



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi
Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences de la Nature et de la Vie

No d'ordre

No de série

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Ecologie et environnement

OPTION : Ecologie des milieux naturels

Thème

**ETUDE DIACHRONIQUE DE L'ÉVOLUTION
SPATIOTEMPORELLE DU CHENE VERT DANS LA FORET
DE CHETTABA (CONSTANTINE) : APPROCHE
CARTOGRAPHIQUE PAR LA TELEDETECTION**

Présenté par

GUERRAM Imen

Devant le jury :

Président : Mr ABABSA L.

Prof. Université Oum El Bouaghi

Rapporteur : Mme RACHED-KANOUNI M.

Prof. Université Oum El Bouaghi

Examinatrice : Mme ZAIDI H.

MCB Université Oum El Bouaghi

Année universitaire : 2021-2022

Résumé

Il est essentiel de suivre l'intensité de l'activité photosynthétique de la forêt de Chettaba afin d'acquérir une meilleure compréhension de la répartition et de la dynamique spatio-temporelle de sa végétation. Cette approche permet d'utiliser l'interprétation des données de télédétection et des systèmes d'information géographique (SIG) pour détecter les changements dans l'état du chêne vert. Dans cette étude, nous avons analysé l'évolution chronologique du chêne vert en utilisant les données de l'indice de végétation normalisé (Normalized Difference Vegetation Index : NDVI) pour la période de 2011 à 2021. Cependant, il n'y a pas encore de consensus sur la méthode la plus efficace pour réaliser un tel suivi. La méthode que nous avons employée est basée sur l'utilisation de 24 images satellitaires de type Landsat (TM et ETM), qui ont été utilisées pour former deux scènes d'étude, à savoir "2011" et "2021". Ces images ont été soumises à une analyse visuelle afin d'éliminer celles présentant une couverture nuageuse importante. L'analyse chronologique a révélé des changements dans l'écosystème forestier du Chettaba, mettant en évidence les différentes mutations qu'a connues cette région.

Mots clés : Télédétection, SIG, NDVI, analyse diachronique.

Abstract

It is essential to follow the intensity of the photosynthetic activity of the Chettaba forest in order to acquire a better understanding of the distribution and the spatio-temporal dynamics of its vegetation. This approach makes it possible to use the interpretation of remote sensing data and geographic information systems (GIS) to detect changes in the condition of holm oak. In this study, we analyzed the time evolution of holm oak using Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) data for the period 2011 to 2021. However, there is not yet consensus on the most effective method for carrying out such monitoring. The method we employed is based on the use of 24 Landsat type satellite images (TM and ETM), which were used to form two study scenes, namely "2011" and "2021". These images were subjected to a visual analysis in order to eliminate those with significant cloud cover. The chronological analysis revealed changes in the forest ecosystem of Chettaba, highlighting the different mutations that this region has undergone.

Keywords : Remote sensing, GIS, NDVI, diachronic analysis.

ملخص

من الضروري متابعة كثافة نشاط التمثيل الضوئي لغابة Chettaba من أجل الحصول على فهم أفضل للتوزيع والديناميكيات المكانية والزمنية لنباتاتها. هذا النهج يجعل من الممكن استخدام تفسير بيانات الاستشعار عن بعد وأنظمة المعلومات الجغرافية (GIS) لاكتشاف التغيرات في حالة البلوط الاخضر. في هذه الدراسة، قمنا بتحليل التطور الزمني للبلوط باستخدام بيانات مؤشر الغطاء النباتي (NDVI) للفترة من 2011 إلى 2021. بأنه لا يوجد إجماع حتى الآن على الطريقة الأكثر فاعلية لتنفيذ مثل هذه المراقبة، الطريقة التي استخدمناها تعتمد على استخدام 24 صورة أقمار صناعية من نوع لاندسات (TM و ETM)، والتي تم استخدامها لتشكيل مشهدين دراسيين هما "2011" و "2021". خضعت هذه الصور لتحليل مرئي من أجل القضاء على تلك الصور ذات الغطاء السحابي الكبير. كشف التحليل الزمني عن تغييرات في النظام البيئي لغابة شطابة، مما يسלט الضوء على الطفرات المختلفة التي مرت بها هذه المنطقة.

الكلمات المفتاحية : الاستشعار عن بعد ، GIS ، NDVI ، التحليل الديناميكي.

DEDICACE

Je dédie ce mémoire de fin d'étude

À MON TRÈS CHER PÈRE

Autant de phrases et d'expressions aussi éloquentes soit-elles ne sauraient exprimer ma gratitude et ma reconnaissance. Tu as su m'inculquer le sens de la responsabilité, de l'optimisme et de la confiance en soi face aux difficultés de la vie.

Tes conseils ont toujours guidé mes pas vers la réussite. Ta patience sans fin, ta compréhension et ton encouragement sont pour moi le soutien indispensable que tu as toujours su m'apporter. Je te dois ce que je suis aujourd'hui et ce que je serai demain, que Dieu le tout puissant te préserve, t'accorde santé, bonheur, qui étudie de l'esprit et te protège de tout mal.

À MA TRÈS CHÈRE MÈRE

Autant des phrases aussi expressives soient-elles ne sauraient montrer le degré d'amour et d'affection que j'éprouve pour toi. Tu m'as comblé avec ta tendresse et affection tout au long de mon parcours. Tu n'as cessé de me soutenir et de m'encourager durant toutes les années de mes études, En ce jour mémorable, pour moi ainsi que pour toi, reçoit ce travail en signe de ma vive reconnaissance et ma profonde estime. Puisse le tout puissant te donner santé, bonheur et longue vie afin que je puisse te combler à mon tour.

À MON TRES CHER ET UNIQUE FRERE

qui était toujours présent à mes côtés pour m'encourager durant toutes les années de mes études Ibrahim El khalil et Nadji Nour Adin allah yarhmou.

Pour toutes les personnes qui m'ont été près de moi

Merci pour vos encouragements, soutien et amour surtout

A Ma très chère copine Allaoia Ferial, mes cousines Fellah Asma et DJelailia Aya bien aimées Djekboub Ahmed nour adine , khwaldiya Seddik et Benferroudj Amin.

REMERCIEMENTS

À ALLAH

Nous tenons à remercier en premier lieu, ALLAH,

le tout puissant de nous avoir donné la force,

la foi et la volonté et qui nous a aidé à réaliser ce travail.

À Madame le Professeur RACHED-KANOUNI Malika

Je tiens à exprimer mon profond respect et gratitude,

à ma directrice de mémoire.

On vous remercie pour votre disponibilité,

vos efforts et vos conseils tout au long de ce travail.

Je présente mes plus vifs remerciements qui s'adressent, avec dignité et honneur, aux membres de Jury :

Mr le Professeur ABABSA Labed président et le Dr, ZAIDI Houda examinatrice qui ont accepté de lire et d'examiner notre travail.

Je désire aussi remercier Dr. ZERROUKI Alia, Dr. et Dr. HADDAD. Ammar qui m'ont aidé tout au long de ma démarche.

A toutes les personnes qui nous ont donné de leurs précieux temps

et leurs expériences pour répondre à

notre formulaire, ou de le partager avec leurs collègues.

A tous nous exprimons nos vives reconnaissances.

Sommaire

Résumés	
Liste des Figures	
Liste des tableaux	
Remerciements	
Introduction	1

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I. Généralités sur le Chêne vert	3
1. Taxonomie	3
2. Les caractères botaniques	3
3. Les caractères écologiques	6
3.1. Climat	6
3.2. Facteurs édaphiques	6
4. Aire de répartition de chêne vert	7
5. ravageurs et maladies (Ennemis)	8
5.1. Les facteurs entomologiques	8
5.2. Les facteurs fongiques	8
6. Association végétale du chêne vert	8
II. Notion de télédétection	8
1. Histoire de la télédétection	9
2. Objectifs de la télédétection.....	10
3. Processus de la télédétection	10
4. Ondes et rayonnement électromagnétique	12
5. Spectre électromagnétique	13
6. Signatures spectrales	13
7. Intérêt de la télédétection dans la cartographie de la végétation	15
8. Principe de la télédétection	15
9. Propriétés optiques et télédétection des couverts végétaux	17
10. Indices de végétation	18

Chapitre II : Matériel et méthodes

I. Présentation de la zone d'étude.....	20
1. Situation de la forêt de Chettaba	20
2. Géologie et écologie de Chettaba.....	21
II. Approche méthodologique.....	22
1. Données utilisées	22
1.1. Images Satellitaires LANDSAT.....	22
1.2. Données géographiques.....	25
2. Outils de travail.....	25
2.1. Logiciel ArcGIS.....	25
3. Étude diachronique de l'évolution de la végétation.....	25
3.1. Acquisition des images satellitaire.....	26
3.2. Sélection des dates des images.....	27
3.3. Géoréférencement.....	27
3.4. Traitement des images.....	27
3.5. Calcul de l'indice de végétation NDVI.....	27
3.6. Détection visuelle du changement	28
3.7. Réalisation des cartes de synthèses	28

Chapitre III : Résultats et discussion

1. Variabilité temporelle.....	30
2. Variabilité spatio-temporelle	34
Conclusion.....	39
Perspectives	
Références bibliographiques	

Liste des figures

Figure 1 :	Feuilles du chêne vert.....	4
Figure 2 :	Glands du chêne vert.....	5
Figure 3 :	Bourgeons du chêne vert.....	5
Figure 4 :	Aire de répartition du chêne vert en Algérie.....	7
Figure 5 :	Les sept étapes du processus de télédétection selon	11
Figure 6 :	Schéma d'une onde électromagnétique.....	12
Figure 7 :	Spectre électromagnétique.	13
Figure 8 :	Réflectances spectrales caractéristiques de trois grands types de surfaces naturelles.....	14
Figure 9 :	Luminance émise par une unité de surface (ds) et dans une portion d'angle solide dans l'espace ($d\Omega$) est sous la dépendance des angles de visée dans le plan (angle azimuthal φ) et par rapport à la verticale (angle zénithal Θ).....	17
Figure 10 :	Situation géographique de la forêt de Chettaba.....	20
Figure 11 :	Méthodologie suivie dans l'étude de traitement des données satellites.....	26
Figure 12 :	Variations annuelles de l'NDVI du chêne vert de 2011 et 21 de la zone d'étude.....	31
Figure 13 :	Variations interannuelles de l'NDVI du chêne vert de la forêt de Chettaba (2011).....	31
Figure 14 :	Variations interannuelles de l'NDVI du chêne vert de la forêt de chettaba (2021).....	32

Liste des photos

Photo 1 :	LANDSAT TM 5.....	23
Photo 2 :	LANDSAT 8 OLI/TIRS.....	23

Liste des tableaux

Tableau 1 :	Tableau des expositions.....	21
Tableau 2 :	Caractéristiques des bandes spectrales de LANDSAT 5 TM.	23
Tableau 3 :	Caractéristiques des bandes spectrales de LANDSAT 8 OLI.	24

Liste des cartes

Carte 1 :	Evolution intermensuelle de l'NDVI du chêne vert de la forêt de Chettaba en 2011.	36
Carte 2 :	Evolution intermensuelle de l'NDVI du chêne vert de la forêt de Chettaba en 2022.	38



Introduction

Introduction

La forêt de Chettaba, située dans la région de Constantine, en est de l'Algérie, abrite une diversité biologique remarquable et joue un rôle écologique essentiel. Parmi les espèces emblématiques de cette forêt, on trouve le chêne vert (*Quercus ilex* L.), une essence forestière méditerranéenne d'une grande importance écologique et socio-économique. Cependant, la pression anthropique et les changements environnementaux ont un impact significatif sur la santé et la distribution du chêne vert dans cette région.

L'étude diachronique du chêne vert dans la forêt de Chettaba est réalisée en utilisant la télédétection comme méthode d'observation et d'analyse. La télédétection, en combinant des données satellitaires et des techniques d'analyse d'images, permet d'obtenir des informations précises et détaillées sur la végétation à grande échelle. Elle offre une perspective historique sur les changements qui ont affecté le chêne vert au cours de la décennie précédente.

Cette étude diachronique permettra de cartographier et d'analyser la répartition du chêne vert dans la forêt de Chettaba. En utilisant des données acquises par des capteurs satellitaires spécifiques, nous serons en mesure de quantifier les changements qui ont eu lieu dans le couvert végétal et d'identifier les facteurs environnementaux qui ont influencé la distribution du chêne vert.

L'utilisation de la télédétection dans cette étude présente plusieurs avantages ; les données satellitaires couvrant de grands territoires devient un outil intéressant pour la cartographie et le suivi de la dynamique du couvert végétal (Leprieur *et al.*, 2000; Jiang *et al.*, 2006). Tout d'abord, elle permet d'obtenir des informations sur de vastes zones géographiques, ce qui est particulièrement pertinent pour l'étude d'une forêt étendue. De plus, la télédétection offre la possibilité d'analyser les données sur une longue période du temps, ce qui permet de suivre les tendances et les changements spatio-temporels. Enfin, elle permet d'obtenir des informations objectives et quantitatives sur l'état de la végétation, ce qui facilite la prise de décisions en matière de gestion et de conservation.

L'indice de végétation normalisé (NDVI) est l'un des indices de végétation les plus utilisés pour la cartographie végétale partout dans le monde. Il permet de déterminer la santé de la végétation en mesurant la teneur en chlorophylle des plantes. Le NDVI est caractérisé par une grandeur physique, la réflectance, qui détermine la capacité des végétaux à réfléchir la lumière.

La réalisation d'une carte d'occupation des sols par la végétation sur la base des images satellitaires et l'utilisation du système d'information géographique, nous permet d'avoir des résultats de grandes valeurs du point de vue scientifique et économique.

Ce mémoire est structuré comme suit :

- Une introduction précise la problématique et cible les objectifs de notre étude.
- Le premier chapitre expose un aperçu bibliographique sur la dynamique du couvert végétal et synthétise des généralités sur la télédétection en relation avec l'étude du couvert végétal.
- Le deuxième chapitre (Méthodologie du travail) est consacré à la présentation de l'aspect physique de la zone d'intérêt, présente le matériel utilisé, explique les méthodes de traitement et d'analyse et définit notre démarche méthodologique.
- Le dernier chapitre répond à la problématique posée par, une interprétation et une discussion des résultats obtenus de cette étude. Les résultats de cette étude fourniront des informations cruciales pour la gestion durable du chêne vert dans la forêt de Chettaba. Ils permettront d'identifier les zones où l'espèce est en régression ou en progression, de comprendre les facteurs environnementaux qui influencent sa distribution et de mettre en évidence les pressions anthropiques qui menacent sa survie. Ces résultats seront essentiels pour orienter les actions de conservation et de gestion de cette ressource forestière précieuse.

En conclusion, cette recherche vise à étudier de manière diachronique le chêne vert dans la forêt de Chettaba entre 2011 et 2021 en utilisant la télédétection comme outil d'observation et d'analyse.



***Chapitre I : Synthèse
bibliographique***

I. Généralités sur le Chêne vert

Le chêne vert (*Quercus ilex* L.), est une espèce sempervirente de la famille des Fagacées. Il est considéré comme l'une des espèces les plus caractéristiques de la région méditerranéenne (Quezel, 1976 ; Ogaya et Penuelas, 2007).

1. Taxonomie

Des nombreux travaux ont été consacrés à la taxonomie du chêne vert. Les caractères très polymorphes de cette espèce ont conduit à une division systématique très confuse et loin d'être tranchée (Barbero, 1980).

Nous avons retenus la classification suivante (Nixon, 1993):

Embranchement : Spermaphytes

Sous-embranchement : Angiospermes

Classe : Dicotylédone

Ordre : Fagales ou « Apétales »

Famille : Fagacées ou « cupulifères »

Genre : *Quercus*

Espèce : *Quercus ilex* L.

2. Les caractères botaniques

- **Taille** : le chêne vert est un arbre ou arbuste pouvant atteindre 15 à 20 m de hauteur. En général, la taille varie avec les conditions du milieu (sol, climat...) (Boudy, 1950).

- **Houppier** : la cime est généralement dense, ovale en peuplement, arrondie à l'état isolé. La ramification est forte et abondante ; les branches principales sont brunâtres robustes et à écorce lisse. Les rameaux âgés sont superficiellement crevassés. Les jeunes ramules de l'année sont couvertes d'un tomentum dense, court et persistant (Lalaouna et Khelifiafia, 2015).

- **Tronc** : le tronc est plus ou moins tordu, peu élancé, robuste de 2 à 3 m de circonférence.

- **Ecorce** : presque noire, rugueuse, se craquelle en petites plaques.

- **Fleurs** : Le chêne vert est une espèce monoïque (chaque individu porte à la fois des organes mâles et femelles mais sur des fleurs séparées) (Rameau *et al.*, 2008) et vraisemblablement dotée d'un système d'auto-incompatibilité (Yacine *et* Lumaret, 1988 ; Salmon, 2004). Les chatons des fleurs mâles sont allongés et pubescents, très abondants et parfois recouvrent entièrement l'arbre d'une couleur jaune à reflets roux. Les fleurs femelles sont verdâtres, minuscules, plus discrètes, situées à l'extrémité des rameaux et groupées par 2 ou 3 (Rameau *et al.*, 1989 et 2008). La floraison a lieu entre Avril et Mai et la dispersion du

pollen est anémophile. La structure particulière des fleurs mâles (chatons) facilite la libération des grains de pollen par le vent.

- **Feuilles** : Les feuilles sont simples, alternées, pétiolées et persistantes, pendant 3 à 4 ans. Le limbe est coriace, de taille et de forme variables, les feuilles sont de couleurs pale, poilues sur les deux faces, puis vert foncé, glabres ou à poils plus ou moins épars, luisantes sur la face supérieure vert grisâtre et tomenteuses sur la face inférieure (Figure 1).

La durée de vie des feuilles du chêne vert est de deux années (parfois même trois années) et leur répartition est aléatoire sur les rameaux selon l'âge de l'arbre. Ainsi, on distingue les chênes verts à feuilles oblongues et les chênes verts à feuilles arrondies (Amat *et al.*, 2008).



Figure 1. Feuilles du chêne vert.

- **Fruits (glands)** : Les glands sont verdâtres puis brunâtres, de forme très variable : ovoïdes, sub-cylindriques, globuleux ; leur longueur varie de 1 à 3 cm et leur diamètre de 1 à 1.5 cm, ils sont entourés à la base par involucre en cupule à écailles toutes appliquées et identiques (Rameau *et al.*, 1989 et 2008) . Ils sont amers dans le Nord, doux et comestibles dans les régions Sud ; les arbres sont appelés généralement chênes ballotes. La fructification de l'espèce est annuelle (Octobre - Novembre - Décembre), elle débute vers l'âge de 12 ans, mais elle n'est suffisante et soutenue qu'à partir de 15 à 20 ans en conditions pionnières. Elle ne devient abondante qu'entre 50 et 100 ans (Boudy, 1952) (Figure 2).



Figure 2. Glands du chêne vert.

- **Bourgeon** : Le bourgeon du chêne vert est de petite taille arrondi ou ovoïde de couleur brun marron (Figure 3). Parfois plusieurs bourgeons peuvent être regroupés à l'extrémité des rameaux (Rameau *et al.*, 1989 et 2008).



Figure 3. Bourgeons du chêne vert.

- **Longévité** : Le chêne vert est une espèce qui a une durée de vie de 300 à 500 ans (Rameau *et al.*, 1989 et 2008) . Sa longévité moyenne est 200 à 250 ans dans les étages humides et 150 ans dans l'étage semi-aride et dans les conditions de sol défavorables. Sa viabilité physiologique est remarquable ; il repousse vigoureusement de souche et émet très longtemps des drageons des racines jusqu'à l'âge de 150 ou 200 ans selon les conditions du milieu.

3. Les caractères écologiques

3.1. Climat

Le chêne vert est une essence robuste, très plastique, qui s'accommode à différents types de climats. Il supporte autant les froids hivernaux que les grandes sécheresses estivales. En effet, le chêne vert peut supporter un indice xérothermique de 0 à 150.

Vis-à-vis de la température, le chêne vert supporte une variation de température minimale "m" allant de -3 à + 7°C, atteignant une valeur de -7°C au Maroc ; la limite inférieure extrême étant -15°C. Il résiste à des températures maximales (M) pouvant atteindre 42°C.

Quant aux précipitations, il admet une tranche pluviométrique variant de 384 à 1462 mm (Sauvage, 1961) ; mais il peut atteindre un minimum de 250 mm selon Barry et *al.* (1976). Le tri des espèces par le froid placerait le chêne zéen et le chêne vert en tête ; suivis en ordre décroissant par le pin d'Alep, l'alfa, le thuya et le chêne liège (Alcaraz, 1970).

Pour les précipitations, le classement serait le suivant : chêne zéen, chêne liège, chêne vert, oléastre et thuya (Sauvage, 1961).

Son aptitude à s'accommoder à des conditions climatiques variées permet aussi de couvrir plusieurs étages bioclimatiques semi-aride, sub-humide dans leurs variantes froides, fraîches et tempérées et même très froides au Maroc. Dans l'étage semi-aride, il représente le type xérophile de la chênaie verte, localisée en Algérie, dans les Aurès et les montagnes du sud Oranais. Mais c'est dans les étages sub-humide et humide qu'il connaît son plein développement en peuplant de vastes massifs forestiers surtout dans la partie occidentale de l'Algérie.

3.2. Facteurs édaphiques

Le chêne vert n'est pas exigeant, il s'accommode à divers substrats (Boudy, 1952; Quezel, 1976, 1979) siliceux ou calcaires et des sols superficiels ou profonds. Il se rencontre sur grès, calcaires, marno-calcaires, dolomies et schistes. Mais cet arbre fuit les substrats mobiles et les sols hydromorphes (Achhal, 1979). Il se rencontre entre 0 et 2000 m d'altitude bien que la majorité des forêts de *Quercus ilex* se trouvent à 400 et 1200m (Paton *et al.*, 2009).

4. Aire de répartition de chêne vert

Quercus ilex est une essence à vaste répartition, il est présent depuis la chine et l'Himalaya, jusqu'en Grande-Bretagne et aux confins des Sahara (Boudy, 1950). Mais selon certains auteurs, plusieurs espèces Asiatique à feuilles coriaces, toujours vertes. Xérophytes, avaient été confondues avec notre *Quercus ilex*.

Il est spontané dans une grande partie du bassin Méditerranéen. Il a une très large répartition dans le bassin Méditerranéen occidental et manque ou devient plus rare dans le bassin oriental et disparaît au-delà.

En Algérie, le chêne vert occupe une grande partie de la surface forestière algérienne. On le trouve partout sur l'Atlas Saharien comme sur l'Atlas Tellien où il forme de belles forêts en Kabylie et sur les monts de Tlemcen (Figure 4). Les plus importantes chênaies sont localisées en Oranie, en peuplement pur ou mélangé avec le pin d'Alep, dans la région de Tiaret, Freneda et Saida.



Figure 4. Aire de répartition du chêne vert en Algérie.

5. ravageurs et maladies (Ennemis)

5.1. Les facteurs entomologiques

Le chêne vert est très sensible à qui provoque la défoliation des chênes (Boudy, 1950). Le liparis (*Lymantria dispar*) papillon de nuit dont la chenille se nourrit de feuilles, il peut causer quelque fois de grandes invasions qui affaiblissent temporairement les peuplements. Il est sensible aussi à un bupreste (*Coerobus bifasciatus*), dont les galeries creusées dans le bois des charpentières se terminent par une double boucle circulaire: les branches atteintes dépérissent, sèchent sur pied et se brisent sous l'action du vent. Il y a un coléoptère du genre « *Balaninus* » qui attaque les glands des chênes.

5.2. Les facteurs fongiques

On distingue en général :

- *Polypors dryadens* : occasionne la pourriture blanche au pied des chênes (figure 8).
- *Microsphaera quercina* : Oïdium ou « blanc des chênes » ralentissant la croissance des feuilles et entravant l'élaboration chlorophyllienne.

6. Association végétale du chêne vert

Selon Boudy (1950), le chêne vert est du caractère xérophile. Il affecte deux faciès botaniques bien tranchés, le premier correspondant à l'étage semi-aride qui se présente sous forme d'une futaie claire, basse et xérophile et qui regroupe le genévrier de Phénicie, le genévrier oxycèdre, le chêne kermès (en Algérie seulement), le frêne dimorphe, le pistachier de l'Atlas et le térébinthe ainsi que le romarin, et le deuxième en étage subhumide et humide, se présente sous l'aspect de futaies denses et élevées avec le pin d'Alep, le pin maritime, l'érable de Montpellier, le caroubier, le merisier, les cistes ...etc.

II. Notion de télédétection

Le mot télédétection (en anglais « Remote Sensing ») concerne toutes les méthodes qui permettent d'étude à distance des objets ou de phénomènes. En outre, selon Samuel *et al.* (2009 ; 2010), la télédétection, dans son sens général, peut être définie comme : « L'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci » (Commission interministérielle de terminologie de la télédétection aérospatiale, France, 1988).

Le processus complet de captation et de capture de l'énergie électromagnétique émise ou réfléchi, de sa transformation et d'analyse, puis de sa mise en œuvre. La définition proposée par le Centre Canadien de Télédétection (CCT) permet de clarifier ce dernier point :

« La télédétection est une méthode pour collecter des informations sur la surface de la Terre sans entrer directement en touche avec elle grâce à l'acquisition des images. Le processus complet de captation et de capture de l'énergie électromagnétique émise ou réfléchi, de traitement et d'analyse des données, puis l'application de ces données est compris dans la surveillance à distance (Samuel *et al.*, 2009 ; 2010).

1. Histoire de la télédétection

D'après Kergomard (2012). L'histoire des techniques de la télédétection peut être découpée en cinq grandes époques :

- De 1856, date à laquelle, pour la première fois, un appareil photographique a été installé de façon fixe à bord d'un ballon, à la première guerre mondiale, se déroule l'époque des pionniers, pendant laquelle sont explorées les possibilités de la photographie aérienne verticale pour la cartographie ; les lois fondamentales de la stéréoscopie et de la photogrammétrie sont découvertes à la fin du XIX^e siècle.

- De la première guerre mondiale à la fin des années 50, la photographie aérienne devient un outil opérationnel pour la cartographie, la recherche pétrolière, la surveillance de la végétation. On assiste à un progrès continu de l'aviation, des appareils photographiques et des émulsions (couleur, infrarouge noir et blanc, infrarouge fausse couleur). Les méthodes de la photo-interprétation sont précisées et codifiées.

- La période qui commence en 1957 et s'achève en 1972 marque les débuts de l'exploration de l'Espace et prépare l'avènement de la télédétection actuelle. Le lancement des premiers satellites, puis de vaisseaux spatiaux habités à bord desquels sont embarqués des caméras, révèle l'intérêt de la télédétection depuis l'espace. Parallèlement, les radiomètres-imageurs sont mis au point et perfectionnés, de même que les premiers radars embarqués à bord d'avions. La première application opérationnelle de la télédétection spatiale apparaît dans les années 60 avec les satellites météorologiques de la série ESSA.

- Le lancement en 1972 du satellite ERTS (rebaptisé ensuite Landsat 1), premier satellite de télédétection des ressources terrestres, ouvre l'époque de la télédétection moderne. Le développement constant des capteurs et des méthodes de traitement des données numériques ouvre de plus en plus le champ des applications de la télédétection et en fait un instrument indispensable de gestion de la planète, et, de plus en plus, un outil économique.

- Depuis les années 70, on assiste à un développement continu de la télédétection, marqué notamment par l'augmentation de la résolution spatiale des capteurs et la diversification de ces derniers qui utilisent des domaines de plus en plus variés et spécialisés du spectre électromagnétique.

Dans les années 90, on assiste ainsi à la multiplication des satellites équipés de capteurs actifs, radars en particulier. Dans le domaine du rayonnement visible et infrarouge, les capteurs à très haute résolution spectrale sont aujourd'hui d'utilisation courante dans leur version aéroportée et font leur apparition à bord de satellites. La diffusion des données sur une base commerciale, envisagée dès le lancement du programme SPOT en 1986, se traduit aujourd'hui par le lancement de satellites de télédétection par des sociétés privées. Les données de télédétection deviennent l'objet d'un marché concurrentiel. La diffusion accélérée et l'augmentation de la puissance des ordinateurs contribuent de façon continue à promouvoir de nouvelles méthodes d'utilisation des données toujours plus abondantes que fournit la télédétection spatiale (Gueye, 2013).

2. Objectifs de la télédétection

- La télédétection permet la création d'images ou de photographies, qui peuvent être utilisées pour une variété d'applications et une meilleure gestion des ressources naturelles de notre planète (surveillance de l'environnement, agriculture et développement).

- La télédétection a fait connaître les immenses opportunités offertes par la reconnaissance à distance dans la connaissance de l'agriculture et de l'étude des paysages (Remil, 2006 ; Makrerougrass, 2016).

- On dispose là d'un nouvel outil de prospection qui peut être envisagé en termes de complémentarité ou de substitution à une enquête classique au même titre que les photographies aériennes. Actuellement l'imagerie satellite est devenue accessible en permettant une grande souplesse et un coût d'utilisation très positif.

3. Processus de la télédétection

On peut schématiser la télédétection comme un ensemble de sept étapes clés (Bul, 2008). Ces étapes couvrent le processus de la télédétection, du début à la fin (Figure 5).

- Source d'énergie ou d'illumination (A) : À l'origine de tout processus de télédétection se trouve nécessairement une source d'énergie pour illuminer la cible.

- Rayonnement et atmosphère (B) : Durant son parcours entre la source d'énergie et la cible, le rayonnement interagit avec l'atmosphère. 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.

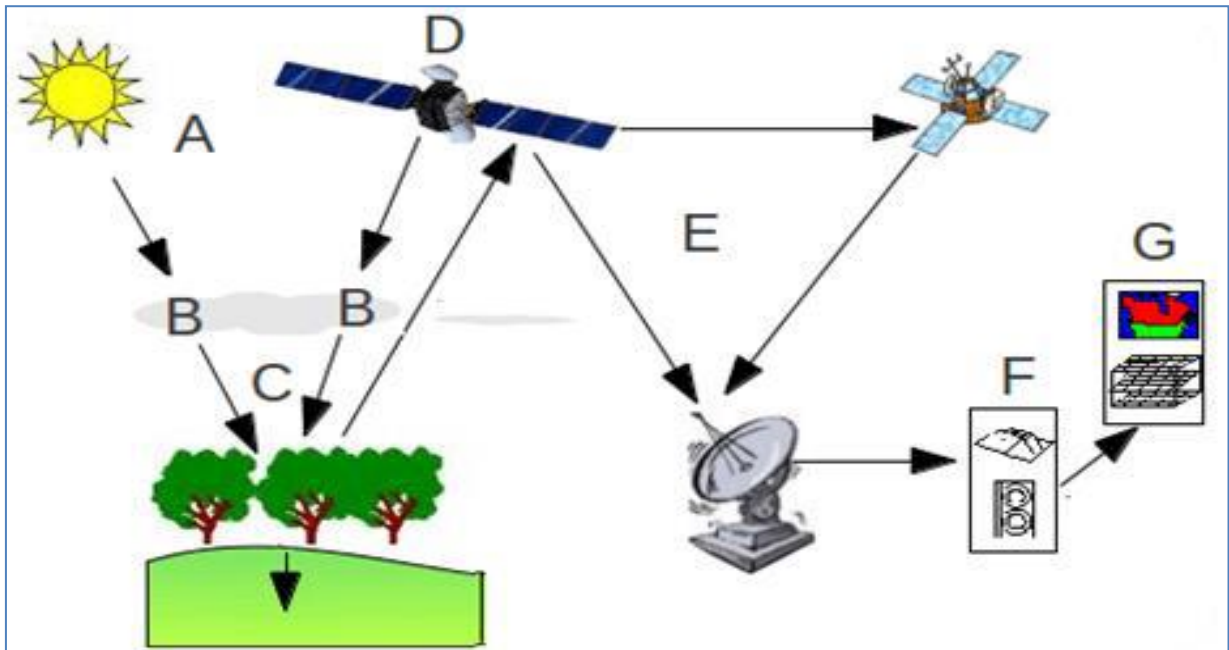


Figure 5. Les sept étapes du processus de télédétection selon (Bul, 2008) : (A) source d'énergie ; (B) atmosphère ; (C) cible ; (D) capteur ; (E) transmission, réception et traitement ; (F) interprétation et analyse ; (G) Application.

- 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, c'est-à-dire la portion d'espace étudiée (une ville, une zone inondée, une forêt, etc.) afin de nous en faire découvrir de nouveaux aspects ou pour aider à résoudre un problème particulier (Robin, 1995).

Les capteurs utilisés pour capter et enregistrer les rayonnements réfléchis sont embarqués à bord de vecteurs, le plus souvent les avions et les satellites, dont les caractéristiques les rendent souvent spécifiques à un domaine d'application donné. Ces capteurs sont généralement caractérisés à partir de quatre résolutions : spatiale, spectrale, radiométrique et temporelle (Robin, 1995 ; El Merabet, 2013).

4. Ondes et rayonnement électromagnétique

Selon la théorie corpusculaire de la lumière, le rayonnement électromagnétique peut être considéré comme étant un flux de particules élémentaires appelés photons. Selon la théorie ondulatoire, le rayonnement électromagnétique est composé de deux vecteurs champ électrique et magnétique perpendiculaires et se déplaçant à la vitesse de la lumière (Figure 6). Deux propriétés principales caractérisent une onde électromagnétique : sa longueur et sa fréquence. Une onde est caractérisée par deux champs étroitement liés : le champ électrique (E) et le champ magnétique (M). (C) étant la vitesse de la lumière. Source : Centre canadien de télédétection (CCT) (Randrianalisoa ; 2006).

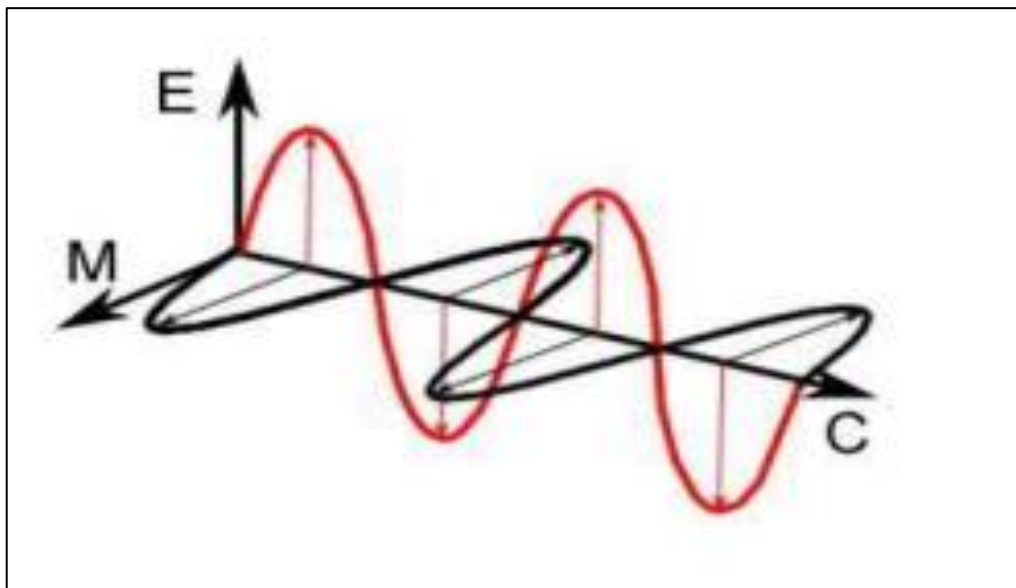


Figure 6. Schéma d'une onde électromagnétique

Le rayonnement électromagnétique se propage sous forme d'ondes à des fréquences (nombre d'oscillations effectué par unité de temps) et des longueurs d'onde (distance entre deux points homologues de l'onde) très variées qui dépendent principalement du milieu et des propriétés physico-chimiques des objets et en particulier de leur température. On peut donc avoir des rayonnements électromagnétiques qui transportent beaucoup d'énergie et d'autres moins. L'énergie transportée par le rayonnement électromagnétique est détectée par les capteurs utilisés en télédétection. Enfin, vu la gamme très étendue de fréquences et de longueurs d'onde, on a l'habitude de décomposer le rayonnement électromagnétique, c'est ce que l'on appelle le spectre électromagnétique (Joseph, 2022).

5. Spectre électromagnétique

Les spectres électromagnétiques sont classés en fonction de la fréquence et de la longueur d'onde. Les ondes électromagnétiques sont classées des plus courtes (ondes gamma, ondes X) aux plus longues (ondes microondes, ondes radio). Parce que l'atmosphère est transparente, seules certaines parties du spectre électromagnétique peuvent être utilisées pour la détection à distance (Figure 7): les ondes infrarouges, les ondes visibles (la seule partie du spectre qui peut être détectée par l'œil humain) et les ondes ultraviolettes (Samuel *et al.*, 2009 ; 2010).

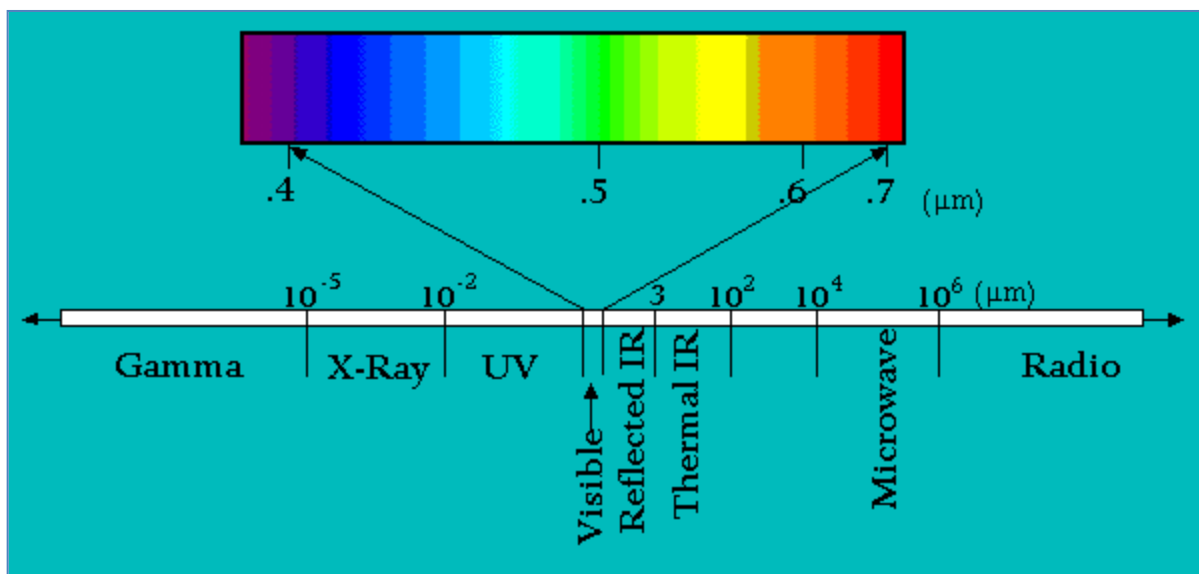


Figure 7. Spectre électromagnétique (Source : Site Internet European Space Agency : ESA).

6. Signatures spectrales

L'objet de la télédétection est de distinguer des types de surface (en vue de leur cartographie) ou d'en mesurer certaines caractéristiques, à partir du rayonnement reçu par le capteur.

Dans le domaine des grandes longueurs d'onde (infrarouge thermique et micro-ondes « passives »), ce sont la température et l'émissivité qui déterminent l'intensité du rayonnement émis par la surface. Dans le domaine de l'infrarouge thermique, l'émissivité des surfaces terrestres ou océaniques varie dans une gamme limitée :

- Surfaces d'eau et océan : $\approx 0,98$
- Neige et glace : 0,95 à 0,99
- Forêt : $\approx 0,90$
- Surfaces minérales : 0,85 à 0,95.

La radiométrie infrarouge peut donc être utilisée pour mesurer la température de la surface, avec une bonne approximation.

Dans le cas des radiomètres micro-ondes (capteurs passifs), les variations de l'émissivité sont beaucoup plus importantes : ce sont elles qui permettent de caractériser les différents types de surface, et constituent donc la « signature » propre à chaque type (Kergomard ; 1990).

En télédétection visible et infrarouge proche, les surfaces naturelles se caractérisent par de très importantes variations de la réflectance selon la longueur d'onde. La « signature spectrale » des surfaces correspond aux variations de la réflectance spectrale. Elle permet de distinguer entre eux les principaux types de surfaces terrestres (Figure 8) ou d'analyser plus finement les propriétés de ces surfaces.

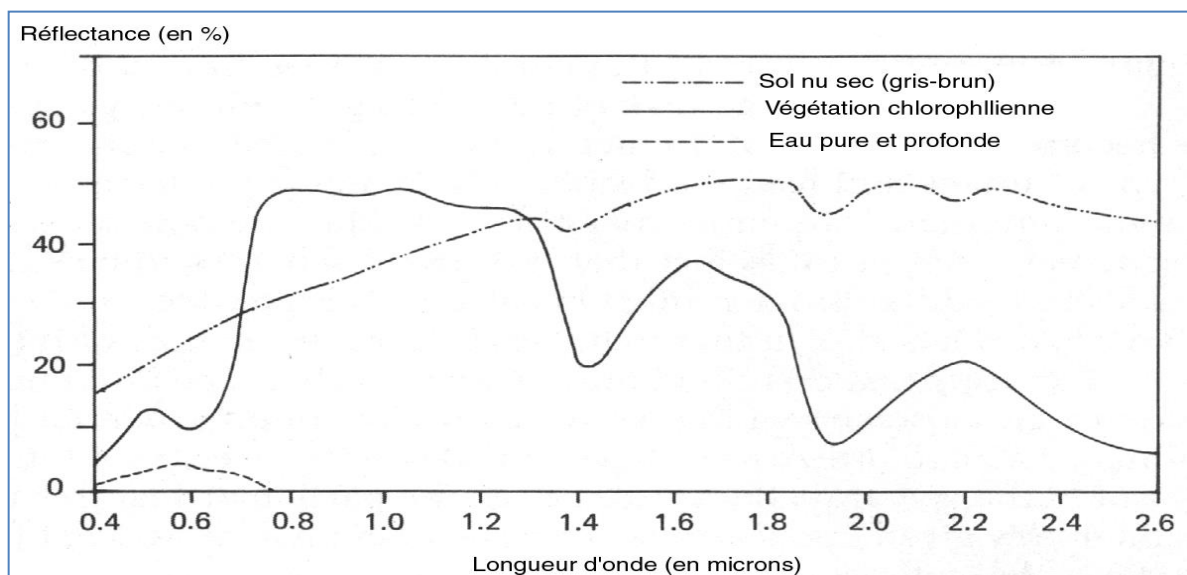


Figure 8. Réflectances spectrales caractéristiques de trois grands types de surfaces naturelles (Lillesand et Kiefer, 2015).

Il convient de ne pas confondre la réflectance spectrale des surfaces et leur albédo :

- L'albédo désigne la capacité de la surface de la Terre à réfléchir l'énergie reçue du soleil dans toute l'étendue du spectre solaire ; il a surtout son intérêt en climatologie.

- La réflectance spectrale correspond aux variations de la réflectance selon les longueurs d'onde du domaine solaire. Elle constitue une caractéristique des surfaces terrestres utilisée en télédétection dans le domaine spectral solaire (Lillesand et Kiefer, 2015).

Le principe de la radiométrie dans le domaine du spectre solaire est le même que celui de la perception des couleurs par l'œil humain : la végétation nous apparaît verte parce qu'elle réfléchit plus le rayonnement dans les longueurs d'onde comprises entre 0,49 μm et 0,58 μm , c'est à dire dans la partie du spectre correspondant au vert que dans les autres longueurs

d'onde du visible. Les radiomètres enregistrent le rayonnement réfléchi dans diverses bandes spectrales dans le visible ou l'infrarouge, choisies de façon à distinguer au mieux les types de surface, où à analyser certaines propriétés des surfaces. Ainsi en télédétection, la végétation est généralement distinguée par sa très faible réflectance dans les longueurs d'onde correspondant au rouge (0,6 à 0,7 μm) et sa réflectance élevée dans le proche infrarouge.

Pour un type de surface donné (par exemple la mer), la réflectance spectrale varie parfois sensiblement en fonction de propriétés de la surface qui peuvent être quantifiées. On utilise ainsi des radiomètres spécialisés, mesurant de façon très précise la réflectance spectrale de la mer dans le domaine du visible.

Pour identifier avec précision les types de surface, il est souvent utile de comparer les données de télédétection (obtenues à partir du satellite ou de l'avion) avec des mesures radiométriques effectuées sur le terrain ou en laboratoire. Mais une comparaison rigoureuse entre les deux types de données nécessite la prise en compte des effets de l'atmosphère qui s'interpose entre la surface et le capteur (Kergomard,1990 ; Ramy, 2012).

7. Intérêt de la télédétection dans la cartographie de la végétation

La télédétection c'est avéré être un outil très approprié pour étudier le fonctionnement et la surveillance de l'évolution des plantes. Avec l'aide des satellites, il est vraiment possible de tracer la couverture végétale sur une variété de temps et de dimensions de l'espace (Abdelbaki, 2012). D'après Meneses-Tovar (2011), l'utilisation de la télédétection dans la cartographie de la végétation est facilitée par les avantages qu'elle présente :

- La rapidité et répétitivité d'acquisition des données : Cela nous permet de choisir la scène la plus représentative et la moins bruyante. Cette répétition permet également de voir les changements et l'évolution des divers phénomènes au fil du temps.

- La forme numérique des données : Il offre un grand avantage du traitement numérique par plusieurs logiciels de traitement d'images et facilite le travail du cartographe.

- Le caractère multi-bandes des données : La séparation de chaque bande (image) facilite la sélection des informations nécessaires, à la fois en sélectionnant directement une bande ou en appliquant une fonction à plusieurs bandes.

8. Principe de la télédétection

Cette méthode d'acquisition généralement utilise la mesure des ondes électromagnétiques émises ou réfléchies des objets étudiés dans une certaine gamme de fréquences (infrarouge, visible, micro-ondes...etc.). Ceci est rendu possible par le fait que les objets étudiés (plantes, maisons, surfaces d'eau...etc.) émettent ou réfléchissent du

rayonnement à différentes longueurs d'onde et intensités selon leur état (Brenner, 2007 ; Belorizky et Pique, 2022). D'après El Kharki (2011) et Benyamina (2013), la télédétection est une technique qui nous permet d'acquérir de l'information utile sur une cible au sol, par l'intermédiaire de l'analyse et de l'interprétation des images recueillies à partir de plateformes, par exemple un satellite, qui n'est pas en contact direct avec la cible étudiée.

Les caractéristiques physiques des objets observés sont utilisées pour la détection à distance, en particulier leurs caractéristiques optiques d'émission et/ou de réflexion d'énergie électromagnétique. Ces rayonnements, d'origine naturelle ou artificielle, existe pour une gamme très étendue de fréquences ou de longueurs d'onde de 10-9m à 105m, qui constitue le spectre électromagnétique (Kergomard, 2003 ; Benyamina, 2013). Les sources du rayonnement varient également selon le domaine du spectre (Figure 9):

- Le rayonnement ultraviolet, visible ou infrarouge est émis par les corps, objets ou surfaces en fonction de leur température : rayonnement solaire (U.V., visible et proche infrarouge), rayonnement terrestre (infrarouge thermique).

- Les rayonnements de très courte longueur d'onde (rayons gamma, rayons X) sont produits par les restructurations des noyaux des atomes (radioactivité).

- Les rayonnements visibles, infrarouge ou microonde peuvent être produits artificiellement par vibration ou rotation des molécules (fluorescence, lasers, four à microondes).

- Les rayonnements de grande longueur d'onde sont produits par des oscillations électroniques (antennes).

L'acquisition de l'information se fait grâce à un système d'observation (Figure 9), qui reçoit ce rayonnement et le traduit en éléments perceptibles par l'utilisateur (Bonn et Rochon, 1992 ; Ducrot, 2012).

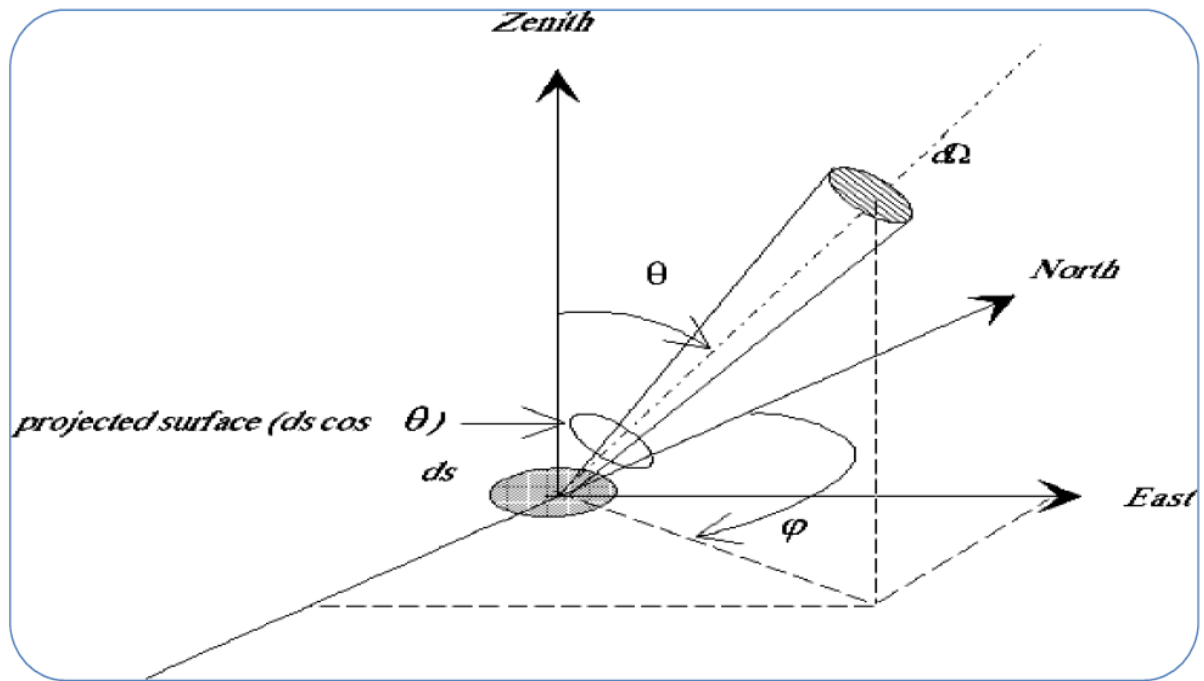


Figure 9. Luminance émise par une unité de surface (ds) et dans une portion d'angle solide dans l'espace ($d\Omega$) est sous la dépendance des angles de visée dans le plan (angle azimutal ϕ) et par rapport à la verticale (angle zénithal Θ).

9. Propriétés optiques et télédétection des couverts végétaux

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, indice foliaire LAI (Baghdadi & Zribi, 2017), photosynthèse et évapotranspiration, biomasse, productivité des systèmes agricoles, phénologie forestière, coupes et régénération, défoliation foliaire et dépérissement des couverts forestiers (Cyr et Pesant, 1995 ; Guyot, 1989 ; Soudani, 2005).

La télédétection des couverts forestiers pose des problèmes particuliers liés à l'hétérogénéité du milieu. En télédétection passive optique, les propriétés optiques d'un couvert forestier résultent des effets de ses différentes composantes, photosynthétiques et corticales (branches et troncs), et du sol sous-jacent, couvert ou non par une végétation herbacée. En télédétection active en hyperfréquences, le signal radar rétrodiffusé (réfléchi dans la direction de l'antenne de réception) est essentiellement conditionné par les propriétés géométriques et la teneur en eau du couvert et du sol (CCT, 2002).

Le comportement spectral d'un couvert végétal est la résultante de la contribution de la végétation et du sol sous-jacent qui, dans le cas des forêts, peut être couvert ou non par une végétation herbacée. La contribution du sol dans la radiométrie d'un pixel dépend essentiellement du taux du couvert et de l'épaisseur de la couche végétale qui le couvre. Ces

deux caractéristiques structurales du couvert peuvent être exprimées, respectivement, par le degré d'ouverture du couvert et l'indice foliaire.

Le développement du couvert s'accompagne d'une augmentation de la réflectance dans le proche infrarouge et une diminution dans le rouge (Figure 8.). Ces évolutions s'atténuent à mesure que la végétation devient couvrante et épaisse. La réflectance se stabilise à un niveau correspondant à un seuil de saturation qui dépend de la bande spectrale considérée. Ainsi, dans le proche infrarouge, les feuilles sont plus transparentes au rayonnement et le niveau de saturation est atteint pour une végétation plus dense que dans le rouge. Ensuite la phase de sénescence ramène les propriétés de la réflectance vers des valeurs qui caractérisent essentiellement le sol (Joseph, 2022).

Les études réalisées ne s'accordent pas sur une valeur d'indice foliaire pouvant provoquer cette saturation. En effet, d'autres facteurs, en particulier l'organisation spatiale et les propriétés géométriques du couvert végétal, sont déterminants. Ces facteurs influencent la distribution des zones d'ombre et de lumière dans le couvert et la contribution du sol. Pour des couverts organisés en lignes, tels que les jeunes plantations de pin, la réflectance dépend de l'orientation des rangs par rapport aux rayons lumineux. Les proportions des zones d'ombre varient selon que les rayons lumineux sont parallèles ou perpendiculaires aux rangs. L'ampleur des effets de rangs sur le comportement optique du couvert dépend de la bande spectrale et du taux de couverture. Ces effets sont légèrement plus importants dans la bande visible que dans le proche infrarouge pour laquelle la végétation est plus transparente (Guyot, 1989). Un autre facteur important est la distribution des angles foliaires dont dépend fortement la contribution du sol. Pour un même indice foliaire, une distribution foliaire érectophile (feuilles majoritairement érigées) a pour effet d'augmenter la contribution du sol dans la réflectance du couvert. Dans le visible, le sol est généralement plus réfléchissant que la végétation, l'augmentation de sa contribution se traduit par une augmentation de la réflectance de l'ensemble du couvert. Dans le proche infrarouge, la tendance est inversée.

10. Indices de végétation

Sur une image de télédétection, les données radiométriques sont appelées comptes numériques (CN) car elles sont exprimées en niveaux de gris allant de 0 à 255 (image dite en 8 bits). Ces comptes numériques peuvent être transformés en luminance L (en $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$) ou en réflectances ρ (en % du rayonnement incident). Le passage des comptes numériques aux luminances et aux réflectances est une opération souvent compliquée car elle nécessite l'emploi d'équations de calibration propres au capteur et de modèles de corrections atmosphériques.

Les données radiométriques peuvent être utilisées sous forme de canaux bruts ou d'indices combinant les canaux rouge et proche infrarouge, respectivement *XS2* et *XS3* du satellite *SPOT*, *TM3* et *TM4* du satellite *LANDSAT Thematic Mapper*, canaux 1 et 2 du satellite *NOAA-AVHRR*. Ces indices sont mathématiquement exprimés de manière à utiliser le contraste important entre ces deux bandes. Ce contraste résulte de la forte absorption du rayonnement dans le rouge et de la forte réflectance dans le proche infrarouge.

La complexité structurale des couverts et la multitude des facteurs externes perturbateurs (géométrie de visée et élévation solaire, effets atmosphériques et propriétés optiques du sol) sont à l'origine de la multiplicité des indices. Ils sont classés en deux catégories (Baret et Guyot, 1991 ; Goel et Quin, 1994):

- Indices caractérisés par une pente : RVI (Ratio Vegetation Index), NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), TSAVI (Transformed Soil Adjusted Vegetation Index), etc.

- Indices caractérisés par une distance : WdVI (Weighted Difference Vegetation Index), PVI (Perpendicular Vegetation Index).

Ces différents indices correspondent généralement à des relations géométriques dans le plan rouge / proche infrarouge. Bien que mathématiquement différents, certains indices véhiculent les mêmes informations spectrales et discriminent de manière équivalente les couverts végétaux.

Ces deux indices contiennent les mêmes informations spectrales. Le DVI est très rarement utilisé, car il ne présente pas les avantages de NDVI et de RVI. Le rapport entre canaux permet de minimiser les effets de conditions d'éclairement et de la géométrie de visée, les effets atmosphériques et les erreurs de calibration (Baret et Guyot, 1991 ; Bonn et Rochon, 1992). Bien qu'il ne soit pas toujours approprié, le NDVI est de loin l'indice de végétation le plus utilisé.

Sur l'image NDVI, les espèces feuillues apparaissent dans des teintes claires et correspondent à des fortes valeurs de l'indice NDVI (0,6-0,7 en moyenne). Les résineux apparaissent dans des teintes plus foncées (0,4-0,5 en moyenne). Les sols nus et les surfaces d'eau libre apparaissent dans des teintes très foncées et correspondent à des valeurs de l'indice faibles ou négatives (Sellers, 1985).



Chapitre II :
Matériel et méthodes

I. Présentation de la zone d'étude

1. Situation de la forêt de Chettaba

La forêt domaniale de Chettaba appartient au bassin versant Kebir Rhumel, elle est située au Sud- Ouest de Constantine, au Sud d'Ibn Ziad, au Nord d'Ain Smara et à l'Est de Oued Athmania. La zone d'étude se trouve sur la carte topographique de Constantine Echelle 1/ 200.000 feuille N° 17 et plus ou moins localisée entre les coordonnées 36° 18', 36° 21' latitude Nord et 6° 26', 6° 30' longitude Est (Figure 10).

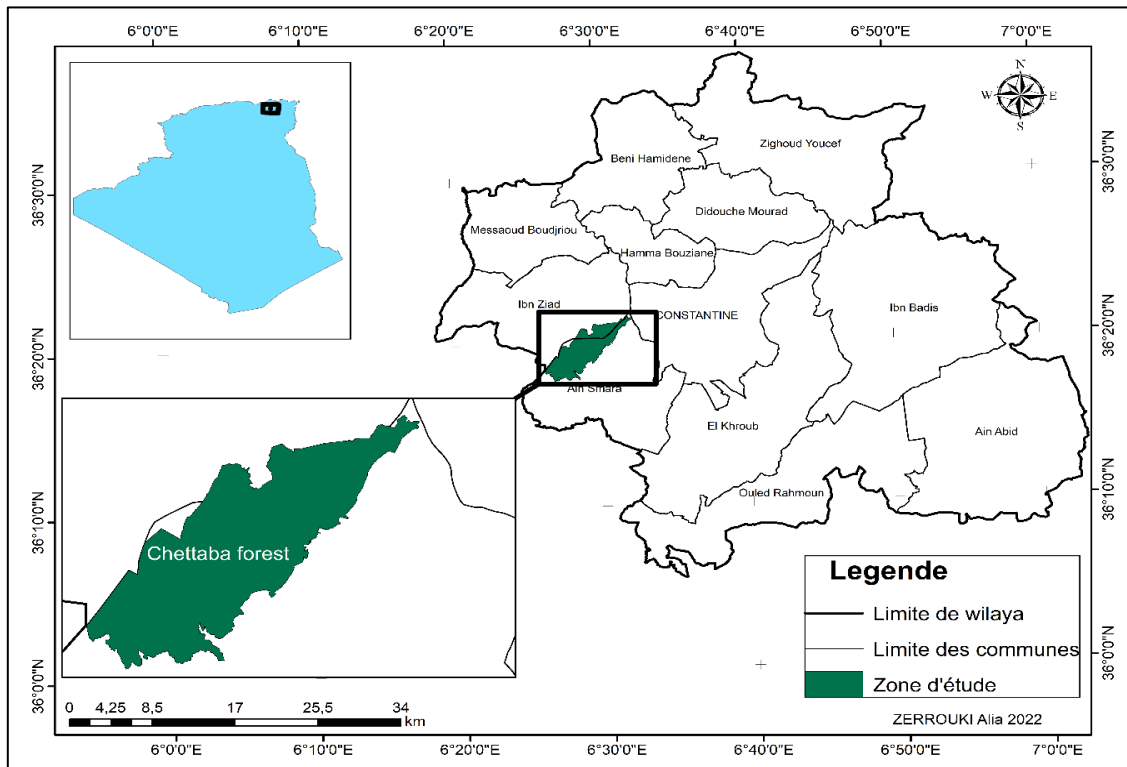


Figure 10. Situation géographique de la forêt de Chettaba (Zerrouki *et al.*, 2023).

D'une manière générale, la zone d'étude est caractérisée par un relief très accidenté sillonné par plusieurs thalwegs à régime saisonnier et répartis sur l'ensemble de la forêt, avec la présence de nombreuses lignes de crêtes. Ceci a permis l'abondance de fortes pentes, réparties en trois classes variant de 3 % à 50 %.

Les altitudes extrêmes de la forêt sont d'environ 1104 m (altitude maximale) et 652 m (altitude minimale), correspondant chacune d'elle respectivement aux coordonnées cartographiques suivantes : (X =839, Y = 344), (X'= 839,9, Y' = 340,3).

Quant aux expositions, et d'après le tableau 1, on peut dire que l'exposition la plus dominante est celle de l'Est avec une superficie de 390 ha soit 27,85 % (Tableau 1).

Tableau 1. Tableau des expositions (Source : Mansouria *et al.*, 1981)

Expositions	N	S	W	E	N-E	N-W	S-E	S-W	Total
Surfaces (ha)	230	134	338	390	49	35	73	111	1410
Pourcentages (%)	16.32	13.05	23.97	27.89	3.33	2.48	5.17	7.87	100

Malgré l'importance du réseau hydrographique qui caractérise la forêt domaniale de Chettaba, les sources d'eau permanentes restent toujours insuffisantes voire même inexistantes, avec une seule permanente (X1 = 838,7 ; Y1 = 343, 1) et deux autres temporaires (X2 = 837,4 ; Y2 = 341,25) (X3 = 839,7 ; Y3 = 344,3), en plus de plusieurs thalwegs (Chaâbats) à régime temporaire.

2. Géologie et écologie de Chettaba

Pour l'étude géologique du massif forestier, nous nous sommes basés sur une série de documents, de cartes d'état major et d'inspection effectuée sur les lieux. Dans le lieu d'étude, on rencontre trois substrats :

- Calcaire siliceux à inocerames
- Marnes noires à débit en plaquettes
- Argile et calcaire à myophorie parfois gypseuse

On peut dire que la zone est formée essentiellement, de roches sédimentaires composées surtout de sédiments tendres (schistes et marnes) et de sédiments rigoureux (calcaire et grés).

Le climat joue un rôle prépondérant dans le développement, la répartition et l'individualisation des êtres vivants (Ramade, 1984). L'objectif de cette étude est de caractériser les conditions climatiques et bioclimatiques dans la quelle la végétation s'évolue.

Décrire le climat d'une région, c'est donner les moyennes des températures, des précipitations, et leur évolution au cours de l'année. La description s'affine avec les moyennes d'humidité de l'air et vitesse du vent.

Le climat est caractérisé par deux principaux éléments à savoir la température et la pluviométrie, ils servent à élaborer les courbes ombrothermiques de Gaussen et Bagnouls (1953), le diagramme d'Emberger (1955) ou celui de Sauvage (1963), à partir desquels seront dégagées les caractéristiques climatiques de la forêt. Les précipitations annuelles moyennes sont estimées

entre 670 et 800 mm et la température annuelle moyenne est de 18 °C, avec une moyenne du mois le plus chaud supérieure à 35 °C et le mois le plus froid varie entre 1,25 et 3,05 °C (Zerrouki *et al.*, 2023).

II. Approche méthodologique

1. Données utilisées

Les images satellites sont un outil important pour cartographier l'évolution de la végétation et pour la planification et la gestion des ressources. Elles contiennent des informations nutritionnelles et spectrales, beaucoup plus importantes que les autres sources d'information, qui permettent de caractériser les objets dans une large bande spectrale (Pouchin, 2001).

1.1. Images Satellitaires LANDSAT

Le satellite Landsat de l'Agence Spatiale Américaine (NASA) évolue à une altitude moyenne de 705 Km sur des orbites circulaires quasi polaires caractérisées par une inclinaison de 98,2° (Journaux, 2006).

Dans cette étude de l'évolution spatio-temporelle de la végétation dans la forêt de Chettaba, nous avons travaillé 24 images satellitaires multi-spectrales LANDSAT géoréférencées avec un taux faible de nébulosité (couverture nuageuse). Toutes les images sont prises sur 12 mois de l'année.

Ces images sont issues de deux types de capteurs LANDSAT :

- TM 5 (Thematic Mapper) (Photo 1).
- Landsat 7 (source NASA) (photo 2)

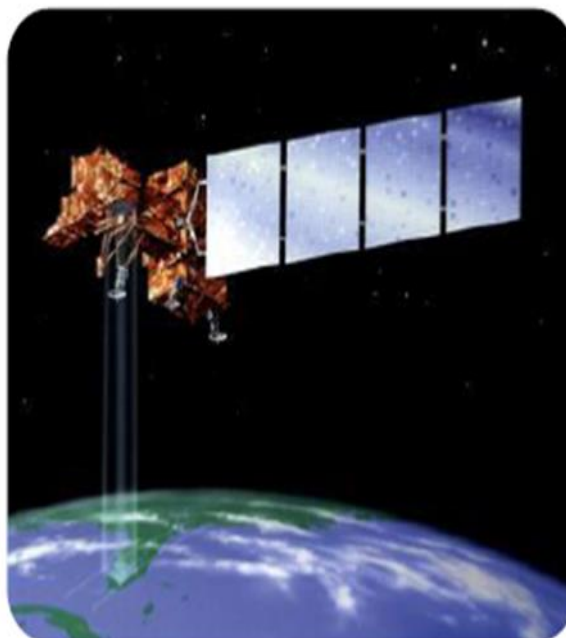


Photo 1. LANDSAT TM 5



Photo 2. LANDSAT 8 OLI/TIRS

Le satellite LANDSAT TM 5 a été lancé en 1984. Il a un angle d'inclinaison de $98,3^\circ$ et une période de 98,5 minutes, effectuent de 14 à 15 révolutions par jour avec des distances à l'équateur, entre deux traces consécutives de 2,752 km, et recouvrent la même trace tous les 16 jours. Le capteur TM (Thematic Mapper) ou en français "Cartographie thématique" de Landsat 5 se caractérise par un grand nombre de bandes spectrales et offre une bonne résolution au sol. Les scènes TM couvrent chacune une surface de 172 x 185 Km (Hamdi et *al.*, 2020). Le capteur TM à bord du satellite Landsat 5 produit des images constituées de 7 bandes multi-spectrales (Tableau 2) :

- trois bandes visibles (bande 1 : bleu, bande 2 : verte, bande 3 : rouge) ;
- une bande proche infrarouge (bande 4) ;
- deux bandes moyennes infrarouges (bandes 5 et 7) ;
- une bande infrarouge thermique (bande 6).

Les bandes de 1 à 5 et 7 ont une résolution spatiale de 30 mètres, alors que pour la bande 6 elle est de 120 mètres (CCT, 2008).

Tableau 2. Caractéristiques des bandes spectrales de LANDSAT 5 TM.

Bandes	Domaine spectral (µm)	Résolution	Application
TM1	0.45-0.52 (Bleu)	30m	Différenciation sol/végétation zones côtières
TM2	0.52-0.60 (Vert)	30m	Végétation
TM3	0.63-0.69 (Rouge)	30m	Différenciation des espèces végétales
TM4	0.76-0.90 (Proche IR)	30m	Biomasse
TM5	1.55-1.75	30m	Différenciation neige/nuage
TM6	10.4-12.5	120m	Thermique
TM7	2.08-2.35	30m	Lithologie

LANDSAT 8 OLI offre une image de neuf bandes spectrales avec une résolution spatiale de 30 mètre pour les bandes de 1 à 7 et 9, la bande 8 (panchromatique) à une résolution spatiale de 15 mètre (Tableau 2). Deux nouvelles bandes sont offertes par le capteur OLI, la bande 1 utile pour les études des aérosols et la cartographie côtière. Et la bande 09 utile pour les études des cirrus et des nuages (Tableau 3).

Tableau 3. Caractéristiques des bandes spectrales de LANDSAT 8 OLI.

Bandes	Domaine spectral (µm)	Résolution (m)	Application
1	0,433-0,453	30	Aérosols, zones côtières
2	0,45-0,515 (bleu)	30	Pigment, référencement sol/végétaux, zones côtière
3	0,525-0,600 (vert)	30	Pigments, zones côtière
4	0,630-0,680 (rouge)	30	Pigments, zones côtière
5	0,845-0,855 (proche IR)	30	Différenciation neige/nuage
6	1,560-1,660	30	Thermique
7	2,100-2,300	30	Lithologie
8	0,500-0,680	15	Cirrus et nuages
9	1.300-1.390	30	Feuillage
10	10.6-11.2	100	Thermique
11	11,5-12,5	100	Thermique

1.2. Données géographiques

Nous avons travaillé sur 8 Parcelles de chêne vert géoréférencés.

2. Outils de travail

Dans cette section, nous présenterons les outils de traitement des données recueillies, qui sont principalement des logiciels de traitement d'images numériques et de systèmes d'information géographiques.

2.1. Logiciel ArcGIS

La gamme de produits ArcGIS a été conçue pour s'adapter à ces besoins en constante évolution et proposer une plateforme SIG complète et évolutive. ArcGIS propose une structure évolutive permettant la mise en œuvre du SIG pour un seul utilisateur ou de nombreux utilisateurs sur des postes bureautiques, des serveurs, sur Internet et sur le terrain. ArcGIS 10.8 permet d'élaborer un système d'information géographique complet grâce à un ensemble intégré de logiciels SIG. Il est constitué des éléments suivants : ArcGIS Desktop : une suite intégrée d'applications SIG professionnelles.

ArcGIS est une suite de logiciels d'information géographique (ou SIG) développé par la société américaine d'ESRI (Environmental Systems Research Institute), qui permet de visualiser, d'interroger, d'analyser et de mettre en page les données géographiques. Il fournit des outils interactifs pour explorer, sélectionner, afficher, éditer, analyser, symboliser et classifier les données ou pour créer automatiquement, mettre à jour ou gérer les cartes et les métadonnées afin de répondre à une problématique donnée (Ouamara, 2013). La version 10.8 d'ArcGIS a été utilisée lors de cette étude pour:

- l'assemblage des bandes spectrales,
- l'habillage et l'édition des cartes,
- l'analyse de quelques données statistiques,
- le découpage de notre zone d'étude,
- l'extraction des points d'étude,
- le calcul et la classification du NDVI des images satellitaires.

3. Étude diachronique de l'évolution de la végétation

Pour étudier l'évolution du couvert végétal dans la forêt de Chettaba et par la suite l'édition des cartes thématiques, nous avons adopté une méthodologie qui s'appuie sur les traitements des images satellitaires (Figure 11). Cette méthodologie a été utilisée par plusieurs auteurs dans la réalisation de leurs études spatio-temporelles.

L'organigramme ci-dessous retrace les différentes étapes d'analyse et de traitement réalisées dans cette étude

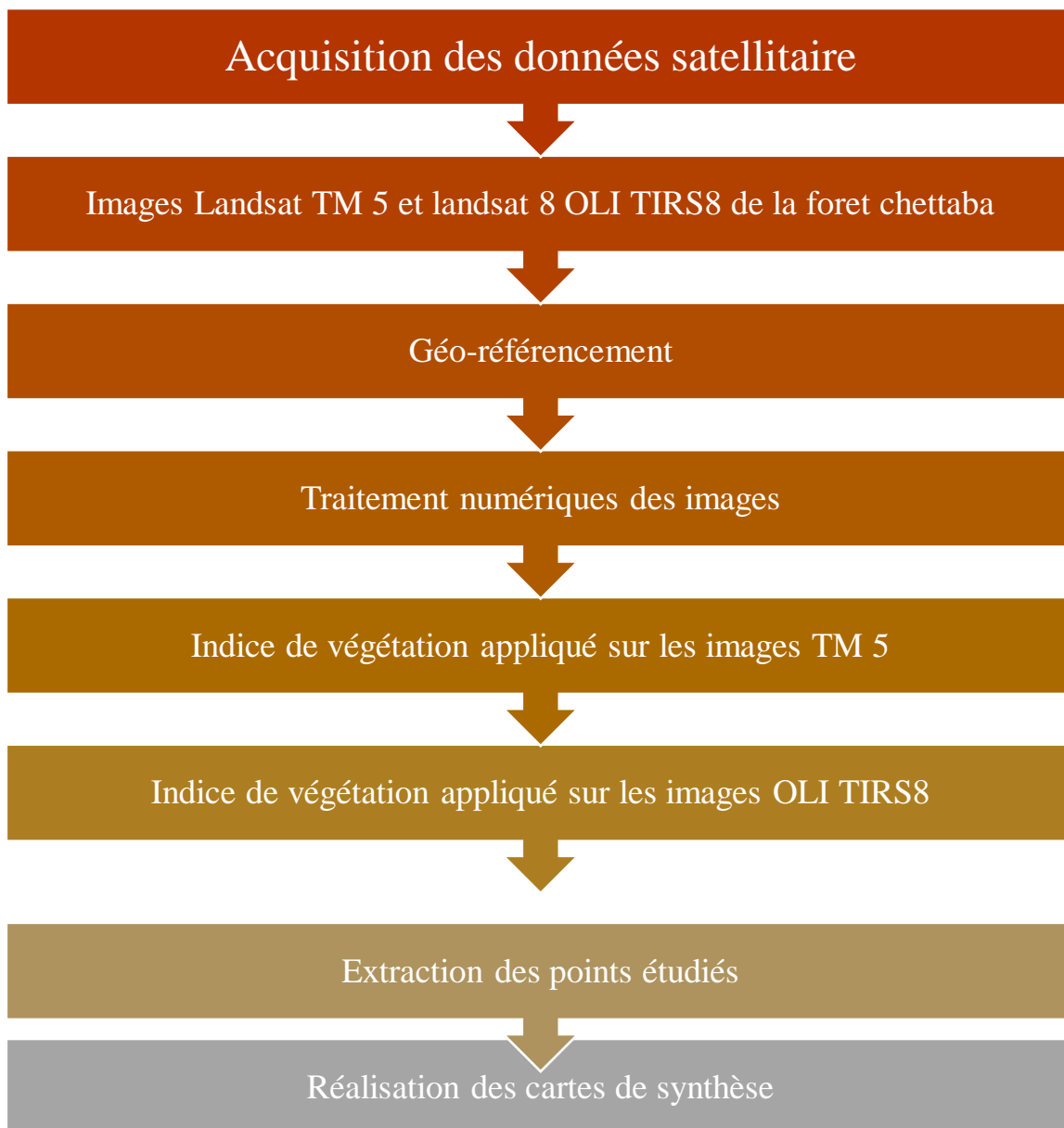


Figure 11. Méthodologie suivie dans l'étude de traitement des données satellitaires.

3.1. Acquisition des images satellitaire

On a pu obtenir des images satellitaires de la forêt de Chettaba grâce au programme Landsat, supervisé par les Études Géologiques des États-Unis (USGS) et la National Aeronautics and Space Administration (NASA). Il y a plus des millions d'images dans ce grand répertoire (Learn ArcGIS), qui sont toutes accessibles au public pour être téléchargées.

LANDSAT a été choisi parmi les différents types de capteurs disponibles dans le spectre visible et proche infrarouge pour deux raisons. La première est que les données de LANDSAT sont disponibles gratuitement sur le site Web de l'USGS, une agence gouvernementale américaine dédiée aux sciences de l'environnement. La deuxième est le plus ancien des programmes d'observation de la terre, disposant ainsi d'une importante archive d'images sur une longue période (plus de 30 ans).

3.2. Sélection des dates des images

Il est essentiel de choisir la date appropriée pour prendre des photos pour toute étude diachronique de la faune, car les conditions du champ varient considérablement selon les saisons de l'année, nous avons opté pour la saison sèche (de mai à août), car la majorité des formations comme le cèdre et le chêne vert durant cette saison présente une quantité de biomasse verte (activité chlorophyllienne) très élevée).

De plus, durant la saison sèche, le taux de couverture nuageuse (nébulosité) est le plus faible, rendant ainsi possible l'acquisition d'image sans nuage.

3.3. Géoréférencement

Les images satellitaires téléchargées ont été importées en changeant les coordonnées projetées par les coordonnées géographiques du système international WGS 1984.

3.4. Traitement des images

Nous devons apporter les ajustements nécessaires à chaque image avant de commencer notre travail. La première correspond à l'élimination de la zone de travail sur chaque image des dates choisies afin de pouvoir les superposer.

3.5. Calcul de l'indice de végétation NDVI

Nous avons choisi l'indice de végétation par différence normalisée (Normalised Difference Vegetation Index : NDVI) qui est le plus ancien et le plus utilisé des indices de

végétation. Il permet de mesurer l'activité physiologique des plantes chlorophyllienne et la discrimination de la végétation.

Le NDVI est établi en soustrayant au canal infrarouge (où la couverture végétale a de fortes réflectances) le canal rouge (où les surfaces minérales ont de fortes réflectances). Le néo-canal résultant présente un gradient croissant d'activité végétale allant du noir (absence de couverture) au blanc (activité chlorophyllienne très élevée). Le NDVI est calculé à partir des bandes spectrales rouges (R) et proches infrarouge (PIR) selon l'équation suivante :

$$NDVI = (PIR - R)/(PIR + R)$$

Cet indice est sensible à la vigueur et à la densité de la végétation.

Le résultat d'un NDVI prend la forme d'une nouvelle image, la valeur de chaque pixel étant comprise entre -1 et +1. Les valeurs négatives correspondant aux surfaces autres que les couverts végétaux, comme l'eau, le bâti et les nuages pour lesquelles la réflectance dans le rouge est supérieure à celle du proche infrarouge. Pour les sols nus, les réflectances étant à peu près du même ordre de grandeur dans le rouge et le proche infrarouge, le NDVI présente des valeurs proches de 0. Les formations végétales quant à elles, ont des valeurs positives, généralement comprises entre 0,2 et 0,8. Les valeurs les plus élevées correspondant aux couverts les plus denses (couvert végétal maximal) (Sellers, 1985). C'est l'analyse de la palette de nuances s'étendant entre ces valeurs extrêmes (très peu fréquentes) qui renseigne l'observateur sur la densité du couvert végétal et la quantité de biomasse verte

Pour écarter l'hypothèse selon laquelle l'évolution générale de la végétation pourrait être masquée par des conditions climatiques particulières précédant les prises de vue, nous avons examiné les précipitations et les températures sur la période allant de 2011 à 2021

3.6. Détection visuelle du changement

Après la classification des valeurs NDVI obtenues, la détection visuelle du changement entre les différentes dates choisies est effectuée. Cette méthode permet la détection visuelle des changements de classe les plus mineurs entre des images classées à différentes dates.

Les photos obtenues montrent les changements importants de la faune qui ont eu lieu au fil du temps dans la zone de recherche, tant sur le plan spatial que quantitatif. Ces changements peuvent être une progression, une régression ou une stabilité du couvert végétal.

3.7. Réalisation des cartes de synthèses

La dernière étape consiste à créer des cartes synthétiques des changements de la végétation au fil du temps. Les graphiques complètent les résultats en fournissant des détails sur les zones de régression, de progression et de stabilité de la végétation au niveau de la forêt de Chettaba.



Chapitre III :
Résultats et discussion

Résultats et discussion

Pour évaluer la dispersion des valeurs NDVI du chêne vert de la forêt de Chettaba, des cartes de variation et de synthèse ont été créées à partir des images satellitaires. Pour chaque année, nous avons utilisé 24 images de Landsat de la période 2011 - 2021. Les dates de prise de vue ont été prises deux fois par mois selon les émissions de satellite. Les étapes pour l'estimation de l'IDVI sont :

- Acquisition des images : Obtenez des images satellitaires ou aériennes pour les années 2011 et 2021 qui couvrent la zone de la forêt de Chettaba. Nous nous assurons que les images sont de résolution spatiale adéquate pour capturer les détails du couvert végétal.

- Prétraitement des images : Appliquez les corrections atmosphériques aux images pour éliminer les effets atmosphériques indésirables. Cela améliorera la qualité des données et la comparabilité entre les images des deux années.

- Calcul des indices de végétation : Utilisation des bandes spectrales appropriées (telles que le rouge et le proche infrarouge) des images pour calculer les indices de végétation tels que le NDVI pour chaque année. Cela permettra de quantifier la vigueur et la densité du couvert végétal.

- Comparaison des indices de végétation : comparaison des valeurs des indices de végétation entre les années 2011 et 2021 pour évaluer les changements dans le couvert végétal. Nous pouvons visualiser les différences spatiales à l'aide de cartes ou générer des graphiques pour représenter les tendances au fil du temps.

- Utilisation des méthodes statistiques pour analyser les changements détectés. Nous pouvons effectuer des analyses de régression pour évaluer les tendances linéaires, ou utiliser des tests de comparaison pour évaluer la significativité des changements observés.

En combinant ces étapes, pour obtenir une évaluation des changements du couvert végétal dans la forêt de Chettaba entre les années 2011 et 2021 en utilisant la télédétection.

1. Variabilité temporelle

Dans cette section, on considère que l'NDVI est invariable temporellement. La figure 12 montre la variabilité intra-annuelle de cet indice pour le chêne vert de 2011 à 2021.

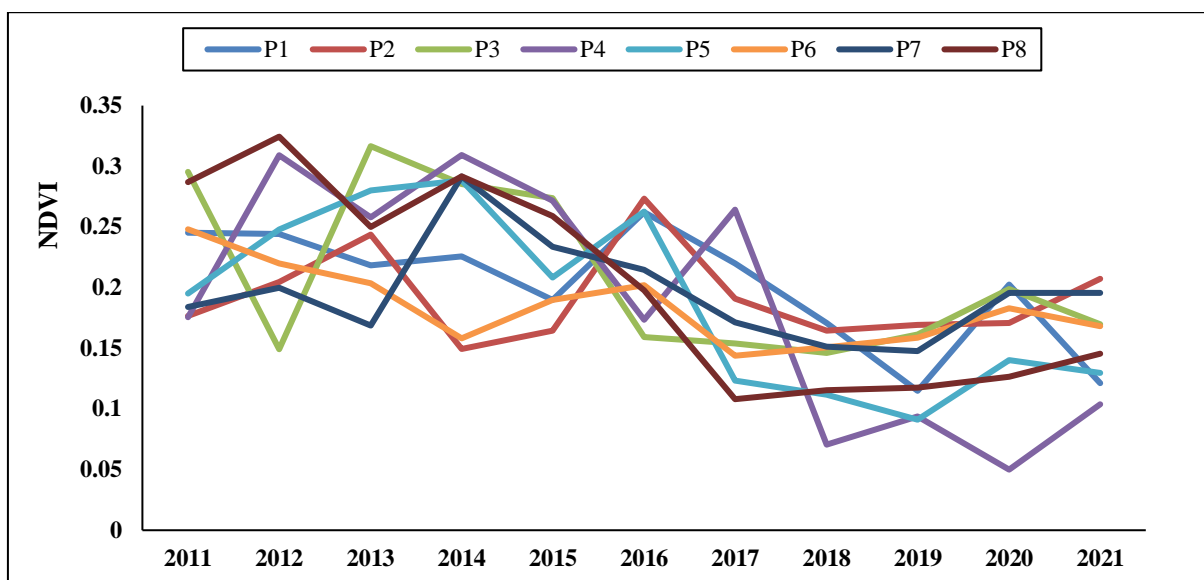


Figure 12. Variations annuelles de l'NDVI du chêne vert de 2011 et 21 de la zone d'étude.

La détection des changements de la végétation forestière des 12 mois illustrent (Figure 13), spatialement et quantitativement, les variations importantes de la végétation, survenues dans les formations forestières de Chettaba sur une période de 11 ans (2011, 2021).

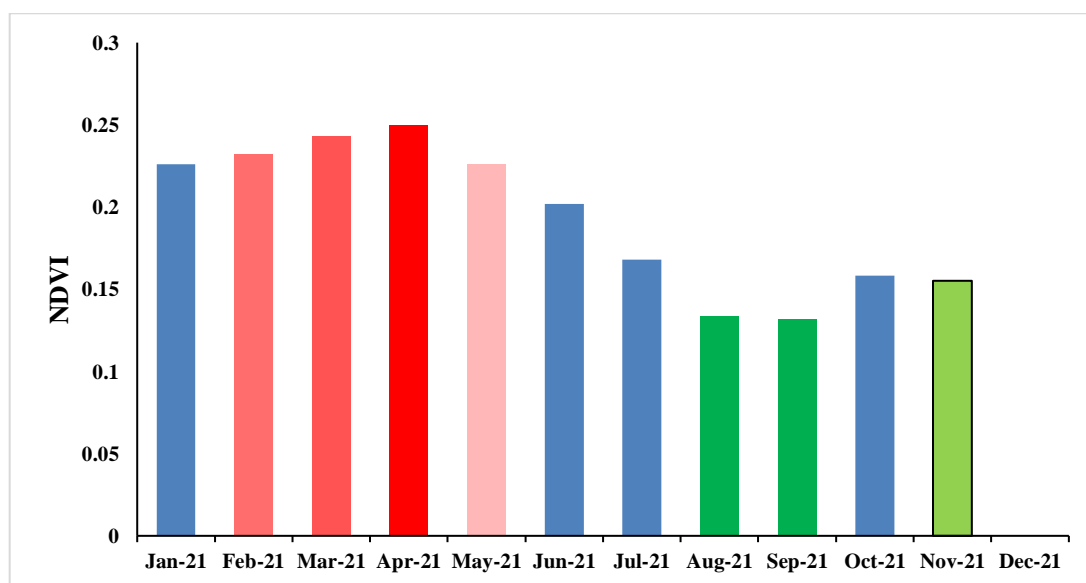


Figure 13. Variations interannuelles de l'NDVI du chêne vert de la forêt de Chettaba (2011).

Les valeurs de l'NDVI les plus élevées sont toujours enregistrées en avril (0,25), tandis que les valeurs les plus basses sont enregistrées pour le chêne vert en août et septembre (0,12).

Ces changements de la végétation, peuvent être soit :

- une progression des surfaces boisées
- une augmentation de densité de la végétation forestière
- une stabilité des formations forestières

Une diminution de densité de la végétation forestière c'est une régression des surfaces boisées (Benkhelfi et Bouchachoua, 2021).

À l'exception de l'année 2021, où la plus grande activité végétative a eu lieu en avril (0,26). Cette année a été également marquée par la plus grande activité végétative de la forêt de Chettaba, mais les mois qui ont suivi ont vu une rapide diminution de cette activité, qui s'est traduite par une baisse significative des valeurs NDVI (Figure 14).

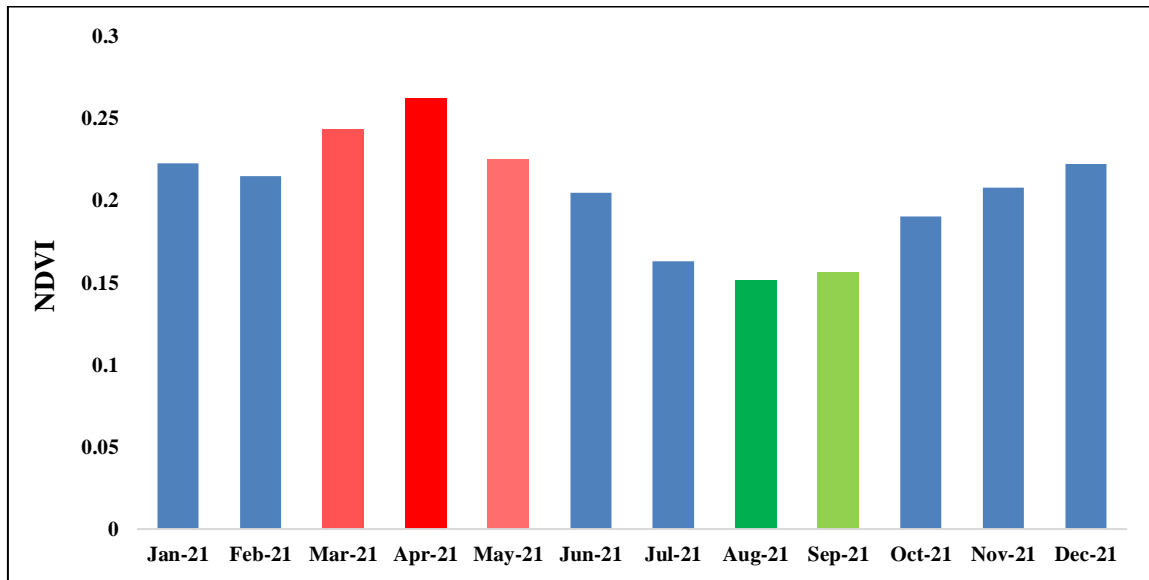


Figure 14. Variations interannuelles de l'NDVI du chêne vert de la forêt de chettaba (2021).

L'étude diachronique du chêne vert et des différents facteurs qui impactent le couvert végétal pourrait explorer les éléments suivants :

Les variations dans les conditions climatiques, telles que les précipitations, la température et les événements extrêmes tels que les sécheresses, peuvent avoir un impact significatif sur le couvert végétal du chêne vert dans les périodes estivales et printanières.

Les activités humaines, telles que l'exploitation forestière, l'urbanisation, l'agriculture et le surpâturage, peuvent entraîner la dégradation ou la destruction de cette espèce au cours des mois juin, juillet, août et septembre.

Nous avons essayé de caractériser la variabilité temporelle de l'indice NDVI des écosystèmes forestiers à travers des courbes graphiques au cours de la saison printanière et d'identifier spatialement via des cartes thématiques les parcelles forestières stressées où l'activité chlorophyllienne des feuilles présentes des fluctuations

Les variations interannuelles de l'NDVI sont très marquées pendant les premiers mois janvier, février, mars et avril durant laquelle l'activité végétative est fortement progressive, elle affiche des valeurs importantes de l'NDVI et marque un pic ; la végétation forestière montre une activité photosynthétique au cours du mois d'avril, dans l'année 2011

(0.25). Par contre, l'année 2021 marque les mêmes valeurs mais l'activité végétative plus forte au mois d'avril (0.26).

La feuille est un organe aérien et chlorophyllien, aplati et porte latéralement par la tige. Elle a un rôle dans la nutrition (assimilation chlorophyllienne : photosynthèse qui a lieu au niveau du parenchyme chlorophyllien dit aussi parenchyme assimilateur) et un rôle dans l'équilibre métabolique. Le printemps (mars, avril et mai) marque le début de la croissance des feuilles pour le chêne vert. Les bourgeons se développent et les nouvelles feuilles apparaissent. La couverture végétale augmente alors que les feuilles se déploient, ce qui peut influencer l'ombrage et la compétition entre les plantes environnantes (Bessaoud *et* Cherifi (2021 ; 2022)

Avec la croissance des feuilles, le chêne vert peut étendre son couvert végétal et occuper davantage d'espace. Cela peut avoir un impact sur les autres espèces végétales en modifiant la disponibilité de la lumière, de l'eau et des nutriments.

Le chêne vert (*Quercus ilex*) est une espèce d'arbre adaptée aux climats méditerranéens. Il est donc habitué aux étés chauds et secs de cette région. La période estivale peut avoir plusieurs effets sur la couverture végétale du chêne vert :

Selon Bessaoud *et* Cherifi (2021 ; 2022), le stress hydrique a été défini comme une baisse de la disponibilité d'eau traduit par une réduction de la croissance de la plante et /ou de sa reproduction en rapport au potentiel du génotype. La contrainte hydrique est le facteur ou l'ensemble des facteurs ayant pour conséquence le stress. Les étés chauds et secs peuvent entraîner une diminution de la disponibilité de l'eau dans le sol. Cela peut provoquer un stress hydrique chez les arbres, y compris le chêne vert, ce qui peut entraîner une diminution de la croissance et même la mort des individus les plus sensibles.

Les étés chauds et secs augmentent le risque d'incendies de forêt. Le chêne vert a une écorce épaisse qui lui confère une certaine résistance au feu, mais des incendies graves peuvent quand même endommager ou détruire les arbres. La plupart de ces incendies sont provoqués à partir des routes nationales ou chemins vicinaux en direction de la forêt par le rejet de mégots de cigarettes, des décharges anarchiques non contrôlées au niveau des communes et des terres agricoles dont leurs propriétaires n'ont pas équipé leurs moissonneuses d'extincteurs ou de citernes d'eau afin d'éteindre le feu en cas d'incendie (Algérie presse service 2019).

Dans certains cas, les chênes verts peuvent subir une défoliation pendant la période estivale. Cela peut être causé par des insectes ravageurs ou des maladies spécifiques qui se développent dans des conditions chaudes et sèches. Examiner la variabilité de l'activité de la

plante dans les zones forestières est un moyen important de comprendre les fluctuations temporelles et de quantifier indirectement la gravité des changements climatiques. Un produit satellite facile à calculer, le NDVI très fréquemment utilisé car il est assez commun (Jensen, 2000), parfois normalise les effets d'illumination ou de pente (Bariou *et al.*, 1985; Caloz et Collet, 2001). Il a de nombreuses utilisations telles que la description de la santé des plantes, l'identification de changements phénologiques, l'estimation de la biomasse verte et des rendements, etc. Le concept du NDVI repose sur le fait qu'un couvert végétal absorbe l'énergie dans la bande du rouge par la chlorophylle de la plante et réfléchit beaucoup dans la bande du proche infrarouge (Robin, 2002).

Par conséquent, les valeurs de reflet rouge tendront à diminuer de manière linéaire à mesure que la proportion de végétation diminue. (Beek *et al.*, 2006), assurer que la relation entre le pourcentage de couverture des plantes et les valeurs NDVI est linéaire.

2. Variabilité spatio-temporelle

A l'exception du mois de décembre où les images satellitaires sont manquantes, nous obtenons une carte NDVI pour les autres mois de 2011 après la collecte des données. On peut créer ces cartes à partir d'images satellites multispectres prises à diverses dates.

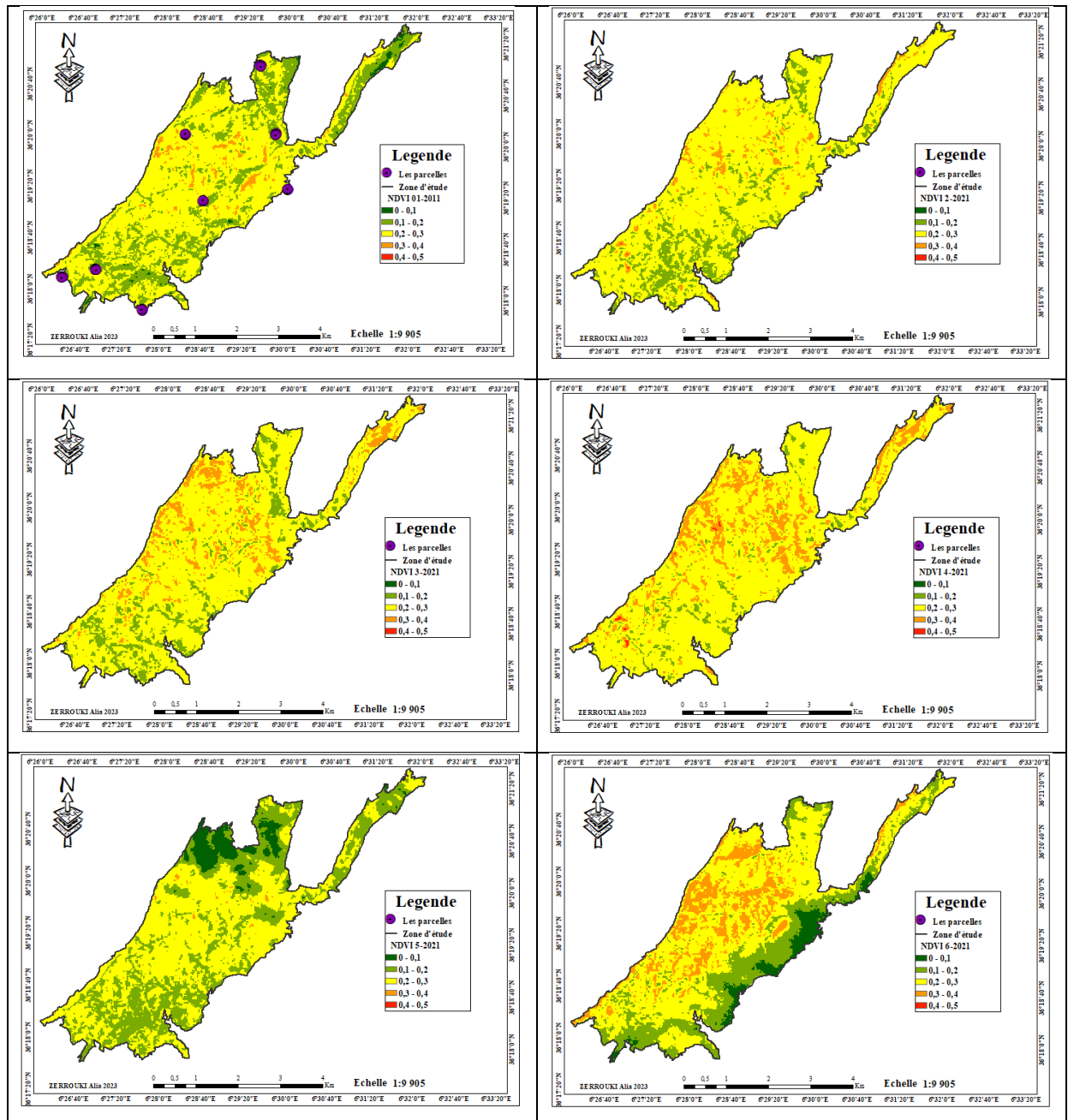
La connaissance de la croissance végétale est nécessaire pour une gestion optimale de la culture (Atzberger, 2013). Cette connaissance est utilisée pour établir des périodes de conditions favorables ou non à l'établissement d'un stress hydrique (Rembold *et al.*, 2013). Dans la plupart des études, les méthodes consistent à utiliser les valeurs de précipitations annuelles afin de prévoir les périodes potentielles de sécheresses en établissant des relations avec l'imagerie (Atzberger, 2013).

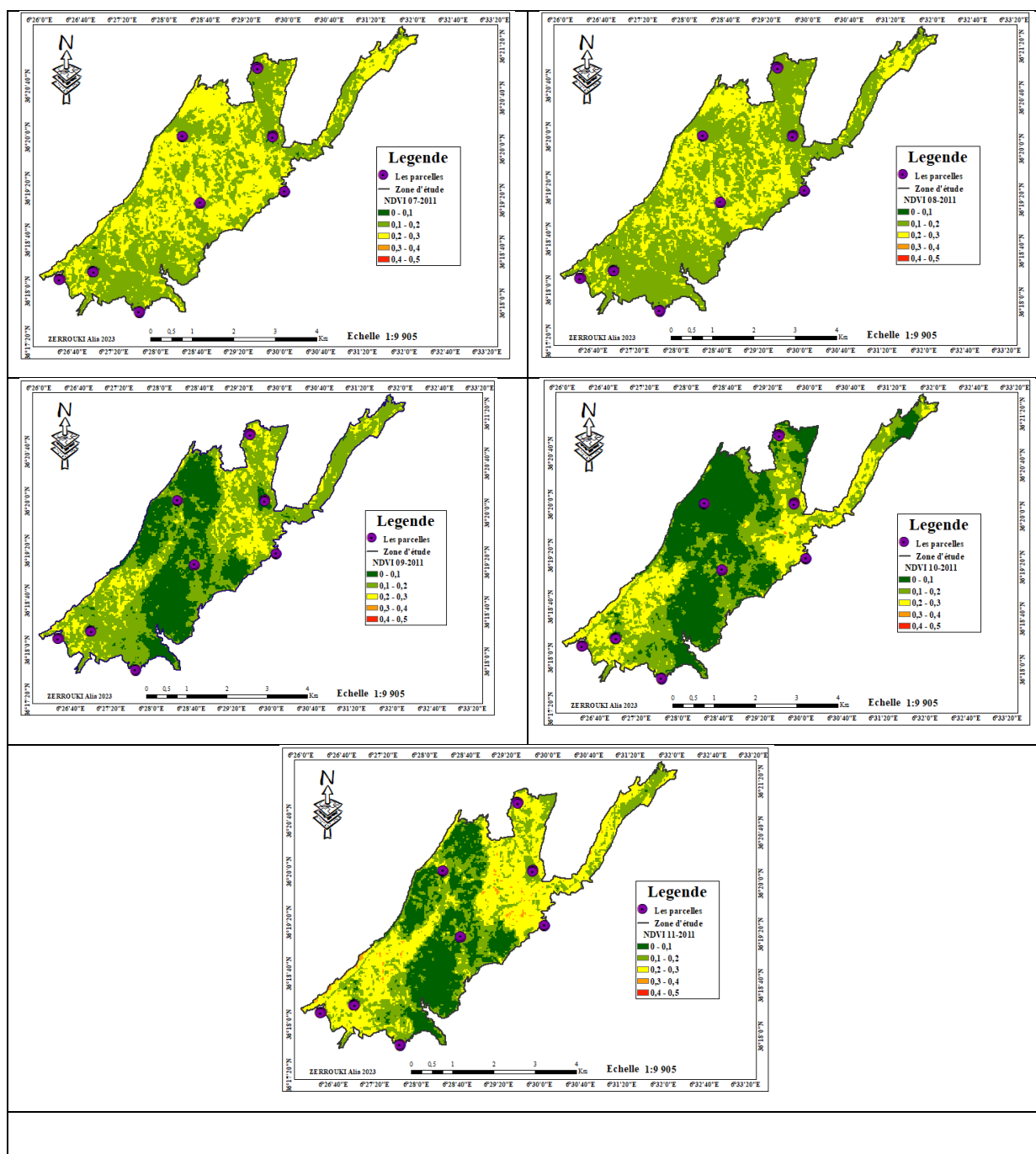
Il est donc possible d'estimer la masse végétale au sol, de décrire l'état phénologique de la culture, ou même de prévoir les rendements sur une parcelle à l'aide de la télédétection (Wang *et al.*, 2012 ; Mishra *et al.*, 2013 ; Xu *et al.*, 2011). Selon Jacquemoud et Bousquet (2005), la réflectance spectrale de la végétation est expliquée majoritairement par les propriétés optiques des feuilles.

Trois phénomènes physiques sont mesurés en télédétection : la réflectance ρ (fraction de rayonnement incident réfléchi), l'absorptance α (fraction de rayonnement incident absorbé) et la transmittance τ (fraction de rayonnement incident transmis) (Gerber, 2011). La luminance est le rayonnement électromagnétique intercepté par le capteur utilisé et varie en fonction de la réflectance de la végétation visée (Meyzonnette et Lépine, 2003).

Les variations de la réflectance spectrale à certaines longueurs d'ondes connues sont utilisées pour caractériser l'état de santé de la plante par le biais d'indices de végétation. Ces

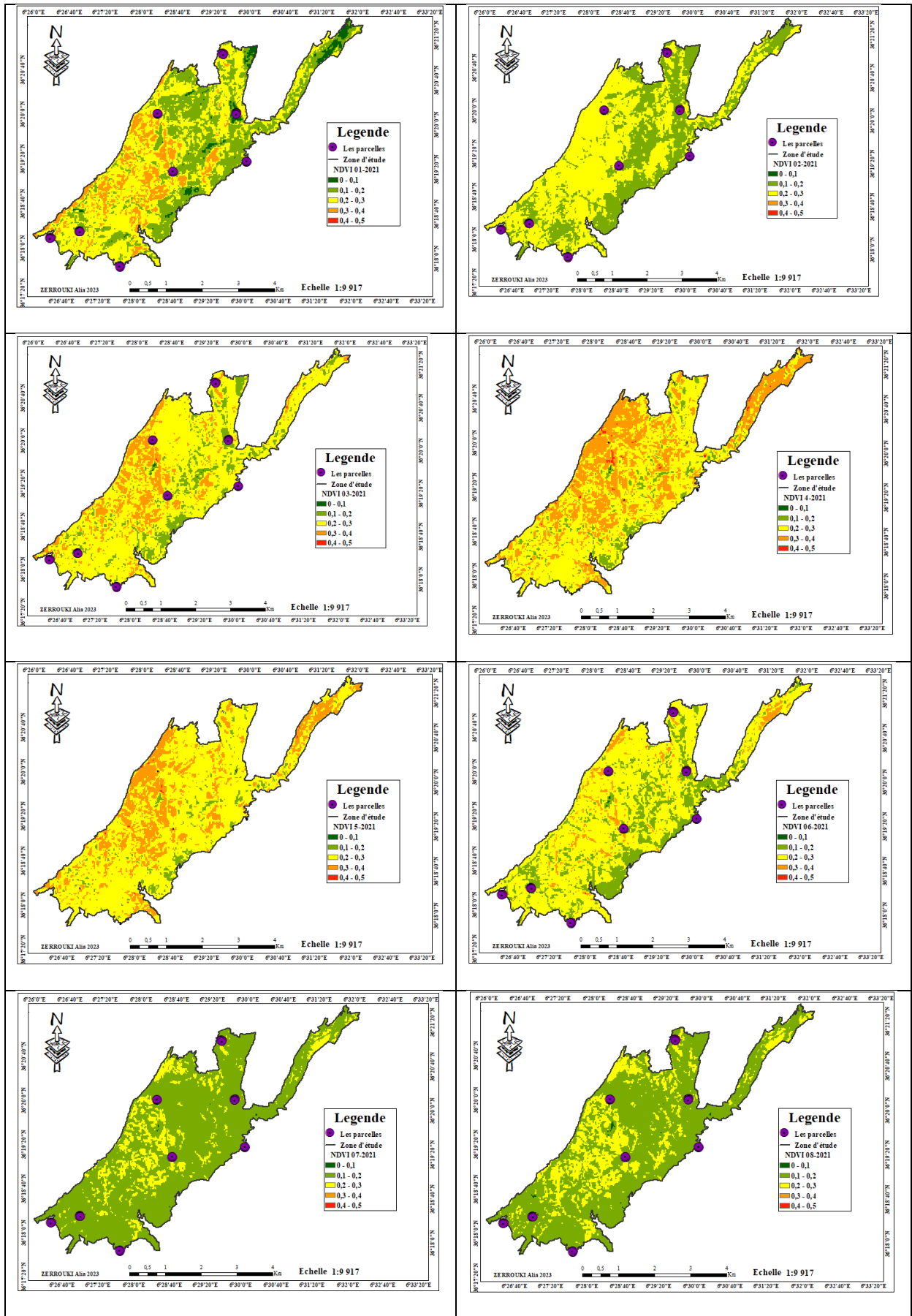
indices transforment les réflectances apparentes en rapports interprétables en environnement (Uved, 2014). La majorité des indices en lien avec l'étude de la végétation se basent principalement sur les bandes verte, rouge et proche infrarouge alors que la bande bleue est peu utilisée (Huete, 2012 ; Jacquemoud et Bousquet, 2005 ; Zarco-Tejada *et al.*, 2013b). Les variations de l'IDVI du chêne vert de l'année 2011 sont illustrées dans a figure 15.

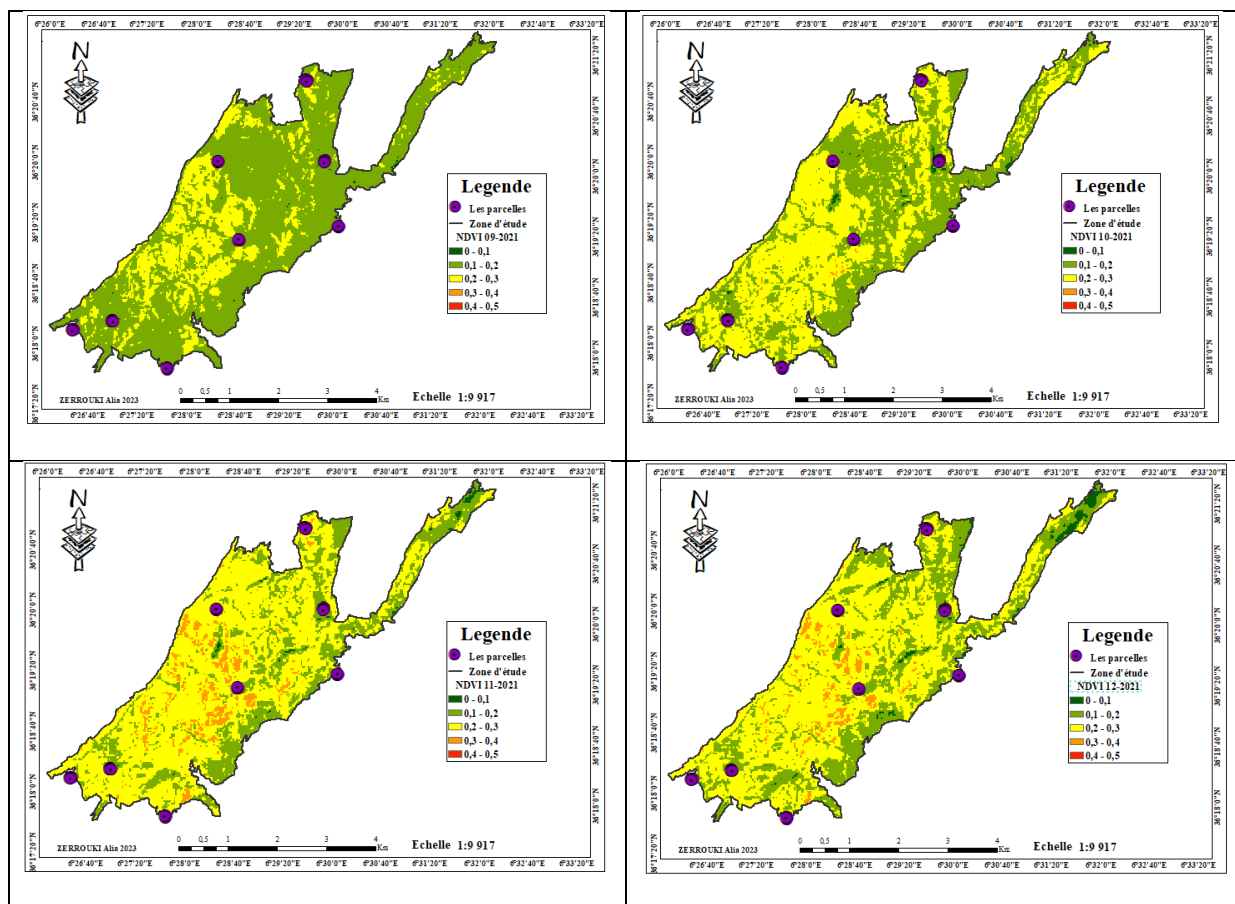




Carte 15. Evolution intermensuelle de l'NDVI du chêne vert de la forêt de Chettaba en 2011.

Dans notre étude diachronique, on observe les mêmes résultats au cours des mois de 2011, avec une augmentation du NDVI de 0,26 en avril (Figure 16). Nous en déduisons qu'il y a eu une amélioration de la couverture végétale de la zone d'étude de la forêt de Chettaba, en notant au mois d'avril.





Carte 16. Evolution intermensuelle de l'NDVI du chêne vert de la forêt de Chettaba en 2022.



Conclusion

Conclusion

Cette étude représente une contribution significative à la compréhension des évolutions spatio-temporelles du couvert végétal dans la forêt de Chettaba entre 2011 et 2021. En utilisant la télédétection, notre recherche vise à mieux appréhender les changements survenus au niveau du chêne vert de cette région au cours de la décennie étudiée.

L'utilisation des images satellites LANDSAT TM5 et LANDSAT 7 ETM+ combinées à l'analyse du NDVI a fourni une méthode efficace pour évaluer les changements dans le couvert végétal sur une période de dix ans. Les cartes réalisées ont permis de visualiser la répartition spatiale de la biomasse verte et l'intensité de l'activité végétative du chêne vert dans le massif forestier de Chettaba.

L'analyse diachronique de l'NDVI a révélé des variations temporelles et spatiales dans la couverture végétale du chêne vert. Ces variations peuvent être attribuées à divers facteurs tels que les conditions climatiques, les perturbations anthropiques et les processus écologiques naturels. Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence les zones présentant une productivité végétale élevée ainsi que les zones soumises à des stress ou des perturbations.

L'utilisation des techniques de système d'information géographique (SIG) a permis de compléter l'analyse des images satellites en intégrant des données terrain et en fournissant une meilleure compréhension de la structure et de la composition de la végétation. Cette approche a permis d'obtenir des informations plus détaillées sur l'état et la dynamique du chêne vert dans la région de Chettaba.

En résumé, cette étude démontre l'importance de la télédétection, en particulier l'utilisation des satellites et du NDVI, dans l'étude diachronique du chêne vert. Les cartes produites et les analyses réalisées ont fourni des informations précieuses sur la distribution spatiale et les variations temporelles de cette espèce végétale.

Ces résultats peuvent être utilisés comme base pour la gestion et la conservation du chêne vert dans la région de Chettaba. Ils peuvent également servir de référence pour des études futures sur la dynamique des écosystèmes forestiers et la réponse des espèces végétales aux changements environnementaux.

En conclusion, cette étude souligne l'importance de la télédétection et des outils SIG dans la compréhension des variations spatio-temporelles du chêne vert. Elle met en évidence la nécessité de poursuivre la surveillance et la gestion de cette espèce végétale en utilisant des approches intégrées qui combinent les données satellitaires, les analyses de l'NDVI et les techniques SIG.

Après avoir achevé cette étude qui m'a passionné et enrichi, je conclus que l'utilisation de données précises, de logiciels appropriés, de la télédétection et des systèmes d'information géographique s'avère essentielle pour une analyse complète de la dynamique de la végétation. De plus, l'analyse de la variation spatio-temporelle de la végétation forestière à partir de la télédétection par satellite s'est révélée être un moyen d'investigation efficace pour évaluer l'impact des facteurs naturels et humains sur le déclin des forêts algériennes.



Perspectives

Perspectives

Les perspectives qui peuvent compléter ce travail sont résumées dans quelques points:

- Modélisation des changements futurs : En utilisant des techniques de modélisation dans les SIG et la télédétection, il est possible de projeter les changements futurs du couvert végétal. Cela permet de simuler différents scénarios en tenant compte des facteurs environnementaux et des pressions humaines, et d'anticiper les impacts potentiels sur l'écosystème. Ces modèles peuvent servir de base pour prendre des décisions éclairées en matière de planification de l'utilisation des terres et de conservation.

- Intégration des données socio-économiques : Pour une gestion efficace des écosystèmes, il est important d'intégrer les données socio-économiques dans les analyses géospatiales. En combinant des données sur les activités humaines, les populations locales, les pratiques agricoles, etc., avec les données environnementales, il est possible de prendre en compte les aspects socio-économiques dans la planification et la gestion des ressources naturelles. Cela favorise une approche holistique et équilibrée de la gestion des écosystèmes.

Ces perspectives complémentaires peuvent enrichir l'étude diachronique du couvert végétal, en fournissant des informations supplémentaires pour une gestion plus efficace dans la forêt du Chettaba, durable et intégrée des écosystèmes.

Références bibliographiques

- Abdelbaki, T. N., Huang, C. K., Ramos, A., Neto, M. G., Talebpour, M., Saber, A. A. (2012). Gastric plication for morbid obesity: a systematic review. *Obesity surgery*, 22, 1633-1639.
- Achhal, A., Akabli, A., Barbero, M., Benabid, A., M'Hirit, O., Peyre, C., Quézel, P., Rivas-Martinez, S. (1979). A propos de la valeur bioclimatique et dynamique de quelques essences forestières au Maroc. *Ecologia mediterranea*, 5(1), 211-249. DOI : <https://doi.org/10.3406/ecmed.1979.960>
- Amat, J.P., Dorize L., Le Coeur C. (2008). Éléments de géographie physique. Cours, documents, travaux dirigés. 2ème éd. Ed. Bréal, France, 463 p.
- Atzberger, C. (2013) Advances in remote sensing of agriculture: Context, description, existing operational monitoring systems and major information needs. *Remote sensing*. Vol. 5. 949- 981..
- Baghdadi, N., Zribi, M. (2017). Observation des surfaces continentales par télédétection I : agriculture et forêt (éd. Série Télédétection pour l'observation des surfaces continentales, Vol. 3). Londre, Great Britain: ISTE Editions Ltd.
- Barbero, M. R. P. F., Loisel, R., & Quézel, P. (1992). Biogeography, ecology and history of Mediterranean Quercus ilex ecosystems. Quercus ilex L. *ecosystems: function, dynamics and management*, 19-34.
- Baret, F., Clevers, J., Steven, M. D. (1995). The robustness of canopy gap fraction estimations from red and near-infrared reflectances: A comparison of approaches. *Remote Sensing of Environment*, 54(2): 141-151.
- Bariou, R., Lecanu, D., Le Henaff, F. (1985). Dossiers de télédétection. Tome 1. Réponse spectral des végétaux". Centre régional de télédétection", Université de Rennes 2-Haute Bretagne, (2) : pp.71-73.
- BARRY, J ., PONS ,A., REILLE, M., TRIAT H. -1976- Notice de la carte internationale du tapis végétal et les condions écologiques. Feuille d' Alger au 1/ 100000000. CRBT. Alger. 42p
- Belorizky, E., Pique J-P. (2022), Le rayonnement thermique du corps noir, Encyclopédie de l'Environnement, [en ligne ISSN 2555-0950] url : <https://www.encyclopedie-environnement.org/physique/le-rayonnement-thermique-du-corps-noir/>
- Bensaid, B., Jeanne, O. (1997). The instability of fixed exchange rate systems when raising the nominal interest rate is costly. *European Economic Review*, 41(8), 1461-1478.
- Benyamina, A. B., Meftah, S. A., Mohri, F. (2013). Analytical solutions attempt for lateral torsional buckling of doubly symmetric web-tapered I-beams. *Engineering structures*, 56, 1207-1219.

- Benyamina, F. (2013). Utilisation des données Géomatiques pour l'étude de la dégradation des forêts et Proposition d'un Plan d'Extension du P.N.B. université Hadj Lakhdar, Batna, 139p.
- Bessaoud, K., Cherifi, N. (2022). Approche comparative du comportement de quatre chênes élevés en pots et leurs communautés ectomycorhizienne soumis à différentes conditions de stress (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- Bonn, F., Rochon, G. (1992). Précis de télédétection: Applications thématiques (Vol. 2). Presses de l'Université du Québec.
- Boudy P. (1950). Guide du forestier en Afrique du Nord .Edition la maison rustique.505p
- Boudy P. (1952). Guide du forestier en Afrique du Nord. Ed. La maison rustique, Paris, 505 p.
- Brenner, D.J., Hall, E.J. (2007). Computed Tomography – An Increasing Source of Radiation Exposure, New England Journal of Medicine 357, 2277-2284.
- Bul, G. (2008). Bulletin de l'Information Géographique Appliquée aux Activités de Recherche Développement. BIG (3) - Initiation à la Télédétection, 2008.
- Calloz, R., Collet, C. (2001). Précis de télédétection volume 3 : Traitements numériques d'images de télédétection, Sillery: Presses de l'Université du Québec, 386 p
- CCT. (2002). Notions fondamentales de télédétection, En ligne . (G. d. Canada, Producteur) Consulté le Mars 5, 2018, sur Centre Canadien de Télédétection /Resources naturelles:
http://pages.csam.montclair.edu/~chopping/rs/CCRS/chapter1/chapter1_6_f.html
- Centre Canadien de Télédétection (CCT) : <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca>
- Cyr, L., Bonn, F., Pesant, A. (1995). Vegetation indices derived from remote sensing for an estimation of soil protection against water erosion. Elsevier Science B.V/ Ecological Modelling, 79, pp. 277-285. DOI: [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(94\)00182-H](https://doi.org/10.1016/0304-3800(94)00182-H)
- Dissanska, M., Bernier, M., Rousseau, A. N., Chokmani, K., Jutras, S. (2007). Étude de la connectivité physique des tourbières au réseau hydrographique du bassin versant de La Grande rivière à l'aide d'une classification orientée objet d'images Landsat-7 ETM
- Ducrot, D. (2012). Quelques bases sur les satellites, la télédétection. Univ. Toulouse. 39p.
- El Kharki, K., Bensamka, F., Berrada, K. (2020). Enhancing practical work in physics using virtual javascript simulation and LMS platform. Radical solutions and eLearning: Practical innovations and online educational technology, 131-146.
- Escadafal, R. (1989). Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection. Editions de l'ORSTOM, Collections Études et Thèses, Paris.

- Escadafal, R., BEGNI, G., BILLET, P., BONNET, B., HIERNAUX, P., & TRAVI, Y. (2016). Surveiller la désertification par la télédétection. Dossier thématique du CSFD, (12), 46.
- Gerber F. (2011) Estimation du contenu en eau de la végétation par télédétection hyperspectrale dans le moyen infrarouge. Thèse de doctorat, École doctorale des Sciences de la Terre. Paris. 149 p.
- Gueye I., 2013, Application de la Télédétection aérospatiale pour l'évaluation de la dégradation des ressources naturelles : cas des sols de la région de Kaolack située dans le Bassin arachidier du Sénégal, p42-46.
- Guyot, G. (1989). Signatures spectrales des surfaces naturelles. Collection « Télédétection satellitaire No 5 ». Géographie physique et Quaternaire, 44(1), p. 178. doi:10.7202/032803ar
- Hamdi, R., Boulhendi, A. (2020). Estimation par télédétection du biovolume végétal pour le calcul de l'indice de combustibilité : comparaison entre les différents indices de végétation, cas de la forêt de Chettabah (Constantine). Mém. Master, Université Frères Mentouri, Constantine 1, 14p.
- Jacquemoud, S. et Bousquet L. (2005) Modélisation des propriétés optiques des feuilles : état de l'art, perspectives et applications en télédétection. Actes du 12ème Congrès de l'Association Québécoise de Télédétection, "La relève : une télédétection en évolution", 10-12 mai 2005, Ville de Saguenay, Québec, Canada. 8 p.
- Jensen, J.R., Ramsey, E.W, (1990). The derivation of water volume reflectances from airborne MSS data using in situ water volume reflectances, and a combined optimization technique and radiative transfer model. *International Journal of Remote Sensing*, 11 (6) : 979-998.
- Jiang, Z., Huete, A.F., Diban, K., Miura, T. (2008). Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment*, 112(10): 3833-3845. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.06.006>
- Joseph, C. (2022). La télédétection mise au service des écosystèmes forestiers en Haïti: tentative de restauration de l'environnement et de la biodiversité (Doctoral dissertation, Antilles).
- Journaux, L. (2006). Analyse multispectrale d'images satellitaires et analyse multi-tableaux : application à la répartition des populations d'oiseaux et à la structure du paysage. Université de Bourgogne, 19p.
- Kamal, A. H. A. R. I. K., Abdelkader, E. G. Application du SIG pour la gestion des ressources en eau dans la région de Saïss (Maroc).
- Kergomard, C. (1990). La télédétection aérospatiale: une introduction. Cours de télédétection, Ecole Normale Supérieure Paris.

- Kergomard, C. (2003). La télédétection aérospatiale : une introduction. Cours, Paris, 34p.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., Chipman, J. W. (2008). Digital image interpretation and analysis. *Remote sensing and image interpretation*, 6, 545-81.
- Lillesand, T., Kiefer, R. W., Chipman, J. (2015). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons.
- Meneses-Tovar, C. L. (2011). NDVI as indicator of degradation. *Unasylva*, 62(238), 39-46.
- Meyzonnette J.L. et Lepine T. (2003) Bases de la radiométrie optique. Éditions Cépadues. Paris, France. 252 p
- Mishra V., Cruise J.F., Mecikalski J.R., Hain C.R. et Anderson M.C. (2013) A remote-sensing driven tool for estimating crop stress and yields. *Remote Sensing*. 5 : 3331-3356.
- Nixon, K.C. (1993). Infrageneric classification of *Quercus* (Fagaceae) and typification of sectional names. *Ann. For. Sci.*, 50: 25.
- Ogaya R., Penuelas J. (2007). Seasonal ultrasonic acoustic emissions of *Quercus ilex* L. trees in a Mediterranean forest. *Acta. Physiol. Plant.*, 29: 407-410
- Ouamara, A. (2013). Etude et mise en œuvre des systèmes d'information géographique. Mémoire de master. Université Abderrahmane Mira, Bejaia, 58 p.
- Paton, D., Garcia-Herrera, R., Cuencia J., Galavis M., Roig F.A. (2009). Influence of climate on radial growth of holm oaks (*Quercus ilex* subsp *Ballota* Desf) from SW Spain. *Geochronometria*, 34: 49-56
- Pouchin, T. (2001). Élaboration d'un observatoire paysager: application à l'estuaire de la Seine (Doctoral dissertation, Le Havre).
- Quezel, P. (1976). Les chênes sclérophylles en région méditerranéenne. *CIHEAM - Options Méditerranéennes*, 35: 25-29.
- Quezel, P. (1979). La région méditerranéenne française et ses essences forestières. Signification écologique dans le contexte circumméditerranéen. *Forêt méditerranéenne*, 1 : 7-18.
- Quézel, P., Barbero, M., Benabid, A., Loisel, R., Rivas-Martinez, S. (1988). Contribution à l'étude des groupements pré-forestiers et des matorrals rifains. *Ecologia mediterranea*, 14(1), 77-122.
- Ramalanjoana, M. (2013). Etude de la régénération de la sénescence de *Tamarindus indica* et ses impacts et implications écologiques dans la réserve de Bezà Mahalapye. Mémoire d'ingénieur en sciences agronomique. Université d'Antananarivo, p 33-46

- Rameau, J. C., Mansion, D., Dume, G., Gauberville, C., Bardat, Bruno, E., Keller, R. (2008). Flore forestière française : Guide écologique illustré. Tome (3). Région méditerranéenne. Ed. Institut pour le développement forestier, Paris, 2432 p.
- Ramy, N. (2012). Segmentation des images de télédétection en utilisant une technique de codage basée sur la texture et l'altitude (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- Randrianalisoa, J. H. (2006). Transfert thermique par rayonnement et conduction dans les matériaux poreux micro et nanostructurés. Analogie transfert de phonons et de photons. INSA Lyon, Lyon.
- Rembold, F., Atzberger, C., Savin, I. et Rojas O. (2013) Using low resolution satellite imagery for yield prediction and yield anomaly detection. *Remote Sensing*. 5 : 1704-1733.
- Remil, R. (2006). Utilisation de l'imagerie satellitaires et des SIG dans l'analyse phytoécologique et l'aménagement application à la région de Beni Chougran).
- Robin, M. (1995). La télédétection. Des satellites aux systèmes d'information géographiques. Université Nathan, 18, 29, 30, 42, 1995.
- Robin, M. (2002). Télédétection des satellites aux SIG. 2ème édition de Marc Robin, 124p.
- Roy, M. (2008). Du titre littéraire et de ses effets de lecture. *Protée*, 36(3), 47-56.
- Sauvage, J. F., Baker, R. H., & Hussey, A. S. (1961). The Hydrogenation of cycloalkenes over supported palladium catalysts. *Journal of the American Chemical Society*, 83(18) : 3874-3877.
- Sellers, P. J. (1985). Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *International journal of remote sensing*, 6(8) : 1335
- Sellers, P.J. (1985). Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration, *International Journal of Remote Sensing*, 6(8), 1335-1372.
- Soudani, K. (2005). Partie I : Bases physiques et exemples d'applications aux couverts végétaux. Dans introduction générale a la télédétection (Vol. Version 1.0, pp. 1-26). Paris: Faculté des Sciences d'Orsay- Université Paris-Sud XI. Récupéré sur http://www.es.e.u-psud.fr/IMG/pdf/doc_cours_teledec.pdf
- Uved, T., (2008). ENVCAL - Suivi de l'environnement par télédétection, Cours en ligne. Université Paris I, Panthéon-Sorbonne.
- Uved. (2008). Les caractéristiques spectrales de la végétation. Récupéré sur EnvCAL - Suivi de l'environnement par télédétection: <http://e-cours.univparis1.fr/modules/uved/envcal/html/vegetation/caracteristique-vegetation/index.html>

- Wang Y.P., Chen S.H., Chang, K.W. et Shen Y. (2012) Identify and characterizing yield limiting factors in paddy rice using remote sensing yields maps. *Precision agriculture*. 13 : 553- 567.
- Xu W., Ren X. et Smith A. (2011) Remote sensing, crop yield estimation and agricultural vulnerability assessment : a case of southern Alberta. 19th International Conference on Geoinformatics. Shanghai. 7 p
- Yacine, A., & Lumaret, R. (1988). Distribution spatiale des géotypes dans une population de chêne vert (*Quercus ilex* L.), flux génique et régime de reproduction. *Génétique sélection évolution*, 20(2), 181-198.
- Zerrouki, A., Kara, K., Rached-Kanouni, M., Redjaimia, L., Touafchia, B., Ababsa, L., Rahab, R.(2023) Caractéristiques structurales de chêne vert (*quercus ilex* l.) de la forêt de Chettaba. *Revue des BioRessources*. 13 : 41 – 51.
- Zerrouki, A., Redjaimia, L., Kara, K., Rached-Kanouni, M., Touafchia, B., Missaoui, K., Boudraa, A.(2022). Tree canopy defoliation and correlation with dendrometric study of holm oak of the Chettaba forest. *Asia Life Science*. 12 (11) : 1625 -1632.

GUERREM Imen

Date de soutenance : 25 / 06 / 2023

ETUDE DIACHRONIQUE DE L'ÉVOLUTION SPATIOTEMPORELLE DU CHENE VERT DANS LA FORET DE CHETTABA (CONSTANTINE) : APPROCHE CARTOGRAPHIQUE PAR LA TELEDETECTION

Résumé

Il est essentiel de suivre l'intensité de l'activité photosynthétique de la forêt de Chettaba afin d'acquérir une meilleure compréhension de la répartition et de la dynamique spatio-temporelle de sa végétation. Cette approche permet d'utiliser l'interprétation des données de télédétection et des systèmes d'information géographique (SIG) pour détecter les changements dans l'état du chêne vert. Dans cette étude, nous avons analysé l'évolution chronologique du chêne vert en utilisant les données de l'indice de végétation normalisé (Normalized Difference Vegetation Index : NDVI) pour la période de 2011 à 2021. Cependant, il n'y a pas encore de consensus sur la méthode la plus efficace pour réaliser un tel suivi. La méthode que nous avons employée est basée sur l'utilisation de 24 images satellitaires de type Landsat (TM et ETM), qui ont été utilisées pour former deux scènes d'étude, à savoir "2011" et "2021". Ces images ont été soumises à une analyse visuelle afin d'éliminer celles présentant une couverture nuageuse importante. L'analyse chronologique a révélé des changements dans l'écosystème forestier du Chettaba, mettant en évidence les différentes mutations qu'a connues cette région.

Mots clés : Télédétection, SIG, NDVI, analyse diachronique.

Laboratoire de recherche : Laboratoire des substances naturelles, biomolécules et applications biotechnologiques/ Faculté des Sciences Exactes et Sciences de la Nature et de la Vie/Département de Sciences de la Nature et de la Vie/Université Larbi Ben M'HIDI/Oum El Bouaghi

Président :	ABABSA Labeled	Professeur Université Oum El Bouaghi
Encadreur :	RACHED-KANOUNI Malika	Professeur Université Oum El Bouaghi
Examinatrices :	ZAIDI Houda	MCB Université Oum El Bouaghi