Arfa (2019);

- Gharbi and Chermat (2021);
- Meliani (2021) [15-18].

The aim of this study is to show the importance of using remote sensing in knowing the state and the spatio-temporal evolution of vegetation between 1984 and 2019. The data obtained in this work will be organized in a geographical database that will supply specific information for the management and protection of natural resources in general and particularly floristic.

## 2. Materials and Methods

### 2.1. Studied Area

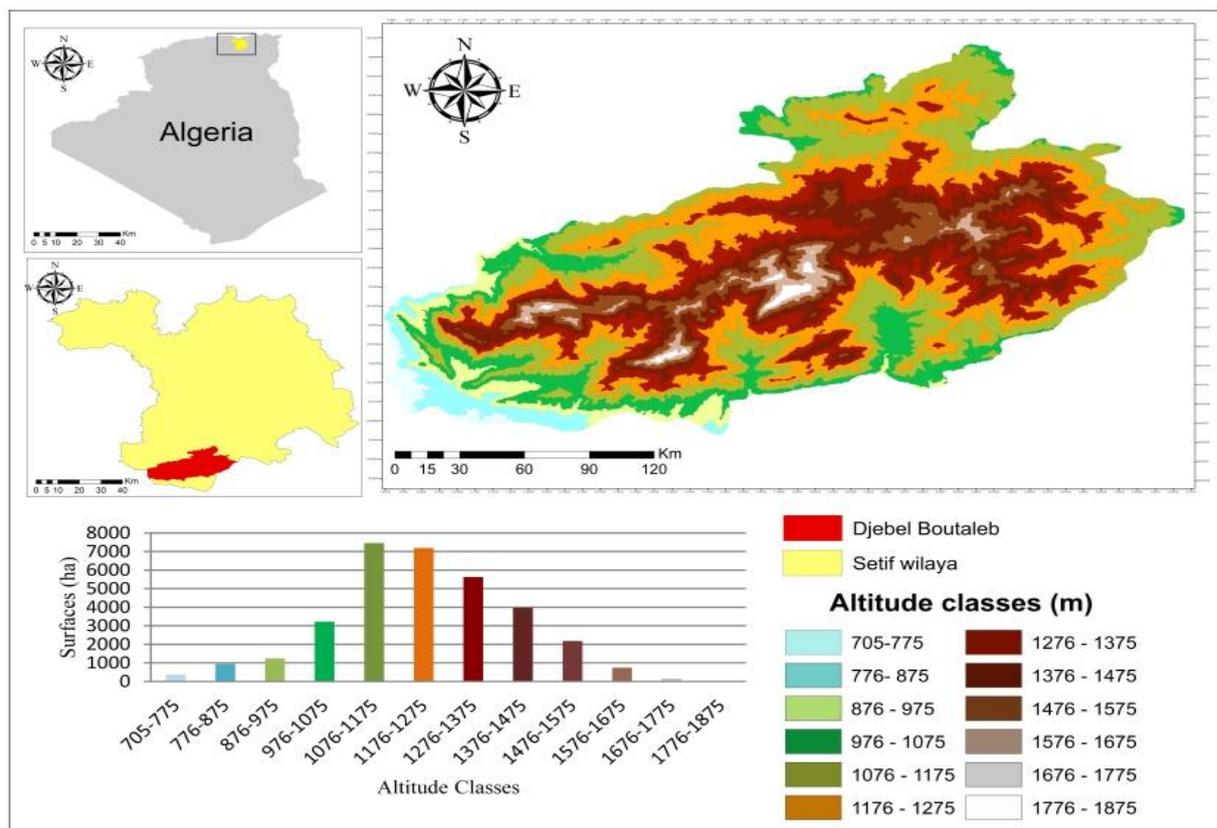
Boutaleb forest massif is located in the southern part of Setif, between 35° 41' 30"N latitude and Est 5° 13' 30"E longitude. It situated

70 km from Setif and extends from west to east over 35 km, with an estimated extension of 15 km along a horizontal plane (as the crow flies) and an area of almost 33,000 Ha.

Its altitudes are between 705 m and 1875 m (fig.1), occupy 44.24% (between 1076 and 1275 m) and 38.28% (between 1276 and 1375 m).

The highest point is Djebel Afghane peak, which reaches 1875 m in the central part of the massif. Elsewhere, the peaks are also relatively high, Soubella 1548 m, Bouhellal 1837m, Chehellou 1781m, Bouiche 1717m, and Aouzourt 1672 m. It is almost wholly from the Lower Cretaceous, characterized by marly and dolomitic soils (Ghennai, 2014).

Most of its surface is covered by the Upper Aptian, Albian and the Barremian Aptian lands (Lower Cretaceous and Upper Cretaceous) (forest conservation) [19].



**Fig.1.** Geographic location and altitude classes of the study area

The reliefs are in their entirety extremely rough. The main slope categories are 10-25° and 25-45° with respectively 33.4% and 35.4% of the total area.

The slopes are oriented from north to south with an average of 5,755,936 hectares for northern exposure and 17.07% for southern exposure. The rate of other exposures varies from 0.43 to 13.4% (fig. 2). The hydrographic network

of this forest massif is very intense, but lacking a permanent superficial hydrography, nearly all the rivers that are spread in the massif are temporary, dry in summer, with the exception of Oued Faragh whose permanent flow joins Oued Soubella to the west, the latter flows into the chott of Hodna (sedjar, 2012).

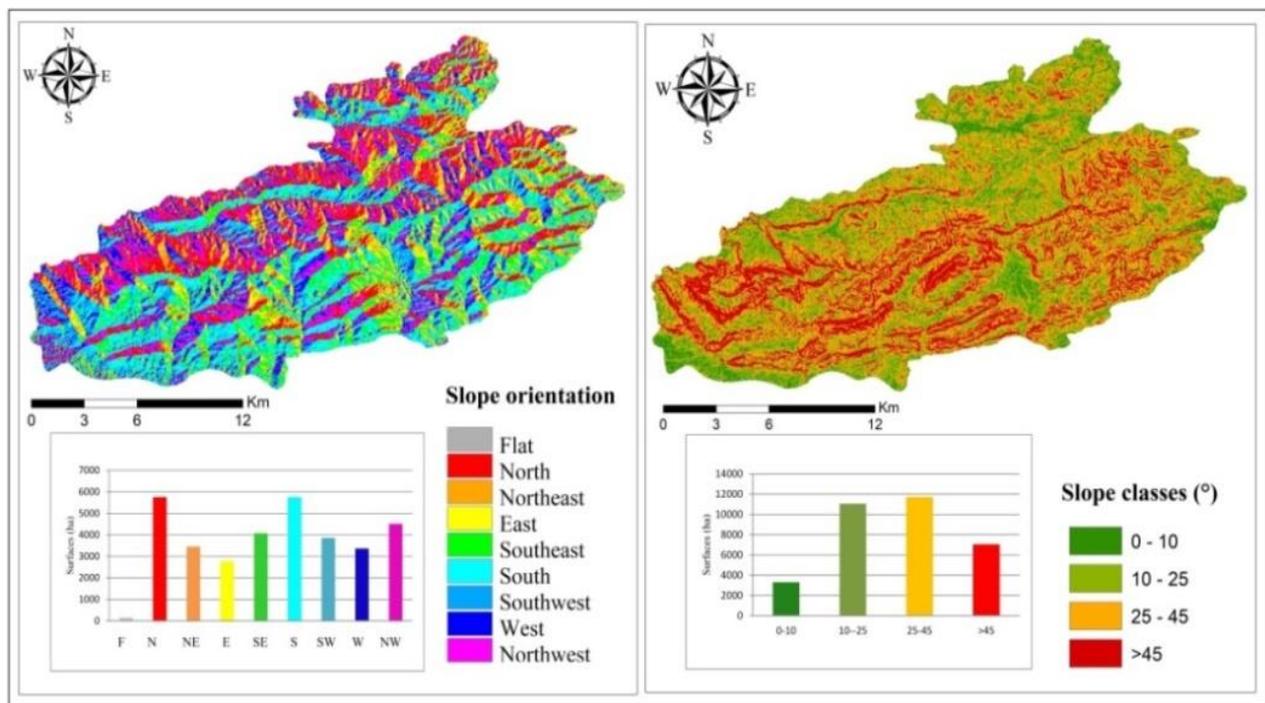
Emberger's quotient Q2 analysis shows that it is between 29 and 66, and the minimum temperature of the coldest month is between  $-3.6$  and  $-0.6^{\circ}\text{C}$ , this allows the accomplishment of the bioclimatic floors map.

The latter shows that Jebel Boutaleb is characterized by 2 bioclimatic floors: arid in cold

winter in the north and south and semi-arid in cold winter in the rest of the massif.

The different vegetation floors defined in the study area are:

- Thermo-Mediterranean ( $<1300$  m);
- Meso-mediterranean (1300 m-1500 m);
- Oro -Mediterranean (1400-1800 m);
- Alti - Mediterranean ( $> 1800$  m)



**Fig.2.** Slope classes and orientation of Djebel Boutaleb

The vegetation is distributed as follows:

- Tree vegetation: dominated by *Cedrus atlantica* (3%) and *Pinus halepensis* (29.53%) ( table 1). While for *Quercus ilex*, it only exists in the massif in the matorral form.

- Shrub vegetation: represented by high, dense, perforated and clear matorrals made from *Quercus ilex*, *Cedrus atlantica* and *Pinus halepensis*.

We also find medium perforated matorrals which are formations based on *Phillyrea*

*angustifolia*, *Pistacia terebinthus* and *Pistacia lentiscus* and clear matorrals dominated by *Juniperus phoenicia* and *Juniperus oxycedrus*.

- Herbaceous vegetation: is well represented by scratched lawns, dominated by herbaceous chamaephytes and thorny xerophytes in pads occupying the summits of certain Djebel, steppes, which are open formations of xerophytes in tufts colonizing nearly the entire southern flank of the massif and finally, ermes therophytics which invade the forests and the matorrals clearings (forest Conservation).

**Table 1.** Forest stands types distribution in Djebel Boutaleb

Forest stands	Surface (ha)	Surface(%)
<i>Juniperus</i> L., matorral	912.75	3
<i>Quercus ilex</i> L., coppice	2479.78	8.15
Natural regeneration	384.09	1.26
Reforestation	1929.02	6.34
<i>Pinus halepensis</i> Mill., forest	8981.6	29.52
<i>Juniperus Phoenicia</i> L.,- <i>Quercus ilex</i> L., matorral	3307.35	10.87
<i>Quercus ilex</i> L., matorral	2890.11	9.5
<i>Juniperus</i> L., scrubland	1240.7	4.08
<i>Cedrus atlantica</i> Manetti., forest	910.92	2.99
Other	7385.81	24.28
<b>Total</b>	<b>30422.13</b>	<b>100</b>

## 2.2. Data Sources

The data used for this study include: data collected from fieldwork and Landsat satellite data (thematic mapper 5 and operational land imager 8) was used, which are available from United States Geological Survey (USGS) website <http://earthexplorer.usgs.gov/> [20].

For the choice of the optimal date of the image, it is essential to obtain an image without

cloud and without overlapping and distinguish all the elements of the land while avoiding confusion between the vegetation floors [21].

We opted for the period from June to August (table 2).

The ancillary data used in this study includes: The Arc GIS (10.1) and ENVI (5.1) software's were used for realization of change maps, cartographic database and spatial analyses.

**Table 2.** Characteristics of the Landsat images used

Characteristics	16/07/1984	18/08/1996	03/08/2008	19/08/2019
ID	LT05_L1TP_194 035_19840716_2 0171213_01_T1	LT05_L1TP_194 035_19960818_2 0180215_01_T1	LT05_L1TP_194 035_20080803_2 0160116_01_T1	LC08_L1TP_194 035_20190802_2 0190819_01_T1
Format	TIFF	TIFF	TIFF	TIFF
Data	Landsat 4-5 TM	Landsat 4-5 TM	Landsat 4-5 TM	Landsat 8 OLI
Image centre	194/35	194/35	194/35	194/35
Acquisition date	16/07/1984	18/08/1996	03/08/2008	02/08/2019
Spatial Scale (m)	30m	30m	30m	30m

## 2.3. Methodology

We have used Landsat satellite images and Google Earth images, whose combination allowed us to produce more accurate maps (Meliani et al, 2021).

The satellite images were processed after delimitating the study area and eliminating all parts of the image outside the area [22].

The "raw" image produced by the sensor cannot be used directly because it has errors linked to the sensitivity of the sensors, the geometry of observation, and the presence of the atmosphere's effect around the earth.

Lighting conditions and atmospheric attenuation are highly variable in time and space. So, the images need atmospheric corrections in order to homogenize the multispectral data.

The principle of this correction is to convert digital image counts (gray level) into luminance at the satellite sensor level and then remove the disturbing effects of the atmosphere from this new variable in order to eventually result in a physical measurement of the reflection at the target surface [23]. We used the ENVI classic tool (quick atmospheric correction).

Among all the vegetation indicators proposed since the origins of spatial remote sensing, the normalized vegetation indicator has

become the standard tool for describing the spectral behavior of vegetation cover. This indicator, most often called NDVI according to its English abbreviation, is calculated from two spectral bands, infrared IR (where the vegetation cover has high reflectance) and red R (where mineral surfaces have high reflectance) according to the following expression:  $NDVI = (IR - R) / (IR + R)$ .

The resulting neo-channel shows an increasing gradient of plant activity ranging from black (absence of covering) to white (very high chlorophyll activity).

The result of an NDVI takes the form of a new image, the value of each pixel being between 0 (bare soil) and 1 (maximum vegetation cover). It is the analysis of the range of shades extending between these extreme values (very rare) that informs the observer about the density of the plant cover and the quantity of green biomass [24].

The next step consists in discovering the major changes between the different dates chosen. This allows detecting the slightest pixel changes between two images at different dates (1984-1996, 1996-2008 and 2008-2019). The images obtained show, both spatially and quantitatively, the important changes that occurred in vegetation over time in the study area.

Possible changes can be: strong progression, little progression, stabilization, strong regression

and little regression. The last step is to make maps of vegetation change over 35 years.

### 3. Results

#### 3.1. NDVI Results

We examined the distribution of vegetation cover over the whole study area at each date. NDVI values were variable, the highest NDVI values are found in areas with elevation varying between 1276 and 1875m, indicating a high density of vegetation cover.

NDVI values from (0.40 - 0,20) were found in areas with 876 to 1275m elevation and indicating areas with moderate vegetation cover. Low NDVI values (< 0.20) are located at regions with 705 to 875m elevation indicates croplands and no vegetated areas : built-up, water, rocks... (fig.3).

NDVI differentiation data layers were generated for each image pair to identify the different pixel changes.

The modified zones are seen in dark green, light green, red and pink, represent the strong progression, the insignificant progression (almost stability), the strong regression and the insignificant regression (almost stability) of the vegetation zones respectively, while the regions without change are displayed in white.

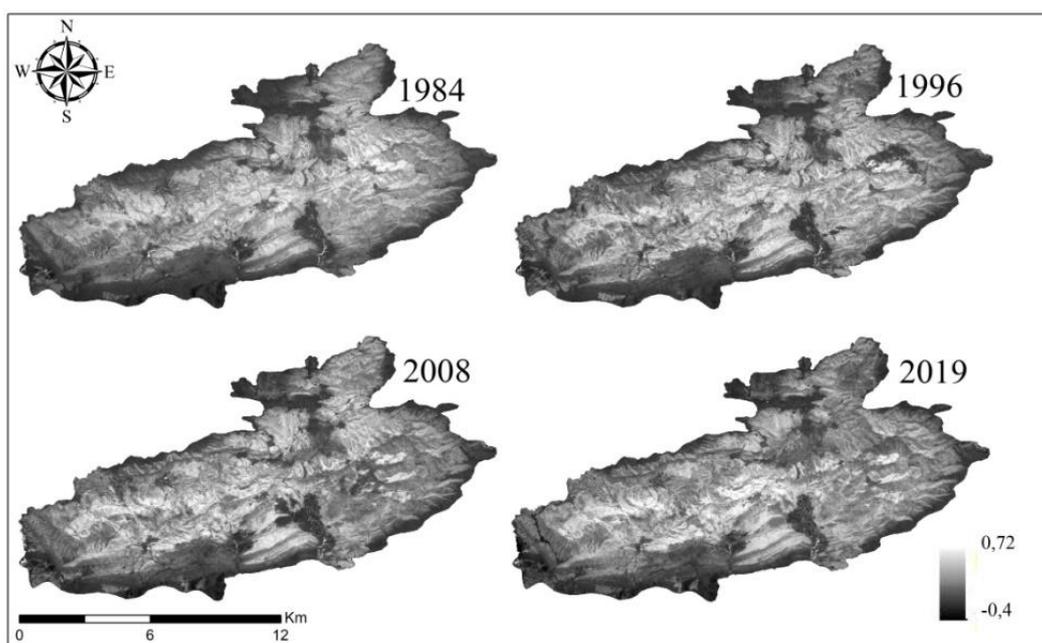


Fig. 3. NDVI map of Djebel Boutaleb in 1984, 1996, 2008 and 2019

### 3.2. Change Detection Analysis

The results obtained through the analysis of NDVI, illustrate a substantial change in vegetation between 1984-1996, 1996-2008 and 2008-2019 (fig 6, 7 and 8)

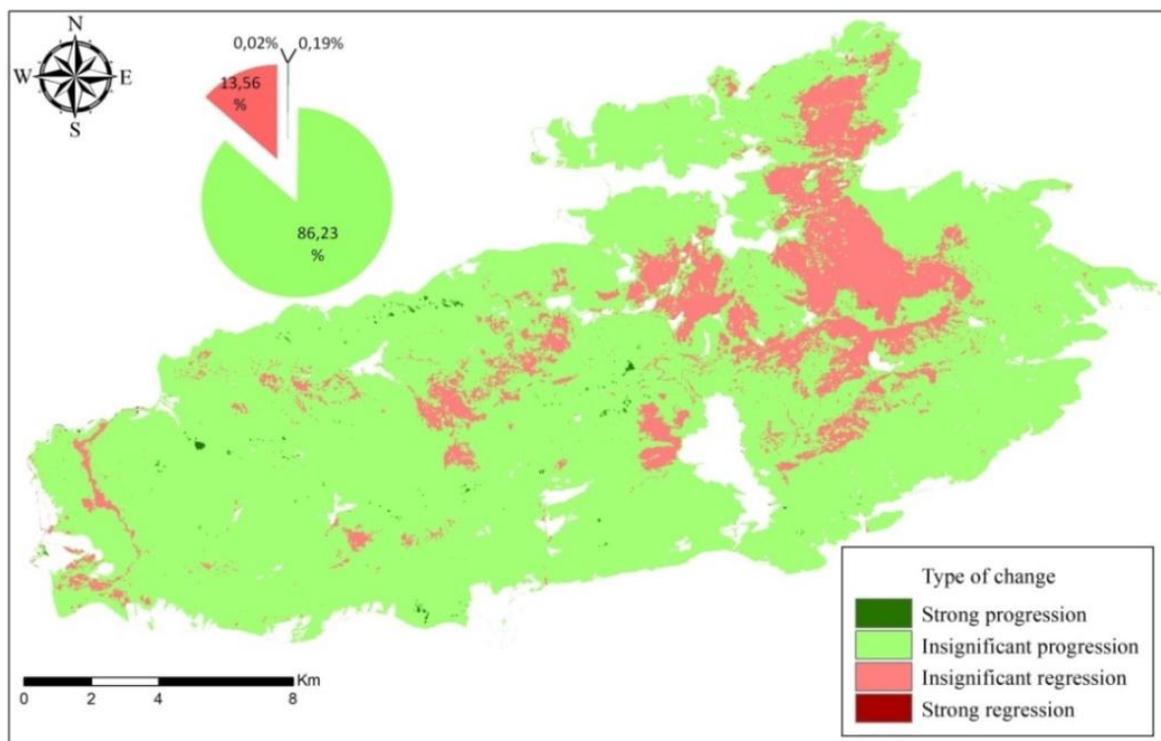
#### 3.2.1. Global analysis of the evolution of the vegetation between 1984 and 2019

Map 04 shows the important changes that have occurred in the Boutaleb massif over a period of 35 years. The vegetation of Djebel Boutaleb has experienced a strong increase of 55,17 ha in the center, the North, the North-West and the South-West and a sharp regression of

0,75 ha in the western part. During the same period, the areas of insignificant progression of vegetation are in the majority, they occupy an area of 86.23%, while the area of the zones where the regression is insignificant is estimated at 13.56%.

The evaluation of the evolution of the vegetation, over the whole period, remains minor with a strong progression of only 54.72 ha i.e. 0.17% of the massif total area, while for the insignificant progression; it is estimated at 72.67%.

For a detailed follow-up, we have subdivided the study period into 3 periods: 1984-1996, 1996-2008 and 2008-2019.



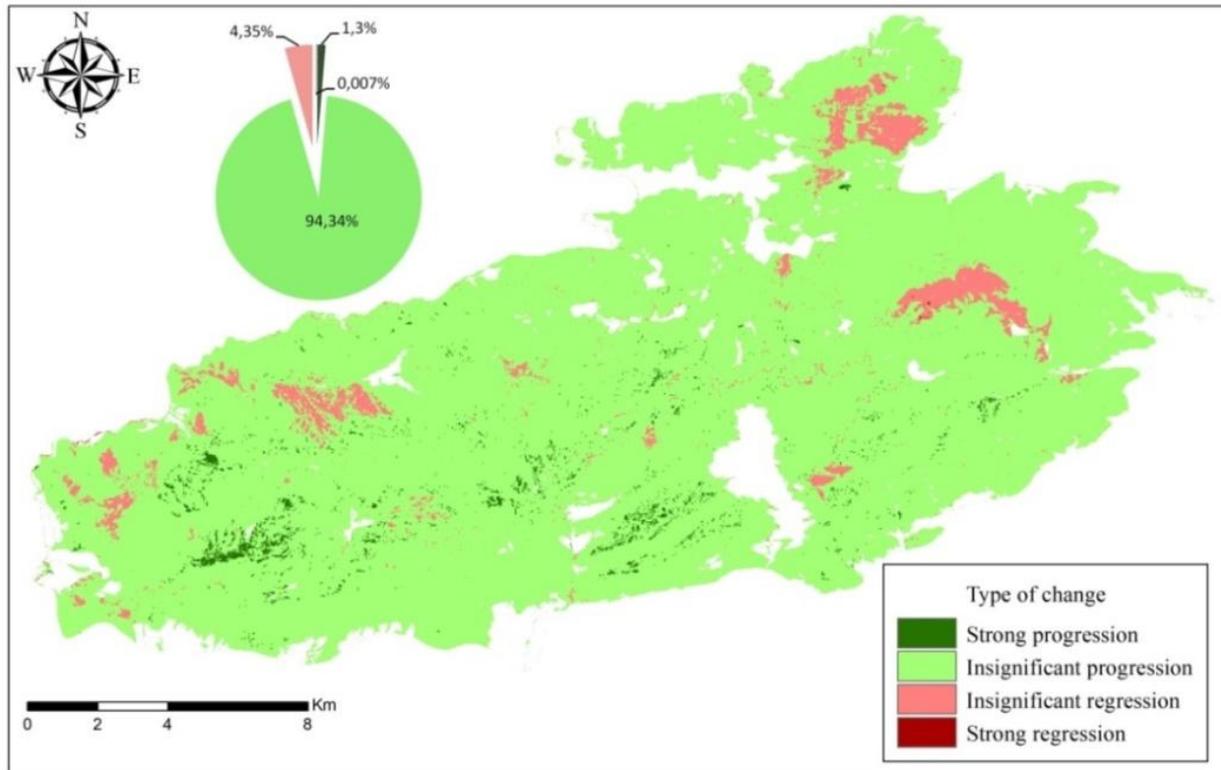
**Fig.4.** Global analysis map of the evolution of the vegetation between 1984 and 2019

### 3.2.2. Analysis of the evolution of the vegetation between 1984 and 1996

Figure 5 shows that the vegetation cover has seen an important progression by 431.28 hectares i.e. 1.3% particularly in the West and the South. Against this gain, 2.34 ha or 0.007% of the strong

regression was recorded in the east and northeast. We also notice a progression and an insignificant regression estimated at 94.34% and 4.35% respectively.

The massif then shows a positive balance with a strong regression of 428.94 ha and an insignificant regression of 91.3%.



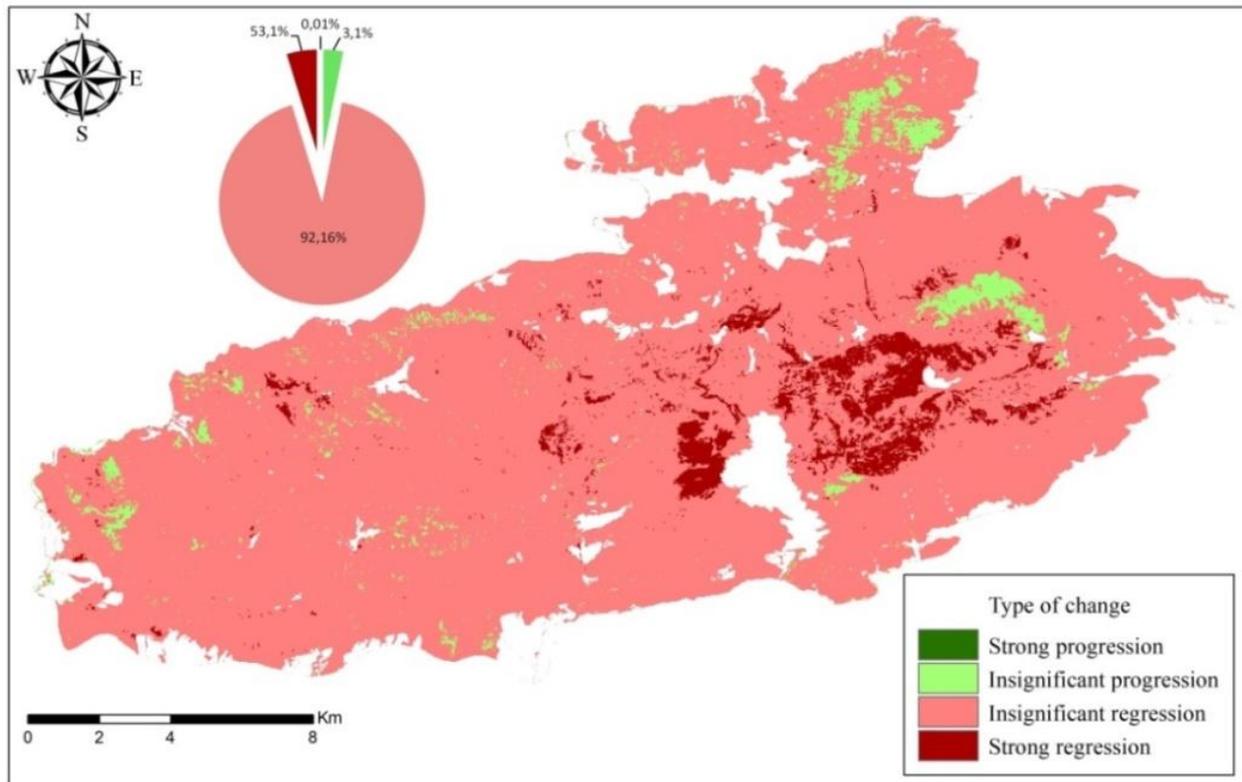
**Fig.5.** Analysis map of the evolution of the vegetation between 1984 and 1996

### 3.2.3. analysis of the evolution of the vegetation between 1996 and 2008

According to figure 6, we notice that the areas of strong progression are only 0.01%. The strong regression affected 4.73%, it is located in the eastern part with some markings in the north, west and southwest. We also noted that the areas

where no significant regression was recorded are the majority, they occupy 92.16%. On the other hand, the tiny progression occupies 3.1%.

Djebel Boutaleb recorded then a negative balance with a strong regression for the surface area equivalent to 1560.96 hectares and 31 049.19 ha for a low significant regression.



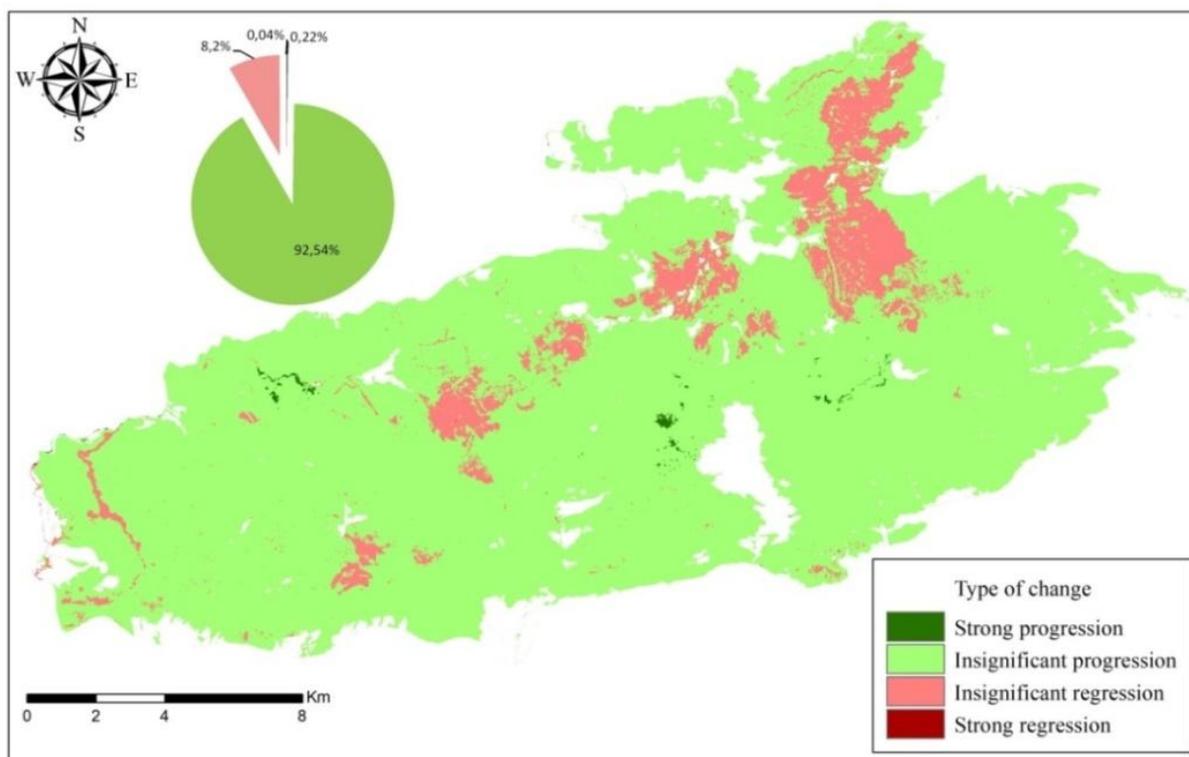
**Fig.6.** Analysis map of the evolution of the vegetation between 1996 and 2008

### 3.2.4. analysis of the evolution of the vegetation between 2008 and 2019

From figure 7, we can see that between 2008 and 2019, 91.54% of the vegetation cover in Djebel Boutaleb experienced little progression. At the same time, 8.2% registered a slight regression.

The strong progression in the center and northwest is about 6 times greater than the strong regression in the west.

It is estimated at 72.81%. So the massif shows a positive balance with a strong progression of 0.18% and a slight progression of 83.34%.



**Fig.7.** Analysis map of the evolution of the vegetation between 2008 and 2019

## 4. Discussion

The analysis of the three maps allows us to note that the greatest progression relates to the period 1984-1996.

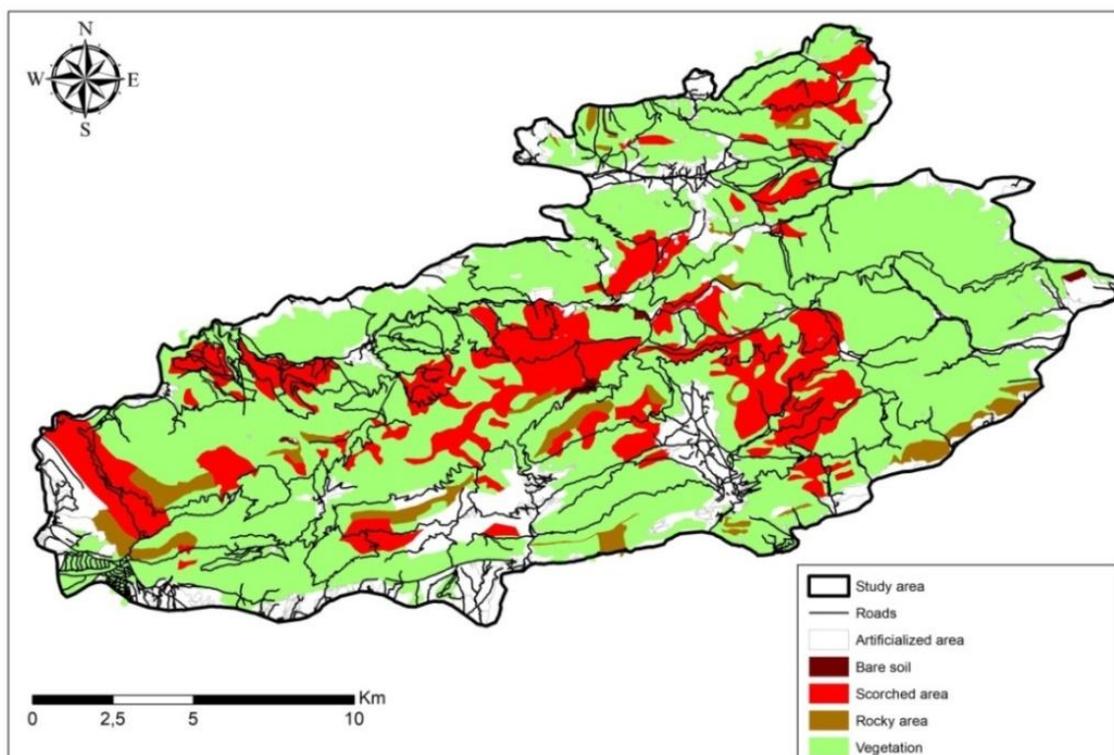
This progression is mainly due to natural regeneration and also to reforestation. Furthermore, the strongest regression relates to the period 1996-2008.

According to Forest Conservation Department of Setif, the main causes of this regression are much more linked to fires, where there is a loss of 742 ha, particularly in summer, in the state forests of Aleppo pine, cedar and

juniper oxyhedron in the municipalities of Ain-azel, Rasfa, Hamma, Boutaleb and Salah-Bey. We also have the very noticed presence of the pine processionary of the Aleppo pine on the one hand, and parasitic foci on the cedars (table 3).

In addition, there is the polypore on Aleppo pine and cedar.

We can also add the growing needs in wood for various uses, forest rangelands to meet the food needs of livestock, land clearing, over grazing, mismanagement, deforestation (fig.8). However, this kind of activities could endanger the natural vegetation and reduce the forest ability to regenerate.



**Fig.9.** Land use map of Djebel Boutaleb

**Table 3.** Scorched areas of Djebel Boutaleb (1985-2014)

<b>Year</b>	<b>Surface</b>
1985	5ha
1986	298ha
1987	25ha
<b>1998</b>	<b>180ha</b>
<b>1999</b>	<b>155ha</b>
<b>2001</b>	<b>175ha</b>
<b>2002</b>	<b>17ha</b>
<b>2005</b>	<b>10ha</b>
<b>2006</b>	<b>5ha</b>
<b>2007</b>	<b>50ha</b>
<b>2008</b>	<b>150ha</b>
2009	112ha
2009	12ha
2010	75ha
2012	185ha
2013	432ha
2014	167ha
<b>Total</b>	<b>2053ha</b>

## 5. Conclusion

In this study, we suggested to detect the change in the vegetation cover of Djebel Boutaleb over a long period using satellite images of the LANDSAT TM5 and OLI8 type by the use of the vegetation index by normalized difference NDVI to realize the change maps on each date.

Geographic information systems (GIS) together with remote sensing appear to be a tool for monitoring evolution in vegetation cover.

This diachronic study illustrates that between 1984 and 2019, the overall estimation of the evolution of the vegetation is positive; with a negligible strong gain estimated 0.17% and an insignificant progression estimated at 24,058.71 ha.

The conservation of the vegetation then requires avoiding all anthropogenic factors and particularly the repeated fires which lead to the deterioration of the vegetation.

Finally, it would be interesting to use satellite images at higher resolutions for a more detailed analysis in order to better distinguish areas of degradation or regeneration.

## References

- [1] Ghennai, N. : *Etude des rapports et des corrélations entre le régime bioclimatique et les incendies de forêts (cas de l'Est-algerien)*. Magister thesis, University Constantine, Algeria, 2014, 111 pp.
- [2] Madoui, A. : *Les incendies de forêt en Algérie. Historique, bilan et analyse : Forêt méditerranéenne*, 2002, no. 1, pp: 23-30.
- [3] Chermat, S., Djellouli, Y., Gharzouli, R. : *Dynamique régressive De la végétation Des Hautes Plaines Sétifiennes : érosion De la Diversité floristique Du Djebel Youssef (Algérie)*. Rev. Écol. (Terre Vie), 2013, vol. 67, pp. 85 - 100.
- [4] Madoui, A. : *Rapport entre les facteurs du milieu et le risque d'incendie de la forêt du Boutaleb*. Mém. D.E.S. University Ferhat Abbas, Setif 1, Algeria, 1987, 49 pp.
- [5] Madoui, A. : *Contribution à l'étude de l'impact écologique des feux de forêts sur la végétation du massif forestier de Boutaleb (Sétif)*. Magister thesis, University Ferhat Abbas, Setif, Algeria, 1995, 281 pp.
- [6] Laouar, H. : *Contribution à l'étude des plantes médicinales du massif de Boutaleb ; Phytomasse de Rosmarinus tournefortii de Noé, effet de l'altitude et de l'exposition sur la composition de ses huiles essentielles*. Magister thesis. University Ferhat Abbas. Setif 1, Algeria, 1995, 186 pp.
- [7] Sedjar, A. : *Biodiversité et dynamique de la végétation dans un écosystème forestier - Cas de djebel Boutaleb*. Magister thesis, university Ferhat Abbas, Setif1, Algeria, 2012, 137 pp.
- [8] Chalifoux, S., Nastev, M., Lamontagne, C., Latifovic, R., Fernandes, R. : *Cartographie de l'occupation et de l'utilisation du sol par imagerie satellitaire LANDSAT en hydrogéologie*. Télédétection, 2006, Vol. 6, no. 1. pp: 9-17.
- [9] Alhaskeer, Z. : *Analyse cartographique de la structure des paysages de vallées : évaluation de la dynamique des paysages de vallées du bassin versant de la Maine à partir de la télédétection et de SIG*. Doctorat thesis. University of Maine, France, 2012.
- [10] Chevigny, E. : *Cartographie de la diversité des sols viticoles de versant par imagerie à haute résolution : contribution à la connaissance des terroirs*. Sciences de la Terre, Doctoral thesis, University of Bourgogne, France, 2014, 399 pp.
- [11] Molina, I., Martinez, E., Morillo, C., Velasco, J., Jara, A.: *Assessment of Data Fusion Algorithms for Earth Observation Change Detection Processes*. Sensors, 2016, 16 (10). 1621.
- [12] Gana, M., Arfa, AMT., Benderradji, MEH. Alatou, D.: *Analysis of Vegetation Change and Mapping Tree Species in Mountainous Area Using Multi-Source Satellite Data: A Case Study of Djebel El Ouahch, Algeria*. American Journal of Environmental Protection, 2017, Vol. 5, No. 2, pp. 44-51.

- [13] Gana, M., Benderraji, MEH., Saint-Gerand, T., Alatou, D.: *Monitoring Land Use/Land Cover Dynamics in the Province of Constantine, Algeria using Remote Sensing and GIS*. Indian Journal of Science and Technology, 2017, Vol 10(41), pp.1-9.
- [14] Gana, M. : *Valorisation des potentialités écologiques dans la wilaya de Constantine : Analyse cartographique de la structure des paysages et de la dynamique de l'occupation et l'utilisation du sol par télédétection et SIG*. Doctoral thesis, university of Constantine, Algérie, 2018, 281 pp.
- [15] Benkaci, S., Dehbia, A., Oumellal, A., Remini, B. : *Modélisation De L'érosion Du Bassin Haut Et Moyen Cheliff Par L'application Model Builder Sur Arcgis*. Journal Of Materials And Engineering Structures, 2018, pp. 81–93.
- [16] Arfa, M. : *Application du SIG et de la télédétection pour un outil cartographique d'aide à la gestion des feux de forêts dans la wilaya d'El Tarf*. Doctoral thesis, university freres Mentouri, Constantine 1, Algeria, 2019, 230 pp.
- [17] Gharbi H., Chermat S.: *Spatio-temporal dynamics of steppic landscapes: Djebel Youssef-Setif (Algeria)* ). Algerian journal of arid environment, 2021, volume 11, no. 1, pp.114 - 123.
- [18] Meliani, A., Gana, M., Benderradji, M. E. H., Ben Yahia, K., Alatou, D. : *Cartographie des déterminants de l'invasion par le pin maritime, Pinus pinaster Ait., de la subéraie de Haddada dans le nord-est de l'Algérie*. Bois et Forêts des Tropiques, 2021, 347, pp.77-88.
- [19] Chermat, S., Djellouli, Y., Gharzouli, R.: *Phytodynamique des groupements steppiques de djebel Zdim en Algérie nord-orientale*, Revue Internationale d'Ecologie Méditerranéenne International Journal of Mediterranean Ecology, 2016, vol. 42 (1), pp. 85-100.
- [20] Arouna, O., Etene, C.G., Issaiko, D. : *Dynamique de l'occupation des terres et état de la flore et de la végétation dans le bassin supérieur de l'Alibori au Bénin*. Journal of Applied Biosciences, 2016, pp : 10531-10542.
- [21] Gharbi, H., Meziani, M. : *Etude diachronique de la végétation au niveau du parc national de Chréa (Algérie)*. Master thesis, University Freres Mentouri Constantine 1, Algeria, 2019, 54 pp.
- [22] El Zerey, W., Boudjra, S.B., Benslimane, M., Mederbal, K. : *L'écosystème steppique face à la désertification : cas de la région d'El Bayadh, Algérie*. VertigO – La revue électronique en science de l'environnement, 2009, volume 9 numéro 2, pp.1-13.
- [23] Abdelbaki, A. : *Utilisation des SIG et télédétection dans l'étude de la dynamique du couvert végétal dans le sous bassin versant d'oued Bouguedfine (Wilaya de Chlef)*. Magister thesis, University Hassiba Ben Bouali Chlef, Algeria, 2012, 110p.
- [24] Bouiadjra, S.B., El Zerey, W., Benabdeli, K. : *Étude diachronique des changements du couvert végétal dans un écosystème montagneux par télédétection spatiale : cas des monts du Tessala (Algérie occidentale)*. Physio-Géo-Géographie Physique et Environnement, 2011, volume V. pp.211-225.

## ملخص

يعتبر تغيير المناظر الطبيعية في المناطق شبه القاحلة أحد الأبعاد البيئية الأكثر إثارة للقلق. في هضاب سطيف العليا، أصبح تدهور الغطاء النباتي كارثيًا في السنوات الأخيرة. فالسلاسل الجبلية مهددة بإزالة الغابات والحرائق والتصحر ومن اللازم ضمان المتابعة النوعية والكمية لتطور الغطاء النباتي. كما أن دراسة المناخ العالمي وديناميكيات النباتات والتنوع النباتي ضرورية لاستكمال دراستنا. وقد أتاح لنا تطبيق المنهجية المطورة لنظام المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد دراسة التطور المكاني والزمني للغطاء النباتي (بين 1996 و2020)، البيئة المادية والعوامل المناخية. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها تراجعًا في التكوينات شبه الغابية والغابية لجبل يوسف وجبل بوطالب لصالح الغطاء النباتي الخفيف نحو الأراضي المتدهورة أو العارية. يرجع هذا الانخفاض إلى التأثير المشترك لتغيرات التساقط والحرائق المتكررة والرعي المفرط وقطع الأشجار بشكل غير قانوني. على مدى 24 عامًا، سجلت نباتات جبل يوسف رصيدًا سلبيًا إجماليًا بانخفاض قدره 314.2 هكتار أو 22.6%. وينطبق الشيء نفسه على جبل بوطالب، الذي سجل خسارة قدرها 5517.1 هكتار أو 18.2% من إجمالي المساحة. ستستخدم للإدارة البيئية المستدامة وتتيح الطبقات الجغرافية المخزنة في قاعدة بيانات جغرافية كأساس للمعلومات اللازمة.

**الكلمات المفتاحية:** نظم المعلومات الجغرافية. الاستشعار عن بعد. الغطاء النباتي. التغيرات المكانية والزمانية. هضاب سطيف العليا.

## Résumé

L'altération des paysages des régions semi-arides constitue une des dimensions environnementales les plus préoccupantes. Dans les Hautes Plaines Sétifiennes, la dégradation du couvert végétal a pris une ampleur catastrophique ces dernières années. Les massifs montagneux sont menacés par déforestation, incendies et de désertifications. Il est utile d'assurer le suivi qualitatif et quantitatif de l'évolution du tapis végétale. Cependant les études climatiques globales, la phyto-dynamique et la phytodiversité sont d'une aide précieuse pour compléter notre étude. L'application de la méthodologie développée du Système d'information géographique et de la télédétection, nous a permis d'étudier l'évolution spatio-temporelle du couvert végétal (entre 1996 et 2020), de caractériser le milieu physique et les paramètres climatiques. Les résultats obtenus ont révélé une régression des formations pré-forestières et forestières de Djebel Youssef et Djebel Boutaleb en faveur de végétation claire, dégradées voir des terrains nus. La régression enregistrée au niveau de ces deux massifs est sous l'effet combiné de la variabilité pluviométrique, des feux répétés, du surpâturage et de la coupe illicite du bois. Sur une période de 24ans, la végétation de Djebel Youssef a enregistré un bilan global négatif avec une régression de 314,2 ha soit 22,6%. Même constat pour Djebel Boutaleb qui a enregistré une perte de 5517,1 ha soit 18,2% de la surface totale du massif. Les couches thématiques stockées dans une base de données géographique produite au cours de ce travail, permettent aux gestionnaires et aux décideurs de protéger et aménager le secteur étudié. Ces analyses serviront comme une base d'information nécessaire pour la gestion durable de l'environnement.

**Mots clés :** SIG, Télédétection, Couvert végétal, Dynamique spatio-temporelle, Hautes Plaines Sétifiennes.

## Abstract

One of the most worrying environmental dimensions is the alteration of landscapes in semi-arid regions. In the High Setifian Plains, the degradation of the vegetation cover has become catastrophic in recent years. Mountain ranges are threatened by deforestation, fires and desertification. It is useful to follow up qualitatively and quantitatively the evolution of the vegetation cover. However, global climate studies, phyto-dynamics and phytodiversity are invaluable to complement our study. The application of the developed methodology of the Geographic Information System and remote sensing allowed us to study the spatial and temporal evolution of the vegetation cover (between 1996 and 2020), to characterize the physical environment and the climatic parameters. The results obtained showed a regression of the pre-forest and forest formations of Djebel Youssef and Djebel Boutaleb in favor of clear vegetation, degraded to bare land. The decline in these two massifs is due to the combined effect of rainfall variability, repeated fires, overgrazing and illegal logging. Over a period of 24 years, the vegetation of Djebel Youssef recorded an overall negative balance with a decrease of 314.2 ha or 22.6%. Same result for Djebel Boutaleb who recorded a loss of 5517.1 ha or 18.2% of the total area of the massif. The thematic layers stored in a geographical database produced during this work, allow managers and decision-makers to protect and adapt the area under study. These analyses will serve as a basis for information needed for sustainable environmental management.

**Key words :** GIS, Remote Sensing, plant cover, Spatio-temporal dynamics, High Setifian Plains.