



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique



Université Constantine 1 Frères Mentouri
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

جامعة قسنطينة 1 الإخوة منتوري
كلية علوم الطبيعة والحياة

Département : Ecologie et environnement: قسم

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Écologie et Environnement

Spécialité : Protection des écosystèmes

Intitulé :

Etude de l'évolution de la cédraie du Parc National de Bélezma

Présenté par : Soltane Takoua Nour El Yakine
Bachterzi Riadh

Le : 24/06/2025

Jury d'évaluation :

Présidente: Alatou Hana (MCB- U. Constantine 1 Frères Mentouri)

Encadrant : Arfa Azzedine Mohamed Touffik (MCB- U. Constantine 1 Frères Mentouri)

Examineur : Kerrouche Ibrahim (MCB- U. Constantine 1 Frères Mentouri)

Année universitaire
2024 – 2025



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique



Université Constantine 1 Frères Mentouri
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

جامعة قسنطينة 1 الإخوة منتوري
كلية علوم الطبيعة والحياة

Département : Ecologie et environnement: قسم

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Écologie et Environnement

Spécialité : Protection des écosystèmes

Intitulé :

Etude de l'évolution de la cédraie du Parc National de Bélezma

Présenté par : Soltane Takoua Nour El Yakine
Bachterzi Riadh

Le : 24/06/2025

Jury d'évaluation :

| | |
|--|---|
| Présidente: Alatou Hana | (MCB- U. Constantine 1 Frères Mentouri) |
| Encadrant : Arfa Azzedine Mohamed Touffik | (MCB- U. Constantine 1 Frères Mentouri) |
| Examineur : Kerrouche Ibrahim | (MCB- U. Constantine 1 Frères Mentouri) |

Année universitaire
2024 – 2025

Remerciements

Remerciements ♥

Tout d'abord, nous remercions Dieu, le Tout-Puissant, de nous avoir donné la force, la patience et le courage nécessaires pour mener à bien ce travail. Que la paix et le salut soient sur notre Prophète Mohamed (paix et salut sur lui).

Nous exprimons notre profonde gratitude à nos parents pour leur amour, leurs encouragements et leur soutien indéfectible tout au long de notre parcours. Sans eux, nous n'aurions pas pu atteindre ce niveau de formation.

Ce travail représente l'aboutissement d'un long cheminement durant lequel nous avons bénéficié de l'encadrement, du soutien et des conseils précieux de nombreuses personnes, à qui nous adressons nos remerciements les plus sincères.

En premier lieu, nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance à Monsieur Arfa Azzedine Mohamed Touffik, notre encadreur, qui a dirigé ce mémoire avec rigueur, disponibilité et bienveillance. Il a suivi l'élaboration de ce travail avec un grand intérêt et une attention particulière, jour après jour, et nous lui sommes profondément reconnaissants.

Nos remerciements s'adressent également aux membres du jury, Madame Alatou Hana et Monsieur Kerrouche Ibrahim, qui ont accepté d'évaluer ce travail, ainsi qu'à Monsieur Meliani, Monsieur Gana, et à tous les enseignants du cycle primaire, moyen, secondaire et universitaire, pour leur accompagnement pédagogique et leurs encouragements constants.

Nous remercions tout particulièrement Monsieur Dehimi Mohamed, directeur du Parc National de Bélezma, qui malgré ses nombreuses obligations, a aimablement accepté de nous accueillir au sein de son administration.

Nos remerciements vont aussi à tout le personnel du Parc National de Bélezma, pour leur accueil, leur aide et leur disponibilité et en particulier Monsieur Gaagaa Karim, chef du secteur Hamla (Condorcet) pour son accompagnement sur terrain son assistance et pour les informations précieuses qu'il nous a fournies.

Enfin, nous adressons nos remerciements les plus chaleureux à nos amis et collègues de Master pour l'ambiance conviviale, le soutien mutuel et les échanges enrichissants, ainsi qu'aux étudiants de Master 2 de l'année précédente pour leurs conseils précieux.

Soltane Takoua Nour El Yakine & Bachterzi Riadh

Dédicaces

Dédicace♥

Je dédie ce travail :

À ALLAH

Le Tout-Puissant, le Très Miséricordieux, pour m'avoir permis d'achever ce travail.

Au Prophète MOHAMED (paix et salut sur lui)

Modèle de foi, de sagesse et de miséricorde.

À mon père Maamar

Toi qui m'as toujours encouragé à donner la priorité aux études. Homme modeste et humble, l'admiration que je te porte est sans limite. L'amour que tu as voué à tes enfants, ton éducation et ton sens de l'honneur sont pour nous un modèle. Ce travail t'est dédié.

À ma mère Hinda

Toutes ces années d'études n'auraient pu aboutir sans tes bénédictions. Sois assurée, chère maman, que tes enseignements ont été bien retenus. Je souhaite que toutes les mères soient comme toi, afin que la paix règne dans le monde entier. Dieu seul saura te récompenser.

À mes chères sœurs Rihab et Ghofrane

À mes chers frères Anes et Djaouad

À mes oncles

Chouaib, Younes, Bilel, Lamine, Abdelhafid, Salime, Aziz.

À mes tantes

Sara, Aouatef, Imene.

À mes cousines maternelles

Belkis, Taouba, Malek, Aridje, Alae, Loudjaine, Ritadje, Amani.

À mes cousins maternels

Iyed, Mouayed, Nidal, Amir, Raouad, Siradj, Radouane, Yasser, Taki, Abdou.

À mon amie proche Djihene.

À mes chers amis

Ikram, Oumaima, Zinou, Abdenassar, Chourouk, Houssin, Bahae, Wafia.

À mon collègue exceptionnel Atef

À tous mes camarades de L3, M1 et M2

À tous les membres de l'APNE

notamment M. Sabih, M. Hichem, M. Ahmed.

À tous les membres de la maison de jeunes Ahmed Saâdi

en particulier Mme Meriem, Mme Mounia, M. Slimane, M. Mohamed.

À tous mes voisins et voisines de la cité des frères Abess

À mon pays bien-aimé, l'Algérie

À tout le peuple palestinien

Je dédie également ce travail :

- À mon cher grand-père Rabah (qu'Allah lui fasse miséricorde et l'accueille dans Son vaste paradis).
- À ma chère grand-mère Zahra.
- À mon encadreur, M. Arfa A.M.T.
- À mon futur mari.
- À la famille Soltane.
- À tous mes enseignants du primaire, du collège, du lycée et de l'université.
- À tous mes amis, sans exception.
- À toutes les personnes qui m'estiment et me soutiennent.

Soltane Takoua Nour El Yakine

Dédicace♥

Je dédie ce travail à toutes les personnes que j'aime, et plus particulièrement :

A ma mère qui m'a toujours apporté amour et affection

A la mémoire de mon père qui restera à jamais présent dans mon cœur

A ma sœur Cherifa

A mon frère Abd El Hak

A mes tantes et mes oncles

A la mémoire de mes grands parents

A toute ma famille

A tous mes amis

A tous mes collègues

A tous mes enseignants

Bachterzi Riadh

Sommaire

Sommaire

Table des illustrations

| | |
|--|-----------|
| Introduction..... | 01 |
| Chapitre I : Contexte de l'étude et état de la recherche sur la cédraie du Parc National de Belezma..... | 02 |
| 1. Contexte général..... | 02 |
| 2. Présentation du cèdre de l'Atlas..... | 02 |
| 2.1. Les facteurs écologiques influençant le cèdre de l'Atlas..... | 02 |
| a. Climat..... | 03 |
| b. Sol..... | 03 |
| c. Topographie et exposition..... | 03 |
| 2.2. Les facteurs biotiques influençant le cèdre de l'Atlas..... | 04 |
| a. Pression du pâturage..... | 04 |
| b. Compétition interspécifique..... | 04 |
| c. Parasites et maladies..... | 04 |
| d. Intervention humaine..... | 04 |
| 2.3. Interactions complexes entre facteurs..... | 05 |
| 3. Le Parc National de Belezma : contexte géographique et écologique..... | 05 |
| 4. Vulnérabilités de la cédraie de Belezma..... | 06 |
| 5. Recherches scientifiques sur la cédraie de Belezma..... | 06 |
| 6. Gestion et perspectives de conservation..... | 07 |
| Chapitre II : Approche méthodologique et outils géospatiaux | 08 |
| 1. Approche méthodologique | 08 |
| 1.1. Acquisition des images satellites | 08 |
| 1.2 Sélection des dates et niveau de correction des images..... | 08 |

| | |
|---|----|
| 1.3. Prétraitement des images acquises..... | 09 |
| 1.3.1. Calibration radiométrique..... | 09 |
| 1.3.2. Corrections atmosphériques..... | 10 |
| 1.4. Traitement des images corrigées et analyse des résultats..... | 11 |
| 1.4.1 Calcul de l'indice de végétation NDVI..... | 11 |
| 1.4.2. Classification de l'NDVI..... | 12 |
| 1.4.3. Comparaison multi-dates des classes de l'NDVI..... | 13 |
| 1.4.4. Expression des résultats sous forme de cartes, tableaux et graphiques..... | 14 |
| 2. Outils géospatiaux utilisés | 14 |
| 2.1. Les images satellitaires..... | 14 |
| 2.2. Les logiciels de traitement..... | 15 |
| 3. Relevé de terrain pour valider les données des images satellites..... | 16 |
| Chapitre III : Résultats et discussion..... | 17 |
| 1. Dates et caractéristiques des images LANDSAT choisies..... | 17 |
| 2. Résultats du calcul de l'NDVI..... | 18 |
| 2.1. Discussion des résultats NDVI pour l'année 1985..... | 18 |
| 2.2. Discussion des résultats NDVI pour l'année 1994..... | 19 |
| 2.3. Discussion des résultats NDVI pour l'année 2004..... | 20 |
| 2.4. Discussion des résultats NDVI pour l'année 2016..... | 21 |
| 2.5. Discussion des résultats NDVI pour l'année 2024..... | 23 |
| 3. Résultats de la classification de l'NDVI..... | 24 |
| 3.1. Classes de végétation pour l'année 1985..... | 27 |
| 3.2. Classes de végétation pour l'année 1994..... | 28 |
| 3.3. Classes de végétation pour l'année 2004..... | 29 |

| | |
|--|-----------|
| 3.4. Classes de végétation pour l'année 2016..... | 30 |
| 3.5. Classes de végétation pour l'année 2024..... | 31 |
| 4. Discussion sur l'évolution de la cédraie du Parc National de Bélezma..... | 32 |
| 4.1. Période 1985–1994 : stabilité dominante et premières dynamiques de régénération..... | 33 |
| 4.2. Période 1994–2004 : instabilité marquée et déclin des forêts denses..... | 34 |
| 4.3. Période 2004–2016 : amélioration structurelle du couvert végétal..... | 35 |
| 4.4. Période 2016–2024 : forte régression de la cédraie dense..... | 36 |
| 4.5. Bilan global 1985–2024 : renforcement de la végétation intermédiaire, recul des peuplements très denses..... | 37 |
| 5. Interprétation de l'évolution de la cédraie suivant les données climatiques..... | 38 |
| Conclusion..... | 40 |
| Références bibliographiques | |
| Résumé | |

Table des illustrations

Table des illustrations

Cartes

| | |
|--|----|
| Carte 1 : Localisation géographique du Parc National de Belezma..... | 05 |
| Carte 2 : NDVI de la cédraie du Parc National de Bélezma 20/08/1985..... | 18 |
| Carte 3 : NDVI de la cédraie du Parc National de Bélezma 13/08/1994..... | 19 |
| Carte 4 : NDVI de la cédraie du Parc National de Bélezma 08/08/2004..... | 21 |
| Carte 5 : NDVI de la cédraie du Parc National de Bélezma 09/08/2016..... | 22 |
| Carte 6 : NDVI de la cédraie du Parc National de Bélezma 07/08/2024..... | 24 |
| Carte 7 : Classes de végétation de la cédraie du PNB en 1985..... | 28 |
| Carte 8 : Classes de végétation de la cédraie du PNB en 1994..... | 29 |
| Carte 9 : Classes de végétation de la cédraie du PNB en 2004..... | 30 |
| Carte 10 : Classes de végétation de la cédraie du PNB en 2016..... | 31 |
| Carte 11 : Classes de végétation de la cédraie du PNB en 2024..... | 32 |
| Carte 12 : Evolution de la cédraie du PNB entre 1985 et 1994..... | 34 |
| Carte 13 : Evolution de la cédraie du PNB entre 1994 et 2004..... | 34 |
| Carte 14 : Evolution de la cédraie du PNB entre 2004 et 2016..... | 35 |
| Carte 15 : Evolution de la cédraie du PNB entre 2016 et 2024..... | 36 |
| Carte 16 : Evolution de la cédraie du PNB entre 1985 et 2024..... | 37 |

Figures

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Calibration radiométrique des images Landsat | 10 |
| Figure 2 : Correction atmosphérique des images Landsat..... | 11 |
| Figure 3 : Calcul de l'NDVI des images Landsat..... | 12 |
| Figure 4 : Evolution des précipitations et des températures maximales de 1985 à 2024 (Station Batna)..... | 38 |

Tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1 : Caractéristiques des satellites Landsat utilisés (United States Geological Survey) | 15 |
| Tableau 2 : Dates et caractéristiques des images LANDSAT choisie | 17 |
| Tableau 3 : Matrice de changement des 5 classes de végétation durant les 5 périodes (en ha)..... | 33 |

Photos

| | |
|---|----|
| Photo 1 : Sol nu PNB..... | 25 |
| Photo 2 : Zones à végétation très faible ou en déclin | 25 |
| Photo 3 : Cédraie modérément dense PNB..... | 26 |
| Photo 4 : Cédraie en bon état PNB | 26 |
| Photo 5 : Cédraie dense et saine PNB | 27 |
| Photo 6 : Cèdre dépéris VS jeune régénération PNB..... | 39 |

Introduction

Introduction

Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*), espèce endémique des montagnes de l'Afrique du Nord, constitue l'un des éléments majeurs du patrimoine forestier algérien. Sa valeur écologique, paysagère et socio-économique est indéniable, en particulier dans les zones montagneuses des Aurès où il forme des peuplements emblématiques. Parmi les principaux foyers de cette essence, le Parc National de Bélezma, situé dans la wilaya de Batna, abrite l'une des cédraies les plus importantes et les plus anciennes du pays.

Créé en 1984, ce parc s'étend sur une superficie de 26 250 hectares et joue un rôle central dans la préservation de la biodiversité régionale. Cependant, la cédraie du Bélezma est aujourd'hui soumise à de multiples menaces naturelles et anthropiques : incendies récurrents, sécheresses prolongées, surpâturage, attaques parasitaires (notamment la processionnaire du pin), exploitation illicite du bois, et régressions liées aux changements climatiques. Ces pressions cumulées ont contribué à une détérioration progressive de la structure et de la densité de la cédraie, soulevant des inquiétudes quant à sa pérennité.

Face à cette situation, une évaluation précise et objective de l'évolution du couvert forestier, en particulier celui du cèdre, s'impose comme une priorité. Or, les méthodes classiques d'inventaire forestier, souvent coûteuses et chronophages, ne permettent pas de suivre efficacement les dynamiques de changement à large échelle et sur le long terme. Dans ce contexte, la télédétection spatiale, couplée aux Systèmes d'Information Géographique (SIG), constitue un outil puissant pour cartographier, analyser et quantifier les changements dans le paysage forestier de manière rapide, répétitive et économiquement viable.

L'objectif de cette étude est d'analyser l'évolution de la cédraie du Parc National de Bélezma entre 1985 et 2024 à l'aide d'images satellites LANDSAT. En s'appuyant sur le calcul de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) et sur la classification des données multi-spectrales, cette recherche vise à détecter les dynamiques de changement pour identifier les zones de régression, de stabilité ou de régénération du cèdre. L'ensemble des résultats obtenus sera intégré dans une base de données géographique, en vue de fournir aux gestionnaires des outils d'aide à la décision pour une gestion durable et efficace de cet écosystème forestier précieux.

Chapitre I :
Contexte de l'étude et état
de la recherche sur la
cédraie du Parc National
de Bélezma

Chapitre I : Contexte de l'étude et état de la recherche sur la cédraie du Parc National de Bélezma

1. Contexte général

Les forêts méditerranéennes d'altitude abritent une flore relictuelle unique qui témoigne des climats passés. Parmi les espèces les plus emblématiques de ces forêts, figure le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti), conifère endémique d'Afrique du Nord. Ce taxon, considéré comme une relique tertiaire, joue un rôle écologique fondamental dans les hautes montagnes algériennes et marocaines. Aujourd'hui, en raison de plusieurs facteurs combinés — changement climatique, pressions anthropiques et aléas naturels — le cèdre de l'Atlas connaît un déclin marqué dans plusieurs de ses stations, notamment dans le Parc National de Bélezma, l'un de ses bastions les plus méridionaux (Briki, 2000).

2. Présentation du cèdre de l'Atlas

Le cèdre de l'Atlas est un arbre sempervirent de la famille des *Pinaceae*, pouvant atteindre 30 à 40 mètres de hauteur et vivre plus de 1000 ans. Il se distingue par son port majestueux, sa silhouette pyramidale chez les jeunes sujets, puis tabulaire chez les individus adultes. Son feuillage est composé d'aiguilles vert-bleuté groupées en bouquets, et ses cônes ovoïdes mettent deux années à arriver à maturité. Sa croissance est lente, mais il s'adapte à des conditions climatiques contrastées (Bentouati, 2008).

Phytogéographiquement, l'espèce est répartie sur deux grandes zones : le nord de l'Algérie, principalement dans les montagnes du Tell (Aurès, Djurdjura, Ouarsenis), et le Maroc central, dans les massifs du Moyen Atlas. En Algérie, l'aire naturelle du cèdre couvre environ 23 000 hectares, dont une part importante se situe dans le Parc National de Bélezma (Chelli, 2005). Sa dynamique de régénération est lente et conditionnée à un équilibre écologique fragile, ce qui le rend vulnérable dans les zones marginales de son aire.

2.1. Les facteurs écologiques influençant le cèdre de l'Atlas

a. Climat

Le cèdre de l'Atlas est une espèce montagnarde adaptée à des climats méditerranéens montagnards, caractérisés par des hivers froids et neigeux et des étés secs et chauds. Il se développe généralement entre 1200 et 2200 mètres d'altitude, où la température annuelle moyenne varie entre 6 et 12 °C. Les précipitations sont un facteur déterminant de sa distribution ; l'espèce exige au minimum 600 mm/an, bien répartis, avec une partie significative sous forme de neige, qui alimente la nappe phréatique et prolonge l'humidité du sol durant la saison sèche (Bentouati, 2008).

Dans le Parc National de Bélezma, situé dans une zone à climat semi-aride montagnard, le cèdre pousse dans des conditions limites, avec des précipitations parfois inférieures au seuil minimal, ce qui explique le stress hydrique chronique et les phénomènes de dépérissement observés (Chelli, 2005).

b. Sol

Le cèdre de l'Atlas préfère des sols calcaires, bien drainés, souvent peu profonds, et parfois caillouteux, typiques des pentes et plateaux montagneux. Il est relativement tolérant aux sols pauvres en matière organique, mais sensible à l'asphyxie racinaire en cas de stagnation d'eau. L'épaisseur et la fertilité du sol jouent un rôle crucial dans la vigueur des peuplements et leur capacité de régénération naturelle. Les sols trop superficiels ou exposés à l'érosion sont moins favorables à l'enracinement profond et au développement des jeunes plantules (Kheloui, 2012).

c. Topographie et exposition

La topographie influence fortement la répartition du cèdre. Les versants nord et nord-est, mieux exposés à l'humidité et moins soumis à l'ensoleillement excessif, sont généralement plus favorables. À l'inverse, les versants sud, soumis à une insolation intense, à l'évaporation accrue et à des températures plus élevées, abritent souvent des peuplements plus clairsemés ou dégradés (Briki, 2000). L'altitude conditionne également la répartition verticale du cèdre : trop bas, il souffre de la sécheresse ; trop haut, des températures hivernales extrêmes peuvent freiner sa croissance.

2.2. Les facteurs biotiques influençant le cèdre de l'Atlas

a. Pression du pâturage

Le surpâturage, principalement par les caprins et ovins, constitue l'un des facteurs biotiques majeurs affectant la cédraie. Les jeunes semis de cèdre, souvent tendres et à faible développement racinaire dans les premières années, sont broutés systématiquement, empêchant leur croissance et compromettant le renouvellement naturel des peuplements. Ce phénomène est aggravé par la transhumance non encadrée pratiquée par les éleveurs locaux, notamment au printemps et à l'automne, périodes critiques pour la germination et l'installation des plantules (Messaoudene, 2004).

b. Compétition interspécifique

Le cèdre peut entrer en compétition avec d'autres espèces ligneuses ou herbacées pour les ressources hydriques et nutritives, surtout dans les zones marginales. Dans certaines stations, la colonisation par le chêne vert (*Quercus ilex*) ou des espèces buissonnantes comme le genêt (*Genista*) limite l'espace disponible à la régénération. Cette compétition s'accroît en cas de fragmentation ou de dégradation de la canopée, ce qui ouvre le milieu à des espèces plus opportunistes (Zeraia et al., 2010).

c. Parasites et maladies

Le cèdre de l'Atlas est vulnérable à plusieurs pathogènes et insectes ravageurs, surtout en situation de stress hydrique ou de déséquilibre écologique. Parmi les plus fréquents, on note des attaques de champignons lignivores (comme les *Armillaria*) qui provoquent des pourritures racinaires, ainsi que des infestations par des insectes xylophages (coléoptères de la famille des *Buprestidae* ou des *Scolytidae*). Ces organismes profitent de l'affaiblissement des arbres pour proliférer et accélérer leur dépérissement (Bentouati, 2008).

d. Intervention humaine

Les coupes illégales de bois, le prélèvement de branches pour le chauffage ou la vente, ainsi que l'exploitation anarchique des sous-bois fragilisent les cédraies. De plus, les incendies d'origine humaine, souvent liés aux activités pastorales ou à l'imprudence, ont un impact

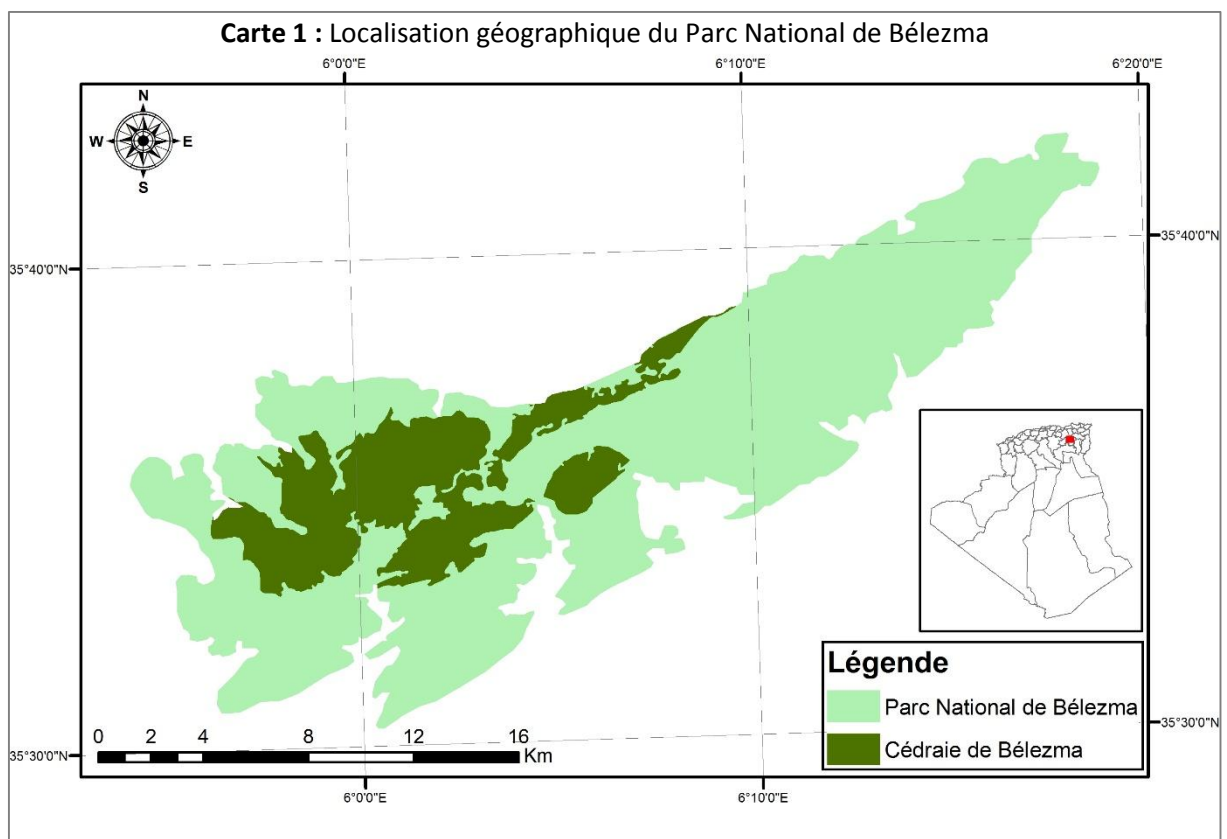
dévastateur sur les peuplements adultes et les jeunes régénérations. Ces incendies favorisent la disparition de la litière et exposent les sols à l'érosion, perturbant les cycles de régénération (Briki, 2000).

2.3. Interactions complexes entre facteurs

Il convient de souligner que les facteurs écologiques et biotiques agissent souvent de manière combinée. Le stress hydrique dû au climat est amplifié par le surpâturage, tandis que les attaques parasitaires se développent plus facilement dans les peuplements affaiblis. Cette synergie négative rend la gestion de la cédraie complexe, car elle nécessite une approche intégrée prenant en compte l'ensemble des interactions entre climat, sol, faune, flore et activités humaines (Zeraia *et al.*, 2010).

3. Le Parc National de Bélezma : contexte géographique et écologique

Le Parc National de Bélezma, situé dans la wilaya de Batna, couvre une superficie de plus de 26 000 hectares, dont une bonne partie est occupée par des cédraies naturelles ou semi-naturelles (Carte 1).



Ce massif représente la limite sud de l'aire de répartition naturelle du cèdre de l'Atlas en Algérie. Il se distingue par un relief montagneux escarpé, atteignant plus de 2000 mètres d'altitude, et une diversité écologique remarquable, où coexistent des espèces méditerranéennes, steppiques et sahariennes (Chelli, 2005).

Climatiquement, le parc est soumis à un régime semi-aride montagnard, avec des précipitations annuelles faibles et mal réparties (environ 400 à 600 mm/an), des étés chauds et secs, et des hivers froids et enneigés. Ces conditions rendent les peuplements forestiers particulièrement sensibles aux aléas climatiques et à la pression anthropique (Kheloui, 2012).

4. Vulnérabilités de la cédraie de Bélezma

La cédraie de Bélezma subit depuis plusieurs décennies un dépérissement progressif, observé principalement dans les zones de basse altitude et à exposition sud-ouest. Plusieurs facteurs sont à l'origine de cette dégradation : le réchauffement climatique, le stress hydrique accru, la surexploitation du bois, les incendies fréquents, et surtout le surpâturage, qui empêche la régénération naturelle du cèdre (Messaoudene, 2004).

Les jeunes semis sont particulièrement exposés au broutement par le bétail, en particulier les chèvres, ce qui empêche leur enracinement et leur croissance. En outre, les changements climatiques entraînent une diminution de la disponibilité en eau, accentuant le stress physiologique des arbres adultes, qui deviennent plus sensibles aux attaques parasitaires et aux maladies cryptogamiques (Bentouati, 2008).

5. Recherches scientifiques sur la cédraie de Bélezma

Les travaux de recherche menés sur la cédraie de Bélezma ont abordé plusieurs aspects, allant de la typologie écologique à la phénologie du cèdre, en passant par la cartographie des zones de dépérissement. Les études pionnières ont permis de classer les différents faciès de la cédraie selon l'altitude, l'exposition et le degré de dégradation (Briki, 2000).

Avec l'avènement des technologies de télédétection, des analyses spatio-temporelles ont été entreprises pour suivre l'évolution des peuplements. Ces études ont révélé une régression préoccupante des cédraies dans certaines zones, avec une baisse de plus de 20 % de la surface forestière entre les années 1990 et 2010 (Kheloui, 2012). En parallèle, des recherches expérimentales ont été menées sur les techniques de reboisement assisté, notamment dans les

zones dégradées, mais les taux de réussite restent faibles en raison des conditions écologiques difficiles (Zeraia *et al.*, 2010).

6. Gestion et perspectives de conservation

Face à l'état alarmant des cédraies, les gestionnaires du Parc National de Bélezma, en collaboration avec les institutions scientifiques, ont mis en place plusieurs actions de conservation. Ces mesures incluent : la clôture des zones de régénération, le suivi sanitaire des peuplements, la lutte contre les incendies, et la sensibilisation des populations locales aux enjeux de préservation (Zeraia *et al.*, 2010).

Cependant, ces actions restent insuffisantes sans une politique de gestion adaptative à long terme, tenant compte des scénarios climatiques futurs. L'intégration des savoirs écologiques locaux, la limitation du surpâturage par des approches agro-sylvo-pastorales, ainsi que l'implication effective des communautés riveraines sont des leviers essentiels pour garantir la résilience des cédraies face aux changements globaux (Messaoudene, 2004).

Chapitre 11 :

Approche méthodologique et outils géospatiaux

Chapitre II : Approche méthodologique et outils géospatiaux

1. Approche méthodologique

L'approche méthodologique adoptée pour l'étude de l'évolution spatio-temporelle de la cédraie du Parc National de Bélezma repose sur plusieurs étapes.

1.1. Acquisition des images satellitaires

Dans le domaine de l'observation de la Terre, et plus particulièrement pour les capteurs opérant dans le spectre visible et le proche infrarouge, la série de satellites LANDSAT a été privilégiée pour deux raisons majeures :

- ✓ LANDSAT constitue le plus ancien programme de télédétection spatiale, ce qui permet de disposer d'une archive historique de données remontant à plus de 40 ans, essentielle pour les analyses multi-dates.
- ✓ Depuis mai 2014, les images acquises par les satellites LANDSAT 5, 8 et 9 sont librement accessibles via la plateforme en ligne de l'USGS. Elles sont fournies aux niveaux de traitement L1T (comprenant les corrections géométriques et orthorectification) et 2A (intégrant les corrections atmosphériques), garantissant ainsi une qualité et une cohérence spatiale adaptées aux analyses scientifiques.

1.2. Sélection des dates et niveau de correction des images

Dans le cadre d'une étude multi-dates de la végétation, le choix de la date de prise de vue est crucial, car les conditions sur le terrain varient considérablement selon les saisons. La sélection de la date optimale repose sur la nécessité d'obtenir des images sans couverture nuageuse, permettant une reconnaissance claire des éléments du paysage. Il est essentiel de limiter les risques de confusion, notamment entre les différentes classes de végétation. En effet, la présence de plantes herbacées annuelles durant la période de croissance peut entraîner des confusions avec les espèces ligneuses. Étant donné que l'imagerie satellitaire de la végétation s'appuie sur l'activité photosynthétique, nous avons privilégié la saison sèche, s'étendant de juin à septembre, comme période de référence.

En ce qui concerne le choix du niveau de traitement des images, nous avons choisi d'utiliser les images LANDSAT Level-1 plutôt que les produits Level-2 afin de maîtriser et personnaliser le processus de prétraitement, notamment la calibration radiométrique et les corrections atmosphériques. Les images Level-1 sont des données de base géométriquement corrigées (orthorectifiées), mais elles conservent les valeurs radiométriques d'origine, ce qui nous permet d'appliquer nos propres méthodes de correction adaptées aux conditions locales (topographie, atmosphère, saison). Cette approche offre une meilleure transparence sur les étapes de traitement, un contrôle accru sur la qualité des données, et garantit la cohérence méthodologique tout au long de l'étude. En revanche, les produits Level-2, bien qu'ils soient déjà corrigés radiométriquement et atmosphériquement, reposent sur des modèles standards qui peuvent ne pas être optimisés pour les spécificités régionales du site d'étude.

1.3. Prétraitement des images acquises

1.3.1. Calibration radiométrique

La calibration radiométrique est une étape essentielle dans le traitement des images lorsqu'on souhaite accéder à des propriétés physiques quantifiables des surfaces. Elle permet de comparer les résultats obtenus avec des mesures de terrain, de réaliser des analyses à différentes dates, ou d'assurer la reproductibilité d'une méthode d'identification ou de classification. Cette opération consiste à convertir les niveaux de gris (codés sur 8 bits) en luminances apparentes perçues par le capteur (Bennari, 1996).

Lors de l'étape de calibration radiométrique, la limite du Parc National de Bélezma a été utilisée comme zone d'intérêt (Region of Interest, ROI) pour le découpage spatial des images Landsat. Cette délimitation précise nous a permis de concentrer les traitements uniquement sur la zone concernée par l'étude, en excluant les zones extérieures non pertinentes. Ce choix a non seulement optimisé le temps de traitement et les ressources informatiques, mais a également permis de réduire les effets parasites liés aux zones environnantes (zones urbaines, cultures, etc.) pouvant fausser l'analyse radiométrique. En se focalisant strictement sur le périmètre du parc, nous avons ainsi assuré une meilleure cohérence spatiale et une plus grande précision des résultats dans l'analyse de l'évolution de la cédraie (Figure 1).

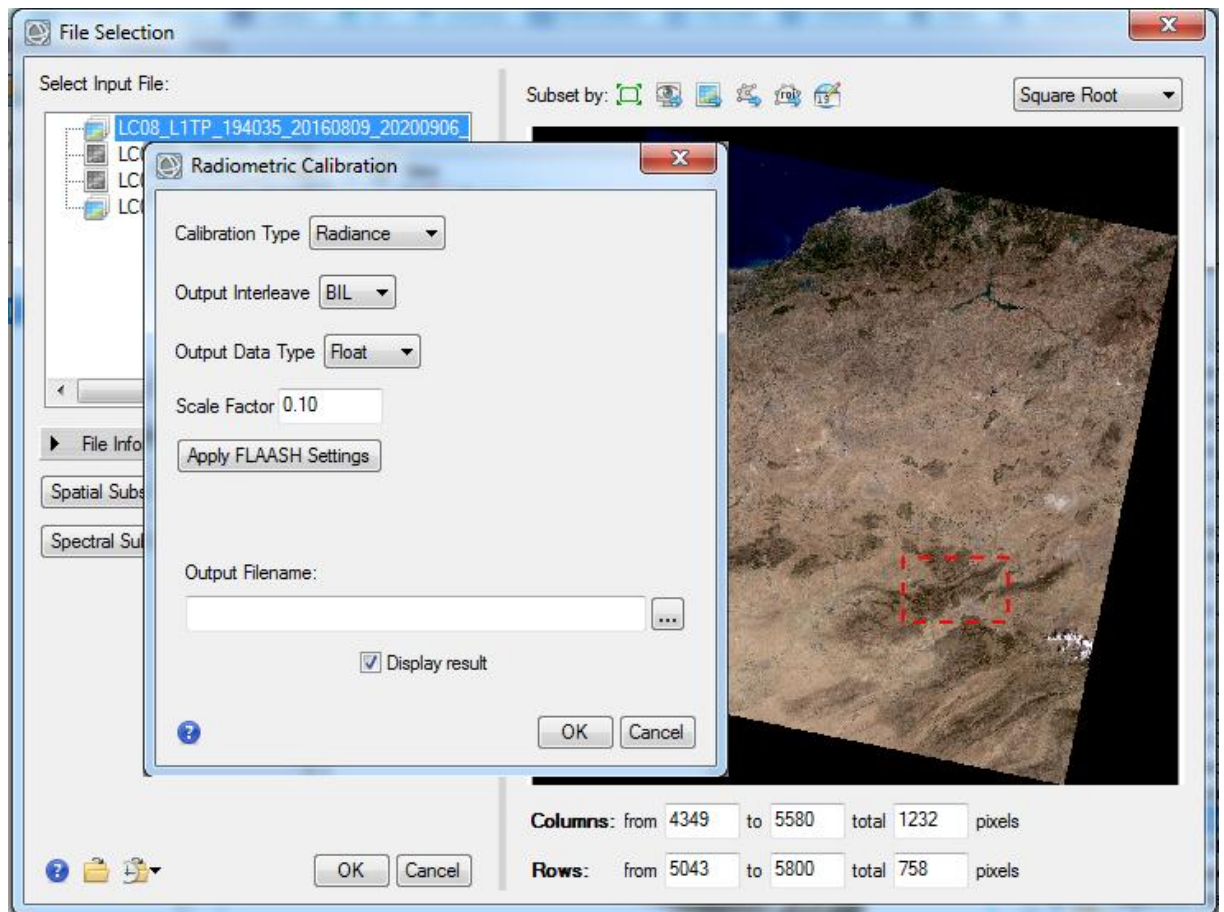


Figure 1 : Calibration radiométrique des images Landsat

1.3.2. Corrections atmosphériques

La diffusion, l'absorption et la réfraction sont les trois principales sources de perturbation du signal électromagnétique lors de sa traversée de l'atmosphère. Grâce à des modèles de correction atmosphérique, il est possible de réduire partiellement ces effets. Toutefois, ces modèles restent approximatifs, car ils reposent sur des hypothèses simplificatrices (Gao *et al.*, 2009). Pour garantir la comparabilité des données, il est donc essentiel que toutes les scènes soient normalisées.

Les corrections atmosphériques deviennent indispensables lorsque le traitement des images satellitaires vise à :

- accéder à des valeurs physiques de réflectance de surface (Corgne, 2004) ;
- réaliser des comparaisons multi-dates entre des images issues du même capteur ou de capteurs différents (Samaali, 2014) ;
- assurer la reproductibilité de méthodes d'identification ou de classification de surface, sans avoir à répéter l'analyse d'échantillons sur chaque image (Kergomard, 1990).

Plusieurs approches peuvent être utilisées pour effectuer ces corrections. Parmi elles, la méthode FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes) est considérée par de nombreux auteurs comme la plus performante. Elle permet une conversion précise entre la luminance et la réflectance, offrant une meilleure fiabilité que les autres méthodes (Figure 2).

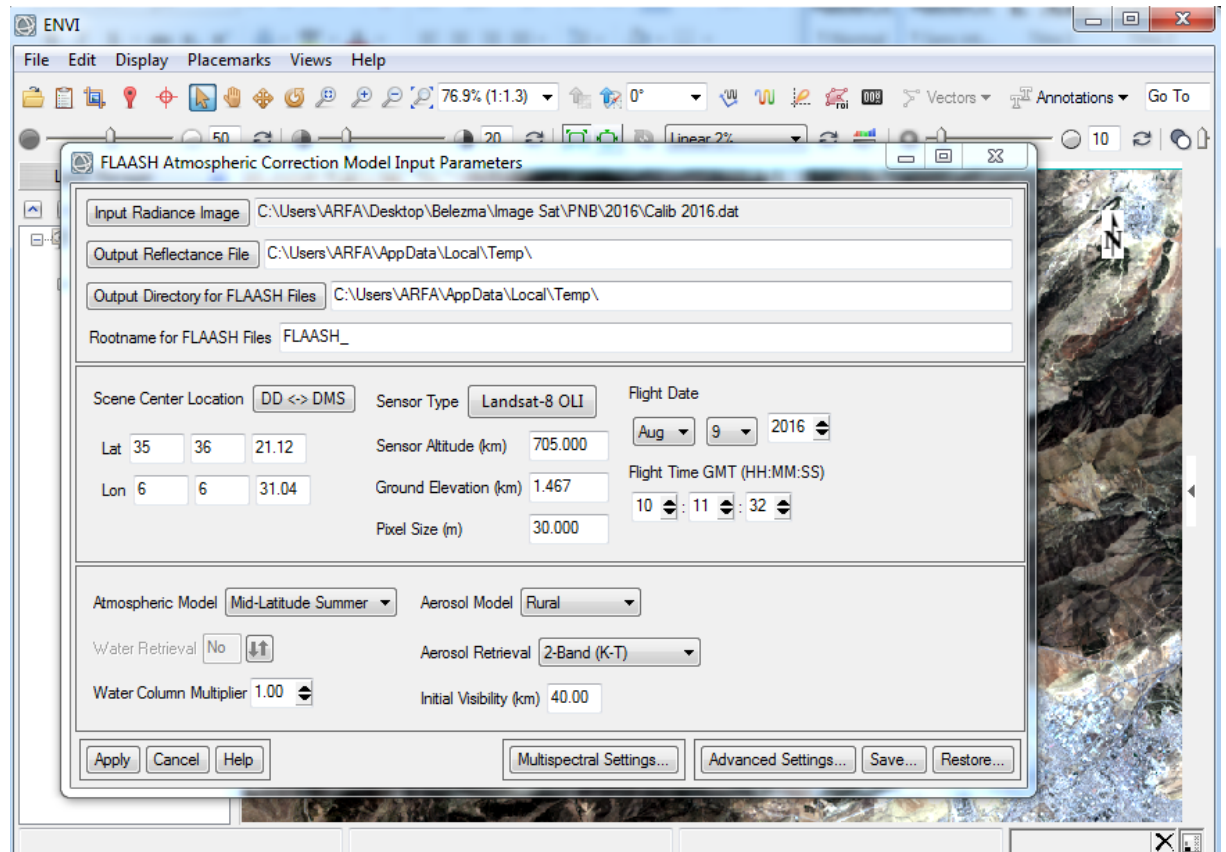


Figure 2 : Correction atmosphérique des images Landsat

1.4. Traitement des images corrigées et analyse des résultats

1.4.1 Calcul de l'indice de végétation NDVI

Le calcul de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) constitue une étape essentielle dans l'analyse de la végétation à partir d'images satellitaires. Cet indice repose sur l'exploitation des réflectances dans le proche infrarouge (NIR) et le rouge (RED), en appliquant la formule suivante : $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$ (Figure 3). Les valeurs de NDVI varient entre -1 et +1, les valeurs positives indiquant la présence de végétation, tandis que les valeurs proches de zéro ou négatives correspondent à des surfaces non végétalisées telles que

l'eau, les sols nus ou les zones urbaines. L'intérêt du NDVI réside dans sa capacité à discriminer les types de couvert végétal et à évaluer leur densité et leur vigueur, ce qui en fait un outil particulièrement utile pour la surveillance environnementale, le suivi de la dynamique forestière et les études écologiques à grande échelle (Rouse *et al.*, 1974). Dans les régions méditerranéennes, et notamment en milieu montagneux comme le Parc National de Bélezma, le NDVI a déjà prouvé son efficacité pour le suivi spatio-temporel des peuplements forestiers, notamment les formations à cèdre de l'Atlas (Bannari *et al.*, 1995; Gitas *et al.*, 2009).

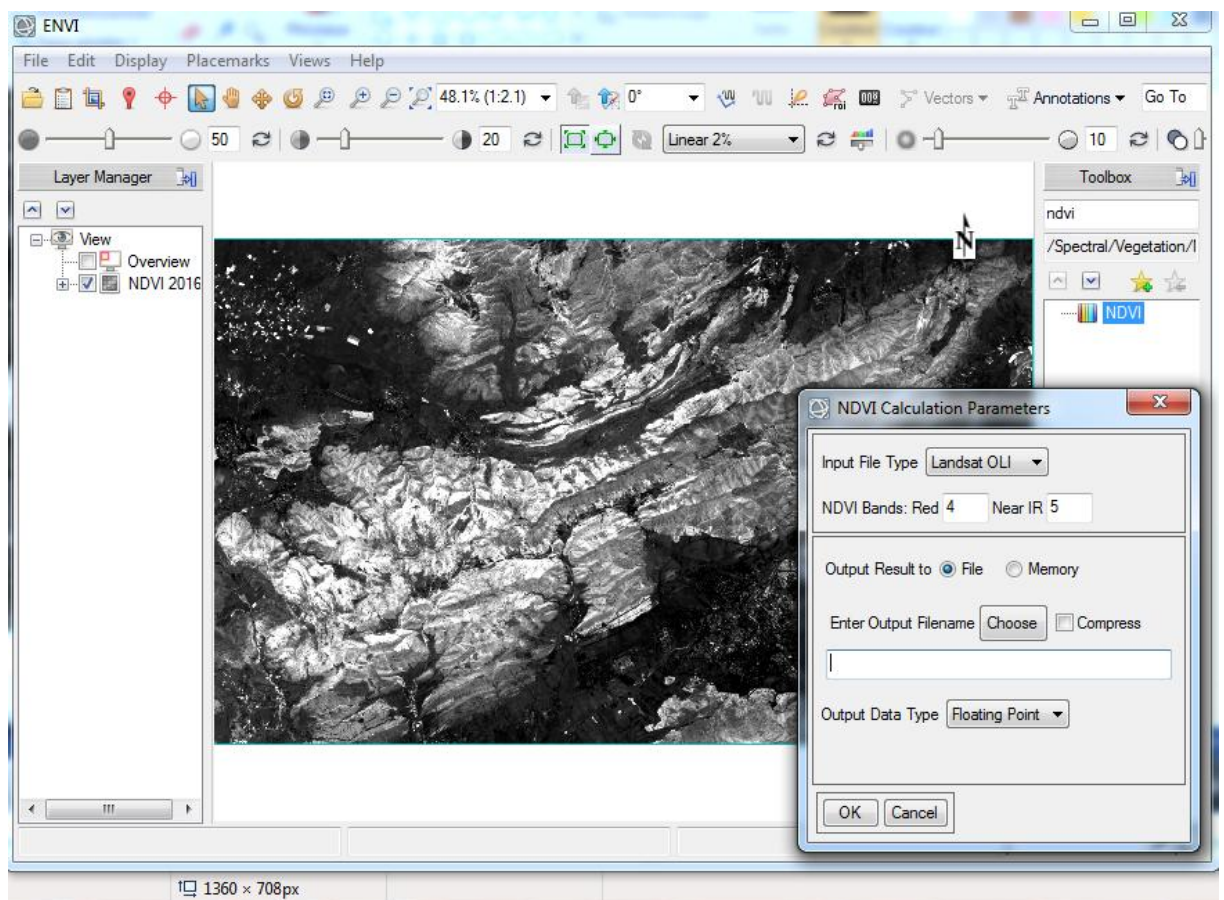


Figure 3 : Calcul de l'NDVI des images Landsat

1.4.2. Classification de l'NDVI

La classification de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) constitue une méthode essentielle pour l'analyse de l'évolution de la cédraie du Parc National de Bélezma. Le NDVI permet de mesurer la densité et la vitalité de la végétation à partir des données satellitaires. Dans cette étude, une classification spécifique a été adoptée pour refléter les conditions locales de la cédraie. Cinq classes de valeurs ont été définies :

- 1) < 0.2 correspondant aux zones non végétalisées (sols nus, zones dégradées, clairières) ;
- 2) $[0.2 - 0.3]$ représentant une végétation très faible, zones en déclin ou en dégradation ;
- 3) $[0.3 - 0.4]$ indiquant une cédraie modérément dense (stress hydrique, vieillissement) ;
- 4) $[0.4 - 0.5]$ traduisant une cédraie en bon état, feuillage persistant malgré l'été sec ;
- 5) > 0.5 , correspondant aux peuplements denses et sains de Cèdre de l'Atlas.

Cette classification permet de détecter les changements spatiaux dans la couverture forestière, d'identifier les zones de régression ou de régénération, et de produire des cartes thématiques précises facilitant la gestion écologique et le suivi de cette espèce forestière emblématique.

Lors du processus de classification de l'indice de végétation NDVI, la limite géographique de la cédraie du Parc National de Bélezma (environ 5700 ha, incluant la cédraie pure et la cédraie en mélange avec le chêne vert) a été utilisée comme masque spatial afin d'extraire uniquement la zone d'étude pertinente. Cette étape a consisté à découper le raster NDVI à l'aide du périmètre précis de la cédraie, préalablement défini à partir de données vectorielles (format shapefile). Ce découpage a permis de concentrer l'analyse exclusivement sur les peuplements de *Cedrus atlantica*, en excluant les zones forestières environnantes ou non boisées. L'application de cette méthode garantit une meilleure précision dans l'évaluation des dynamiques spatio-temporelles de la cédraie, tout en optimisant le traitement des données et la qualité des résultats cartographiques obtenus.

1.4.3. Comparaison multi-dates des classes de l'NDVI

La comparaison multi-dates des classes de l'indice de végétation NDVI constitue une méthode essentielle pour analyser l'évolution spatio-temporelle de la couverture végétale, notamment dans le cas des formations forestières comme la cédraie du Parc National de Bélezma. En comparant les classifications NDVI issues d'images satellitaires acquises à différentes dates, il est possible d'identifier les changements intervenus au sein des différentes classes de végétation. Cette approche permet de détecter les dynamiques de régression (passage vers des classes de NDVI plus faibles), de stabilité (maintien dans la même classe) ou de régénération (évolution vers des classes de NDVI plus élevées). L'analyse comparative multi-temporelle repose sur des techniques de croisement de couches (cross-tabulation) et de matrices de changement, offrant ainsi une lecture claire de l'évolution de l'état de santé de la végétation.

Elle constitue un outil d'aide à la décision pour la gestion durable des écosystèmes forestiers et la planification des interventions de conservation ou de restauration.

1.4.4. Expression des résultats sous forme de cartes, tableaux et graphiques

L'expression des résultats issus de la comparaison multi-dates des classes NDVI repose sur une présentation claire et structurée des changements détectés dans la végétation entre les différentes périodes d'observation. Les cartes de changement permettent de visualiser, de manière spatiale, les transitions entre classes NDVI, telles que la dégradation (passage à une classe inférieure), la stabilité ou la régénération (passage à une classe supérieure). Ces cartes mettent en évidence les zones concernées par des dynamiques écologiques significatives. En parallèle, des tableaux croisés (ou matrices de changement) quantifient les transitions entre classes NDVI, en indiquant les surfaces (en hectares ou en pourcentage) passées d'une classe à une autre entre deux dates. Enfin, des graphiques comparatifs synthétisent l'évolution des superficies de chaque classe NDVI au fil du temps, offrant une vue globale des tendances observées. Cette combinaison d'outils visuels et quantitatifs permet une interprétation précise des transformations écologiques, facilitant le suivi de l'état de la cédraie et la prise de décision en matière de gestion forestière.

2. Outils géospatiaux utilisés

2.1. Les images satellitaires

Dans le cadre de cette étude, des images satellitaires issues des capteurs LANDSAT 5 TM, LANDSAT 8 OLI et LANDSAT 9 OLI-2 ont été utilisées pour l'analyse de l'évolution de la cédraie du Parc National de Bélezma. Ces données ont été choisies en raison de leur résolution spatiale de 30 mètres, adaptée à l'échelle d'analyse paysagère, ainsi que pour leur continuité temporelle, permettant une comparaison multi-dates cohérente sur plusieurs décennies. Les images LANDSAT 5, couvrant la période 1984–2012, ont permis de reconstituer l'état historique de la végétation, tandis que LANDSAT 8 (lancé en 2013) et LANDSAT 9 (opérationnel depuis 2021) ont servi à caractériser l'état plus récent de la cédraie. Tous ces capteurs fournissent les bandes spectrales nécessaires au calcul de l'indice NDVI, notamment les bandes rouge (Red) et proche infrarouge (NIR), essentielles pour l'évaluation de la biomasse et de la vigueur de la végétation (Tableau 1).

Leur disponibilité gratuite via la plateforme USGS, leur précision radiométrique et leur fréquence de revisite de 16 jours font des satellites LANDSAT une source de données fiable et largement utilisée pour les études environnementales à long terme.

Tableau 1 : Caractéristiques des satellites Landsat utilisés (United States Geological Survey)

| Satellite | Capteur | Période de fonctionnement | Résolution spatiale | Bandes utilisées pour le NDVI | Fréquence de revisite | Source |
|-----------|----------------------------------|---------------------------|---------------------|-----------------------------------|-----------------------|----------------------|
| LANDSAT 5 | TM (Thematic Mapper) | 1984 – 2012 | 30 mètres | Bande 3 (Rouge), Bande 4 (NIR) | 16 jours | USGS / EarthExplorer |
| LANDSAT 8 | OLI (Operational Land Imager) | Depuis 2013 | 30 mètres | Bande 4 (Rouge), Bande 5 (NIR) | 16 jours | USGS / EarthExplorer |
| LANDSAT 9 | OLI-2 | Depuis 2021 | 30 mètres | Bande 4 (Rouge), Bande 5 (NIR) | 16 jours | USGS / EarthExplorer |

Les capteurs OLI et OLI-2 présentent une meilleure calibration radiométrique que TM. Les données ont été préférées au niveau 1 pour permettre un traitement personnalisé, notamment la calibration radiométrique et les corrections atmosphériques (Roy *et al.*, 2014).

2.2. Les logiciels de traitement

Les images LANDSAT 5, 8 et 9 ont été téléchargées depuis le portail EarthExplorer de l'USGS, qui offre un accès libre aux données satellitaires à différentes résolutions et périodes.

Pour le traitement, l'analyse et la représentation des données satellitaires, deux logiciels principaux ont été mobilisés : ENVI 5.3 et ArcGIS 10.8.

Le logiciel ENVI 5.3 (Environment for Visualizing Images) a été utilisé principalement pour les étapes de prétraitement, incluant la calibration radiométrique, la correction atmosphérique et le calcul de l'indice NDVI, grâce à ses outils performants de traitement d'images multi-spectrales. La classification des valeurs NDVI, quant à elle, a été réalisée dans ArcGIS 10.8 à l'aide de l'outil "Reclassify" du module Spatial Analyst, permettant d'assigner des classes spécifiques aux plages de valeurs du NDVI selon la densité de la végétation.

ArcGIS a également été utilisé pour la gestion des couches vectorielles, le découpage des rasters selon la limite de la cédraie, la génération de cartes thématiques, ainsi que l'analyse spatiale des changements entre différentes dates. L'interopérabilité entre ENVI et ArcGIS a permis de mettre en place une chaîne de traitement rigoureuse et cohérente pour l'étude spatio-temporelle de l'évolution de la cédraie du Parc National de Bélezma.

3. Relevé de terrain pour valider les données des images satellites

Afin de garantir la fiabilité des résultats issus du traitement des images satellites, des relevés de terrain ont été réalisés dans le Parc National de Bélezma. Cette sortie a permis de valider la classification des données NDVI en confrontant les valeurs attribuées par télédétection à la réalité écologique observée sur le terrain. Les zones visitées ont été sélectionnées en fonction de leur accessibilité et de leur représentativité des différentes classes NDVI définies lors de la classification. À chaque point de contrôle, des observations directes ont été effectuées concernant la densité de la végétation, l'état sanitaire des cèdres, la couverture du sol, ainsi que la présence éventuelle de dégradations (pâturage, coupe, sécheresse). Les coordonnées géographiques de chaque site ont été enregistrées à l'aide d'un GPS, ce qui a permis de croiser les données terrain avec les couches spatiales dans ArcGIS. Cette étape de vérification est cruciale pour assurer la validité scientifique de l'analyse, en corrigeant si nécessaire certaines imprécisions liées à la classification des images satellites. Elle renforce ainsi la pertinence des résultats obtenus pour le suivi écologique de la cédraie.

Chapitre III :

Résultats et discussion

Chapitre III : Résultats et discussion

1. Dates et caractéristiques des images LANDSAT choisies

Entre 1984 et 2025, un total de 848 scènes LANDSAT a été recensé pour la zone du Parc National de Bélezma. Après une vérification rigoureuse et l'exclusion des images présentant une couverture nuageuse importante, 214 dates ont été retenues. Parmi celles-ci, 150 images correspondent à des acquisitions réalisées durant la saison sèche, en août, mois choisi pour cette étude afin de garantir une homogénéité saisonnière dans l'analyse.

Dans le but d'assurer un suivi temporel cohérent et représentatif de l'évolution de la végétation sur le long terme, cinq images-clés ont été sélectionnées. La première date du 20 août 1985, et la plus récente du 7 août 2024, couvrant ainsi une période d'observation de trente-neuf ans. Trois dates intermédiaires ont été choisies en fonction de la disponibilité et de la qualité des scènes satellites :

- le 13 août 1994,
- le 8 août 2004,
- et le 9 août 2016.

Ces cinq images, toutes acquises au mois d'août, permettent de réaliser une analyse multi-date de l'évolution de la cédraie en minimisant les biais liés à la variabilité saisonnière de la végétation.

Tableau 2 : Dates et caractéristiques des images LANDSAT choisies

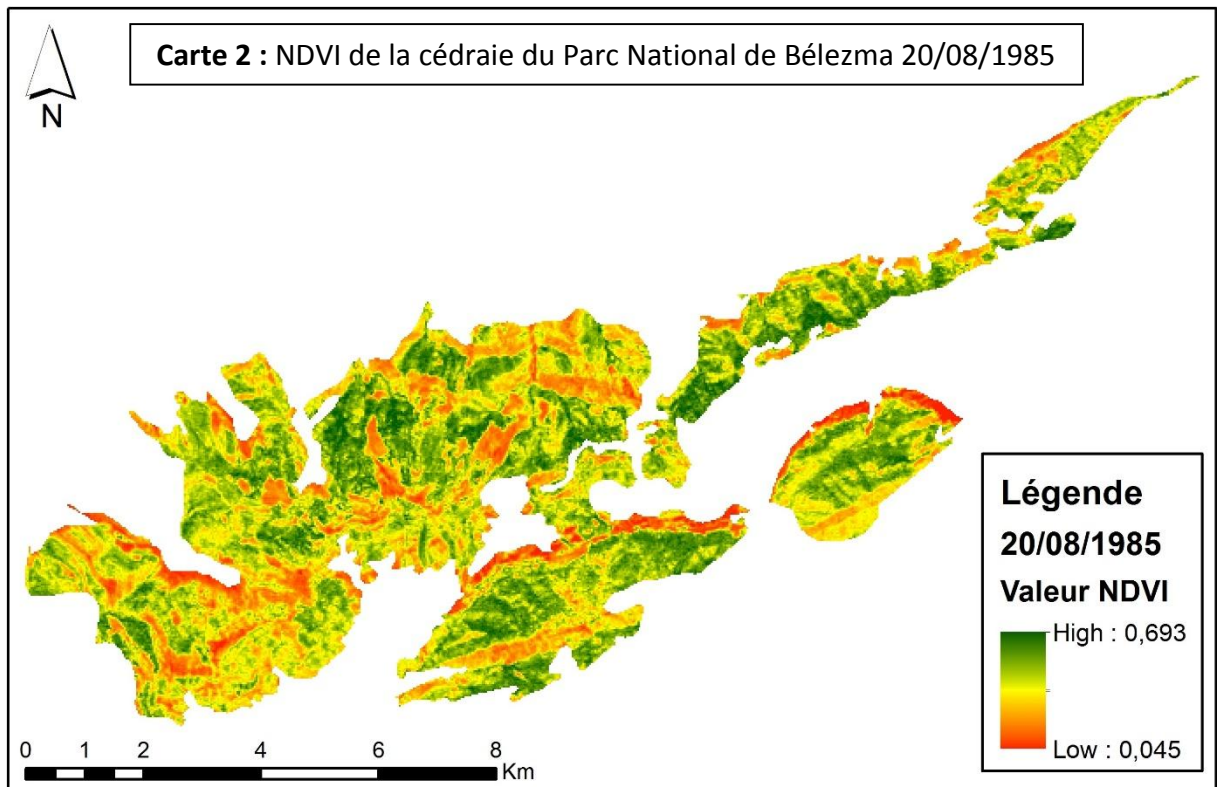
| Satellites | Dates | Références | Nuages |
|---------------|------------|--|--------|
| LANDSAT TM 5 | 20/08/1985 | LT05_L1TP_194035_19850820_20200918_02_T1 | 0% |
| LANDSAT TM 5 | 13/08/1994 | LT05_L1TP_194035_20040808_20200903_02_T1 | 0% |
| LANDSAT TM 5 | 08/08/2004 | LT05_L1TP_194035_19940813_20200913_02_T1 | 0% |
| LANDSAT OLI 8 | 09/08/2016 | LC08_L1TP_194035_20160809_20200906_02_T1 | 0% |
| LANDSAT OLI 9 | 07/08/2024 | LC09_L1TP_194035_20240807_20240807_02_T1 | 0% |

2. Résultats du calcul de l'NDVI

L'analyse des valeurs de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) révèle une variabilité significative de la couverture végétale dans le Parc National de Bélezma durant la période 1985-2024.

2.1. Discussion des résultats NDVI pour l'année 1985

Pour l'année 1985, l'analyse de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) appliquée à la cédraie du Parc National de Bélezma révèle des valeurs comprises entre 0,045 et 0,693, avec une valeur moyenne de 0,413 (Carte 2).



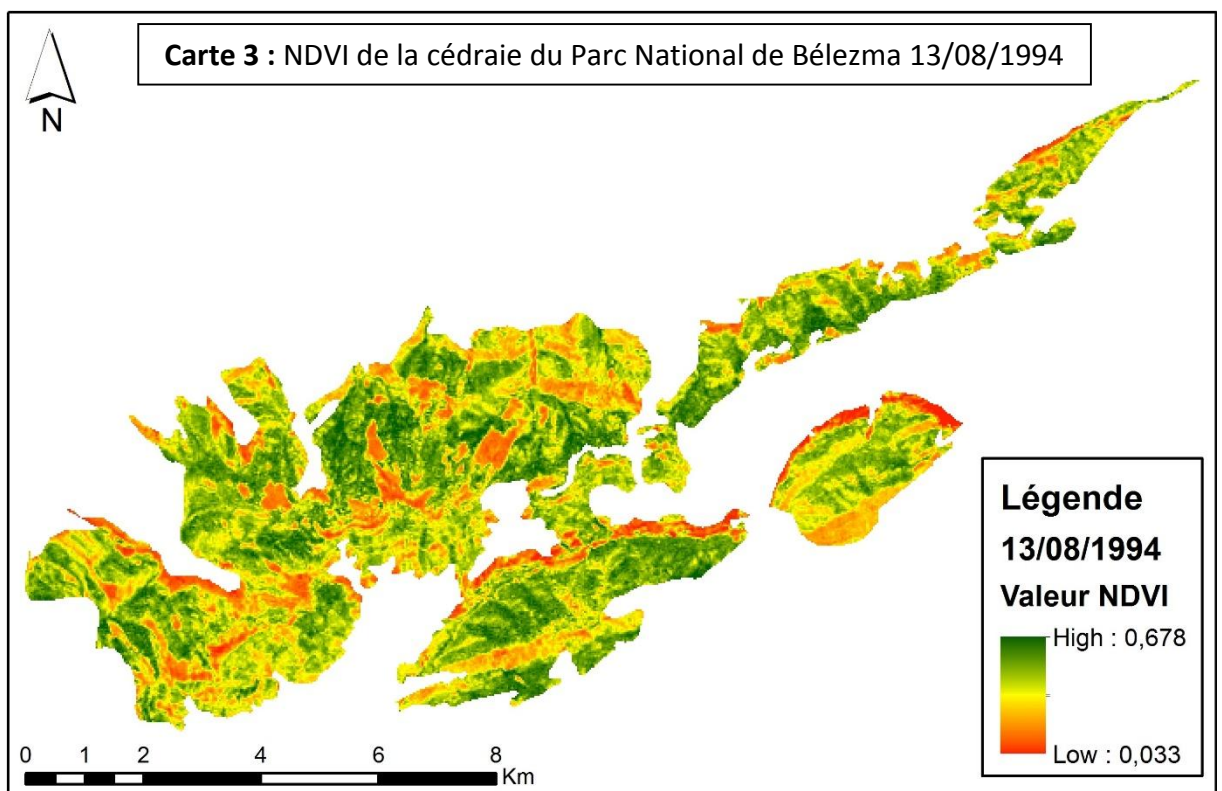
La valeur minimale de 0,045 correspond à des zones très faiblement végétalisées, voire dégradées. Il peut s'agir de surfaces rocheuses, de sols nus, de zones fortement anthropisées, ou encore d'espaces affectés par des perturbations écologiques telles que le surpâturage ou des coupes forestières anciennes. Ces faibles valeurs indiquent une activité photosynthétique quasi inexistante et peuvent témoigner d'une perte de densité du couvert forestier.

La valeur maximale de 0,693 traduit, au contraire, la présence de zones densément végétalisées et bien conservées. Ces zones sont probablement constituées de cèdres adultes en bon état de santé, présentant une forte biomasse et une activité chlorophyllienne importante. Cette valeur élevée suggère l'existence, en 1985, de noyaux forestiers encore intacts ou peu affectés par les pressions humaines et environnementales.

La valeur moyenne de 0,413 indique une végétation globalement modérée sur l'ensemble de la cédraie. Ce résultat reflète une certaine hétérogénéité spatiale : d'une part, des peuplements bien conservés, et d'autre part, des zones clairsemées ou dégradées. Cela suggère que dès 1985, la cédraie du parc national n'était pas dans un état totalement homogène, et que certains déséquilibres écologiques ou dynamiques de dégradation étaient déjà perceptibles.

2.2. Discussion des résultats NDVI pour l'année 1994

Pour l'année 1994, les valeurs de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) pour la cédraie du Parc National de Bélezma varient entre 0,033 et 0,678, avec une valeur moyenne de 0,412 (Carte 3).



La valeur minimale, légèrement plus basse qu'en 1985 (0,033 contre 0,045), indique l'existence de zones très peu végétalisées, voire totalement dénudées. Cette baisse suggère une légère extension des surfaces dégradées ou une intensification des perturbations (incendies, coupes, surpâturage), affectant la régénération naturelle du cèdre dans certaines zones du parc.

La valeur maximale, bien que toujours élevée (0,678), est légèrement inférieure à celle de 1985 (0,693). Cela pourrait indiquer une baisse de densité ou de vigueur de la végétation dans les zones historiquement bien conservées. Cette variation peut résulter d'événements ponctuels (sécheresse, attaques parasitaires) ou d'une pression anthropique accrue sur des secteurs sensibles.

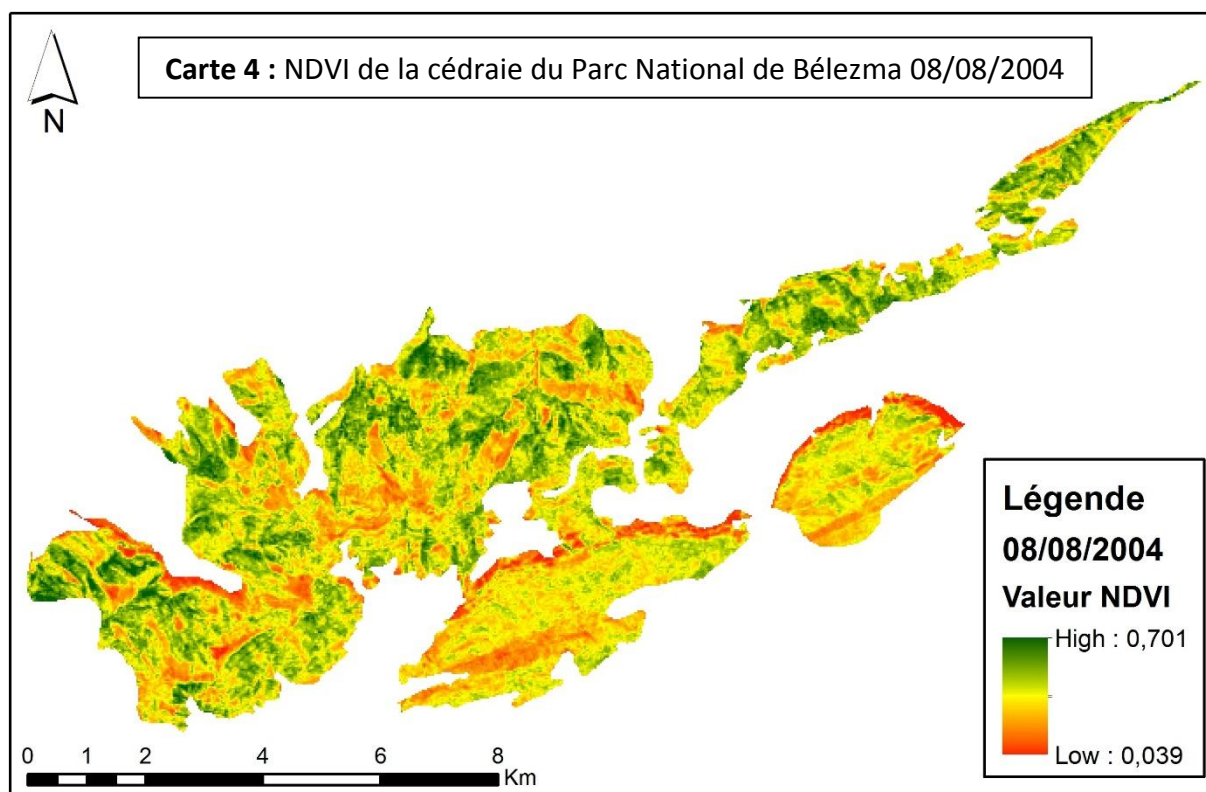
La valeur moyenne, quasiment identique à celle de 1985 (0,412 contre 0,413), traduit une stabilité apparente à l'échelle globale, mais masque probablement des dynamiques locales contrastées. Il est possible que certaines zones aient connu une dégradation, compensée par la régénération ou la stabilité d'autres parties de la cédraie. Cette moyenne stable souligne donc l'importance de procéder à une analyse spatiale plus fine pour bien cerner les zones en régression et celles en évolution positive.

2.3. Discussion des résultats NDVI pour l'année 2004

Pour l'année 2004, les valeurs de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) pour la cédraie du Parc National de Bélezma s'étendent de 0,039 à 0,701, avec une valeur moyenne de 0,400 (Carte 4).

La valeur minimale, bien que supérieure à celle enregistrée en 1994 (0,039 contre 0,033), reste globalement faible. Elle continue de traduire la présence de zones à très faible densité végétale, probablement marquées par la dégradation ou l'absence de régénération forestière. Toutefois, cette légère remontée pourrait suggérer une stabilisation ou une réduction partielle des zones les plus dénudées par rapport à 1994.

En revanche, la valeur maximale, qui atteint 0,701, est la plus élevée parmi les trois dates analysées jusque-là. Cette augmentation témoigne de la présence de zones densément végétalisées, où les peuplements de cèdres semblent vigoureux et bien établis. Elle peut refléter des conditions climatiques plus favorables cette année-là, des efforts de protection ou simplement une bonne santé de certains noyaux de la cédraie.

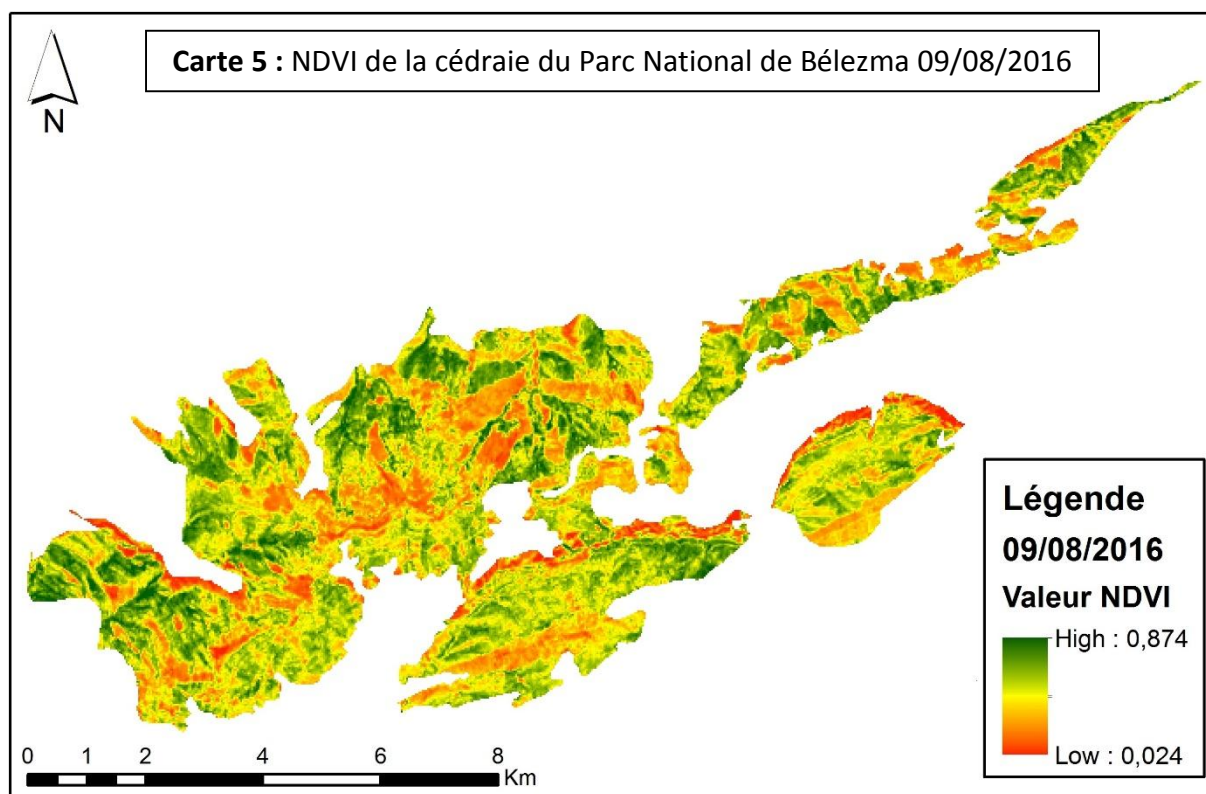


La valeur moyenne, estimée à 0,400, marque une légère baisse par rapport aux années précédentes (0,413 en 1985 et 0,412 en 1994). Bien que peu significative numériquement, cette diminution peut signaler une dégradation progressive de certaines zones, réduisant la surface globalement bien végétalisée. Elle peut également traduire un déséquilibre dans la répartition spatiale de la végétation : une concentration de NDVI élevés dans certaines zones et une extension de valeurs basses dans d'autres.

2.4. Discussion des résultats NDVI pour l'année 2016

En 2016, les valeurs de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) pour la cédraie du Parc National de Bélezma varient entre 0,025 et 0,874, avec une valeur moyenne de 0,480 (Carte 5).

La valeur minimale, très faible (0,025), indique l'existence de zones totalement ou presque totalement dépourvues de végétation. Cette baisse par rapport aux années précédentes pourrait s'expliquer par l'amplification de phénomènes de dégradation, tels que les incendies, le surpâturage intensif, l'érosion, ou encore la progression d'espaces rocheux ou arides. Ces résultats traduisent une fragilité croissante de certains secteurs du parc.



En revanche, la valeur maximale, qui atteint 0,874, est la plus élevée depuis le début de la période étudiée. Elle témoigne d'un développement très dense de la végétation dans certaines zones de la cédraie, traduisant une forte activité photosynthétique. Cela peut être le résultat de conditions climatiques exceptionnellement favorables cette année-là, d'efforts de conservation locaux, ou encore de la régénération naturelle réussie dans certains peuplements de cèdres.

La valeur moyenne, quant à elle, marque une hausse notable en atteignant 0,480, contre 0,400 en 2004. Cette augmentation importante indique une amélioration globale de la couverture végétale dans la cédraie, ce qui pourrait suggérer une dynamique positive de régénération forestière, ou au moins une stabilisation et une croissance des zones à végétation intermédiaire vers un couvert plus dense.

Toutefois, cette progression moyenne doit être nuancée par la forte variabilité intra-spatiale que révèlent les extrêmes. La présence simultanée de NDVI très bas et très élevés confirme une polarisation du paysage forestier : certaines zones s'améliorent sensiblement, tandis que d'autres continuent de se dégrader. Cette dynamique en mosaïque reflète des conditions écologiques contrastées à l'échelle locale, nécessitant une gestion différenciée et ciblée selon l'état de conservation de chaque zone.

Il convient également de prendre en compte le changement de capteur dans l'interprétation des résultats. Les images des années 1985, 1994 et 2004 ont été acquises à l'aide du capteur TM (Thematic Mapper) embarqué sur les satellites LANDSAT 5, tandis que l'image de 2016 provient du capteur OLI (Operational Land Imager) de LANDSAT 8.

Bien que les deux capteurs soient calibrés pour assurer une certaine continuité radiométrique, des différences dans la réponse spectrale, la résolution radiométrique (OLI offrant une meilleure dynamique sur 12 bits contre 8 bits pour TM), et la sensibilité des bandes spectrales peuvent influencer légèrement les valeurs de NDVI obtenues. Ainsi, la hausse significative du NDVI moyen en 2016 (0,480), par rapport aux années précédentes, peut partiellement s'expliquer par les performances accrues du capteur OLI, en plus des facteurs écologiques ou climatiques réels.

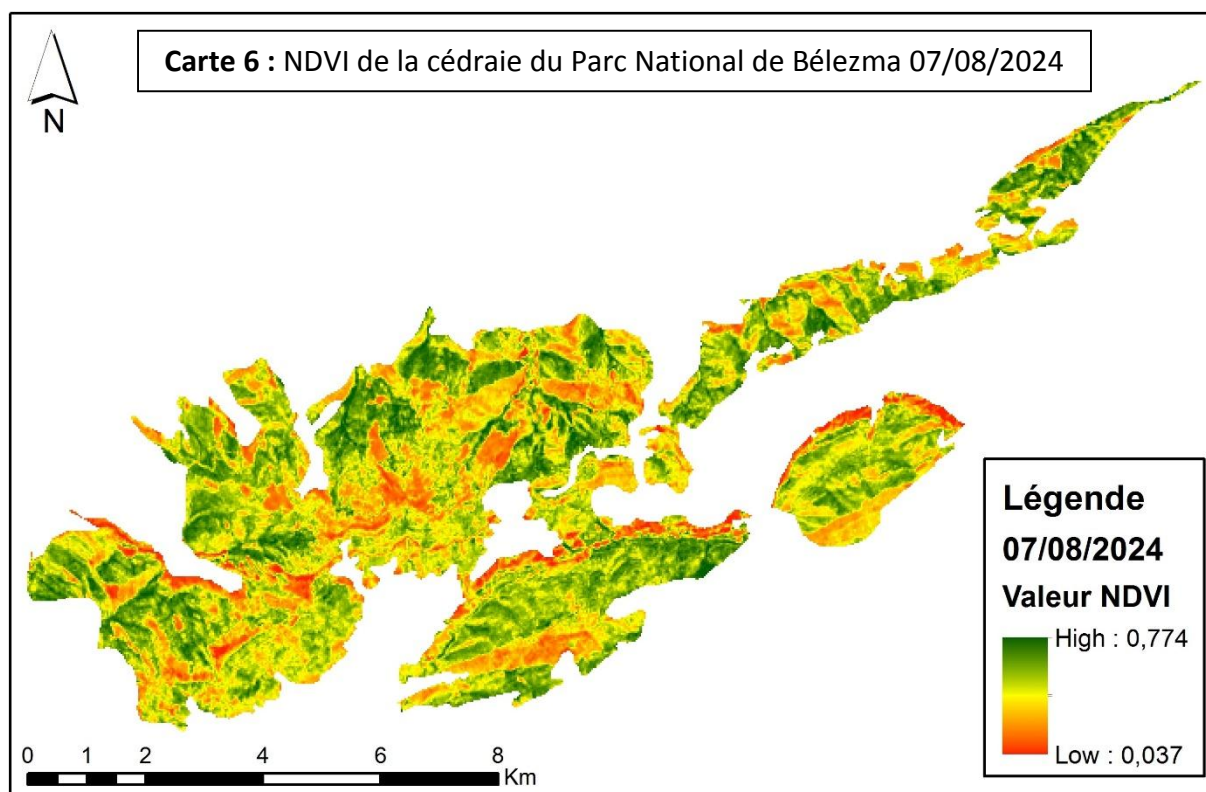
Pour atténuer cet effet, des corrections intercapteurs (comme des normalisations radiométriques ou des ajustements statistiques) peuvent être envisagées dans les analyses avancées, afin de mieux isoler les changements environnementaux réels des variations dues à la technologie.

2.5. Discussion des résultats NDVI pour l'année 2024

Pour l'année 2024, les valeurs de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) dans la cédraie du Parc National de Bélezma varient entre 0,037 et 0,774, avec une valeur moyenne de 0,448 (Carte 6).

La valeur minimale, estimée à 0,037, reste proche de celles enregistrées en 1985 (0,045) et en 2004 (0,039), indiquant la persistance de zones faiblement végétalisées, voire totalement dégradées. Ces secteurs, probablement soumis à des pressions anthropiques continues (pâturage, incendies, absence de régénération), représentent des zones critiques où l'intervention de gestion est toujours nécessaire.

La valeur maximale de 0,774, bien qu'inférieure à celle observée en 2016 (0,874), reste relativement élevée, suggérant l'existence de noyaux de végétation dense et active dans certaines parties de la cédraie. Ces zones pourraient correspondre à des peuplements matures de cèdres bien installés, bénéficiant de conditions écologiques favorables ou de mesures de conservation efficaces.



La valeur moyenne du NDVI, qui s'établit à 0,448, marque une légère baisse par rapport à 2016 (0,480), mais demeure nettement supérieure aux moyennes enregistrées avant cette date (entre 0,400 et 0,413). Cette tendance indique que, malgré une légère régression récente, la cédraie conserve en 2024 un niveau de végétation supérieur à celui observé pendant les trois premières décennies de l'étude (1985–2004). Cela peut être interprété comme un effet cumulatif positif de certains processus de régénération naturelle ou d'interventions de gestion, mais aussi comme un signe de vulnérabilité structurelle, notamment face aux changements climatiques ou aux nouvelles pressions environnementales.

Par ailleurs, il est important de rappeler que, comme pour l'année 2016, les données de 2024 ont été acquises à l'aide du capteur OLI-2 de LANDSAT 9, dont les caractéristiques techniques diffèrent de celles du capteur TM utilisé pour les images de 1985, 1994 et 2004. Ainsi, une part de l'évolution observée pourrait être influencée par ces différences technologiques, bien que les résultats aient été traités de manière cohérente pour minimiser cet effet.

3. Résultats de la classification de l'NDVI

L'analyse NDVI des cinq dates a permis de classer la cédraie du Parc National de Bélezma en cinq classes thématiques représentant différents niveaux de densité et d'état de la végétation :

- **Classe 1 : Sols nus et zones dégradées (C1)**

Cette classe regroupe les zones à NDVI très faible, correspondant à des surfaces quasiment dépourvues de végétation. Il peut s'agir de sols rocheux, de zones arides, d'espaces incendiés ou encore d'anciennes coupes forestières non régénérées (Photo 1).



Photo 1 : Sol nu PNB (Bachtarzi & Soltane 2025)

- **Classe 2 : Zones à végétation très faible ou en déclin (C2)**

Cette classe reflète des zones où la végétation est très clairsemée, affaiblie ou en phase de régression. Ces secteurs peuvent être liés au surpâturage, à des perturbations climatiques ou à des pressions anthropiques croissantes (Photo 2).

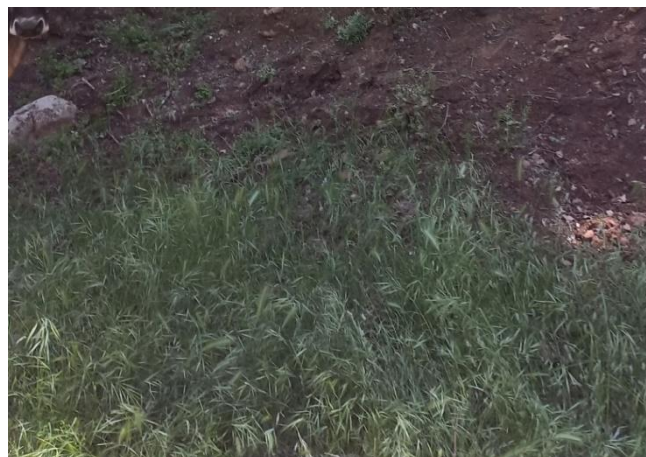


Photo 2 : Zones à végétation très faible ou en déclin PNB (Bachtarzi & Soltane 2025)

- **Classe 3 : Cédraie modérément dense (C3)**

Regroupe les peuplements de cèdres relativement équilibrés, mais dont la densité reste moyenne. Cela peut correspondre à des cédraies naturelles peu perturbées ou à des zones de régénération partielle. Cette classe représente une structure végétale fonctionnelle mais vulnérable, susceptible d'évoluer positivement ou négativement selon la gestion appliquée (Photo 3).



Photo 3 : Cédraie modérément dense PNB (Bachtarzi & Soltane 2025)

- **Classe 4 : Cédraie en bon état (C4)**

Cette classe témoigne de peuplements forestiers bien établis, avec une densité satisfaisante et une bonne vitalité. Elle constitue le cœur fonctionnel de la cédraie, assurant des fonctions écologiques essentielles telles que la protection des sols, la séquestration du carbone et l'habitat pour la faune locale (Photo 4).



Photo 4 : Cédraie en bon état PNB (Bachtarzi & Soltane 2025)

- **Classe 5 : Cédraie dense et saine (C5)**

Cette dernière classe représente les zones les plus riches en biomasse et en activité photosynthétique. Elle correspond aux peuplements les plus matures et les plus préservés, souvent localisés dans des secteurs moins accessibles ou mieux protégés.

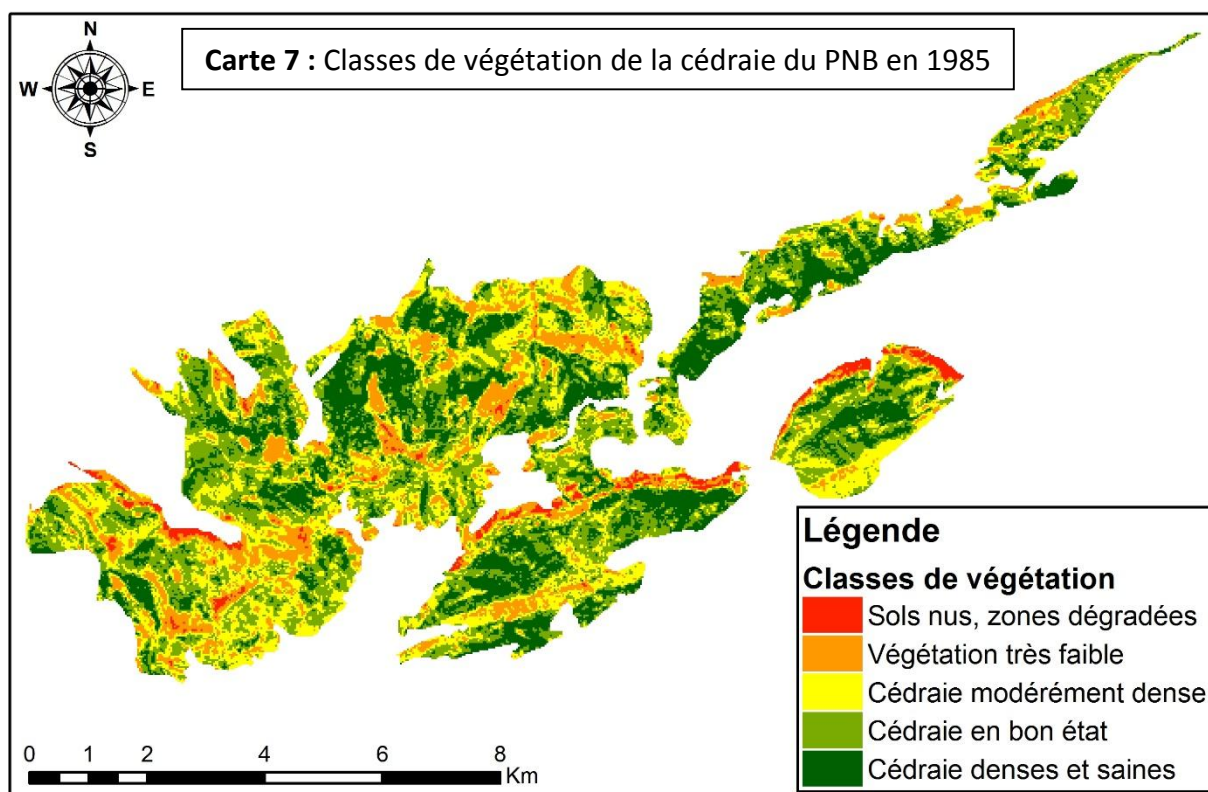


Photo 5 : Cédraie dense et saine PNB (Bachtarzi & Soltane 2025)

Cette classification, fondée sur des plages de valeurs NDVI, permet une lecture qualitative de l'état écologique de la cédraie.

3.1. Classes de végétation pour l'année 1985

En 1985, les classes de végétation modérée à dense (C3, C4 et C5) cumulent à elles seules plus de 4 800 hectares, soit une proportion dominante de la cédraie. Cela indique qu'à cette date, la structure forestière était globalement bien conservée, malgré la présence de zones marginales dégradées (C1 et C2 représentant environ 942 hectares) (Carte 7).

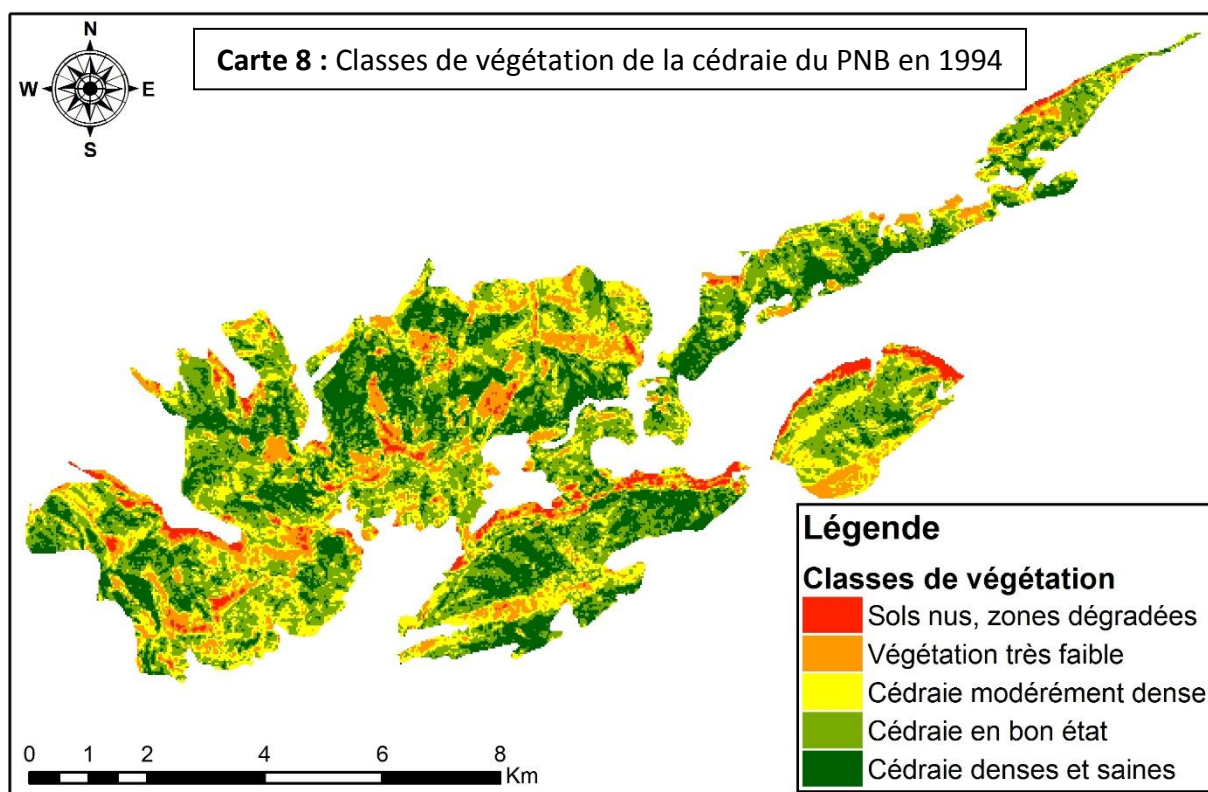


Cette situation fait de 1985 un état de référence important dans l'analyse temporelle. Les données issues de cette classification serviront de base pour évaluer, au fil des années, la progression, la stabilité ou la régression des différentes classes, et donc l'état de santé global de la cédraie du Parc National de Bélezma.

3.2. Classes de végétation pour l'année 1994

En comparant les résultats de 1994 à ceux de 1985, on observe des tendances contrastées dans l'évolution de la cédraie du Parc National de Bélezma (Carte 8).

Les zones fortement dégradées (C1) connaissent une hausse notable, ce qui indique une extension des surfaces dénudées, probablement en lien avec des pressions humaines accrues ou des conditions environnementales défavorables. La surface de cette classe passe d'environ 2 % à plus de 3 % en une décennie. Les zones à végétation très faible (C2) restent relativement stables, traduisant une persistance des milieux fragiles, sans évolution marquée ni vers la régénération ni vers une forte dégradation. La cédraie modérément dense (C3) recule sensiblement, avec une perte d'environ 130 hectares, ce qui pourrait traduire soit une dégradation progressive, soit une amélioration locale dans certains cas.



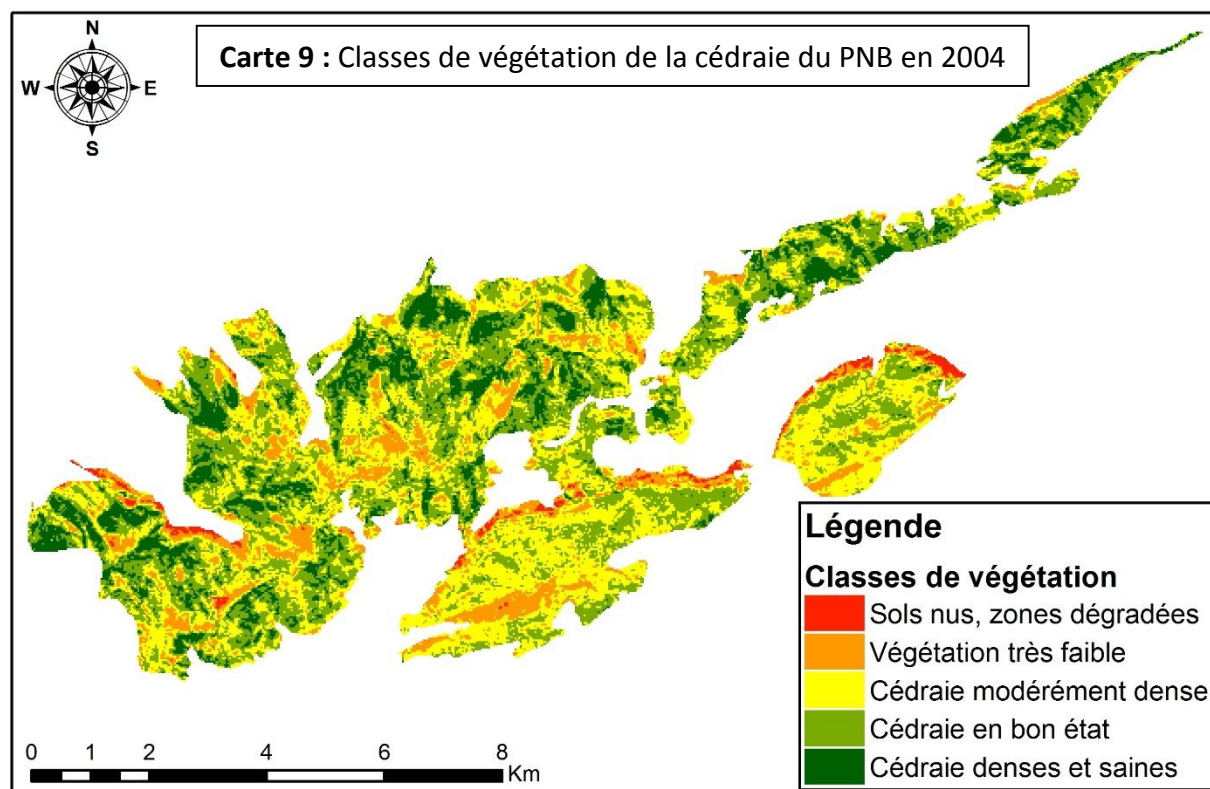
À l'inverse, la cédraie en bon état (C4) progresse clairement (+150 ha environ), devenant la catégorie dominante, ce qui constitue un signal encourageant quant à la dynamique de certaines parties du couvert forestier. La cédraie dense et saine (C5) reste relativement stable, avec une légère diminution, indiquant une résilience des peuplements les plus robustes, même si aucune progression nette n'est observée. En somme, l'année 1994 reflète une fragmentation croissante du paysage forestier, avec des zones qui s'améliorent, d'autres qui régresse, et un équilibre global encore relativement fragile.

3.3. Classes de végétation pour l'année 2004

En 2004, la cédraie du Parc National de Bélézma montre des signes d'amélioration générale, avec une régression marquée des zones dégradées et une hausse des peuplements modérés (Carte 9).

Les zones très dégradées (C1) diminuent fortement, passant à 77,58 ha, contre 174,51 ha en 1994. Les zones à végétation très faible (C2) reculent également à 693 ha, confirmant une réduction des espaces en crise. La cédraie modérément dense (C3) connaît une hausse importante (2 095,2 ha), indiquant une progression de la régénération forestière, tandis que les cédraies en bon état (C4) restent stables autour de 2 095 ha. En revanche, la cédraie dense et

saine (C5) chute nettement à 789,57 ha, soit une perte de plus de 500 ha depuis 1994, traduisant une régression des peuplements les plus vigoureux.



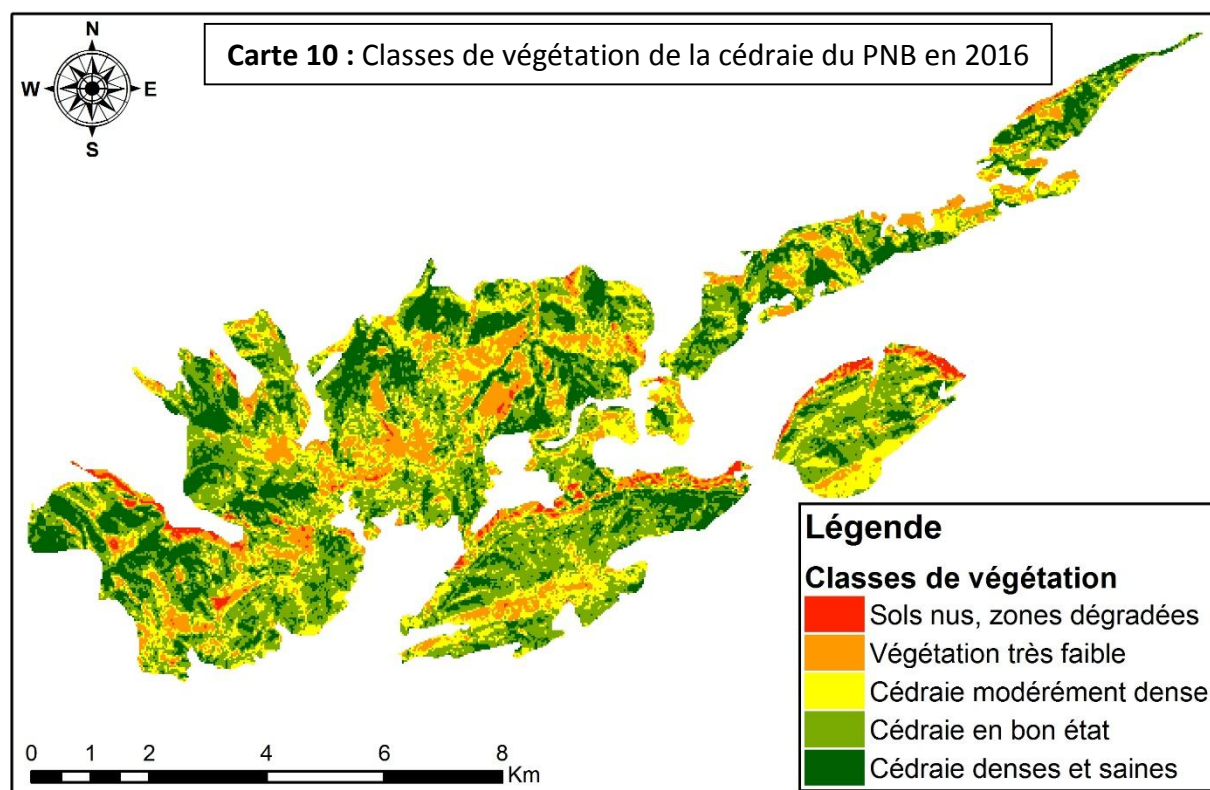
Globalement, 2004 marque une recomposition de la structure forestière : moins de zones extrêmes (très dégradées ou très denses), et une concentration dans les états intermédiaires, ce qui reflète une reprise partielle, mais aussi une fragilité persistante.

3.4. Classes de végétation pour l'année 2016

En 2016, la cédraie du Parc National de Bélezma présente une amélioration globale de l'état végétatif, avec une nette revalorisation des classes les plus denses (Carte 10).

Les zones fortement dégradées (C1) augmentent légèrement à 97,56 ha, tandis que les zones à végétation très faible (C2) atteignent 850,77 ha, en légère hausse par rapport à 2004. Cela traduit une persistance des fragilités écologiques dans certains secteurs. La cédraie modérément dense (C3) recule à 1 403,01 ha, soit une perte de plus de 600 ha depuis 2004, indiquant une transition vers des états soit plus dégradés, soit plus denses. Les cédraies en bon état (C4) atteignent leur niveau le plus élevé avec 2 141,64 ha, confirmant une amélioration nette dans de nombreux peuplements. Enfin, la cédraie dense et saine (C5) augmente fortement

à 1 257,12 ha, soit un gain de près de 470 ha par rapport à 2004. Cela reflète une reconquête des zones forestières de haute qualité, probablement soutenue par des conditions écologiques favorables.

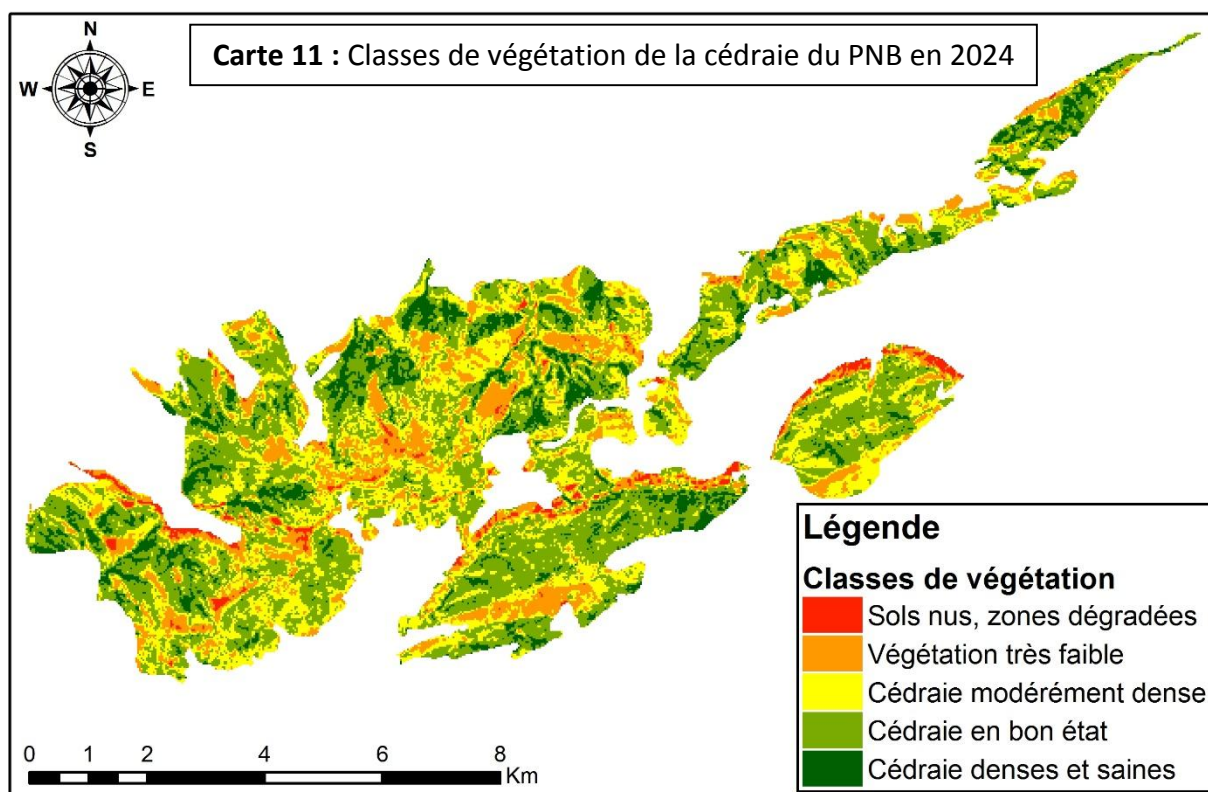


En résumé, 2016 marque un retour à une dynamique positive, avec une expansion des peuplements sains (C4 et C5), malgré le maintien de certaines zones vulnérables (C1 et C2).

3.5. Classes de végétation pour l'année 2024

En 2024, la cédraie du Parc National de Bélezma présente une évolution contrastée, marquée par une progression des zones dégradées et une baisse des cédraies les plus denses (Carte 11).

Les zones très dégradées (C1) augmentent à 112,05 ha, et les zones à végétation très faible (C2) atteignent 948,06 ha, soit leur niveau le plus élevé depuis 2004. Cela indique une dégradation persistante, probablement liée à des facteurs anthropiques ou climatiques. La cédraie modérément dense (C3) progresse à 1 700,46 ha, montrant une stabilisation des peuplements intermédiaires. Les cédraies en bon état (C4) continuent d'augmenter, atteignant 2 395,44 ha, soit leur valeur maximale sur toute la période étudiée, ce qui est un signal positif. En revanche, la cédraie dense et saine (C5) recule fortement à 594,09 ha, soit une perte de plus de 660 ha depuis 2016, suggérant une diminution de la qualité structurelle des peuplements les plus sains.



En résumé, 2024 montre une progression en surface des cédraies en bon état, mais aussi une perte significative de densité dans les zones historiquement les plus vigoureuses, accompagnée d'une hausse des zones dégradées.

4. Discussion sur l'évolution de la cédraie du Parc National de Bélezma

L'analyse des classes de végétation au sein de la cédraie du Parc National de Bélezma a permis de mettre en évidence les variations spatio-temporelles des surfaces occupées par chaque classe. Néanmoins, cette approche ne permet pas à elle seule de caractériser les dynamiques évolutives, qu'elles soient progressives ou régressives. Pour une compréhension plus fine de ces dynamiques, il est indispensable d'exploiter conjointement les cartes d'évolution et la matrice de changement des classes (Tableau 3).

La légende utilisée dans les cartes d'évolution correspond à :

- ✓ Stabilité : pas de changement dans les classes
- ✓ Progression : évolution de C1 ou C2 vers C3, C4 ou C5
- ✓ Régression : évolution de C3, C4 ou C5 vers C1 ou C2
- ✓ Augmentation de densité : évolution de C3 vers C4, C3 vers C5, C4 vers C5
- ✓ Diminution de densité : évolution de C5 vers C4, C5 vers C3, C4 vers C3

Tableau 3 : Matrice de changement des 5 classes de végétation durant les 5 périodes (en ha)

| Evolution | 1985-1994 | 1994-2004 | 2004-2016 | 2016-2024 | 1985-2024 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Stabilité | 4344,57 | 3151,89 | 3452,31 | 4108,41 | 3252,78 |
| C1->C2 | 16,38 | 99,99 | 15,48 | 17,37 | 44,64 |
| C1->C3 | 0 | 1,98 | 0 | 0 | 0,63 |
| C1->C4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C1->C5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C2->C1 | 67,41 | 5,04 | 34,56 | 28,62 | 30,15 |
| C2->C3 | 126,54 | 333,09 | 149,58 | 111,78 | 191,88 |
| C2->C4 | 0,18 | 7,02 | 5,94 | 0,27 | 10,44 |
| C2->C5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,09 |
| C3->C1 | 0,27 | 0 | 0,72 | 1,71 | 2,7 |
| C3->C2 | 141,48 | 113,31 | 269,37 | 202,59 | 239,85 |
| C3->C4 | 300,51 | 331,29 | 787,86 | 95,4 | 362,07 |
| C3->C5 | 0,45 | 5,76 | 42,03 | 0,09 | 7,74 |
| C4->C1 | 0,09 | 0 | 0,09 | 1,35 | 1,26 |
| C4->C2 | 1,8 | 24,66 | 60,57 | 15,39 | 54,81 |
| C4->C3 | 185,67 | 590,04 | 224,55 | 478,98 | 482,58 |
| C4->C5 | 263,25 | 276,48 | 566,28 | 12,51 | 150,03 |
| C5->C1 | 0 | 0 | 0,09 | 0,18 | 0,09 |
| C5->C2 | 0 | 14,85 | 2,43 | 2,61 | 21,51 |
| C5->C3 | 1,44 | 221,4 | 33,66 | 6,48 | 109,62 |
| C5->C4 | 300,06 | 573,3 | 104,58 | 666,36 | 787,23 |

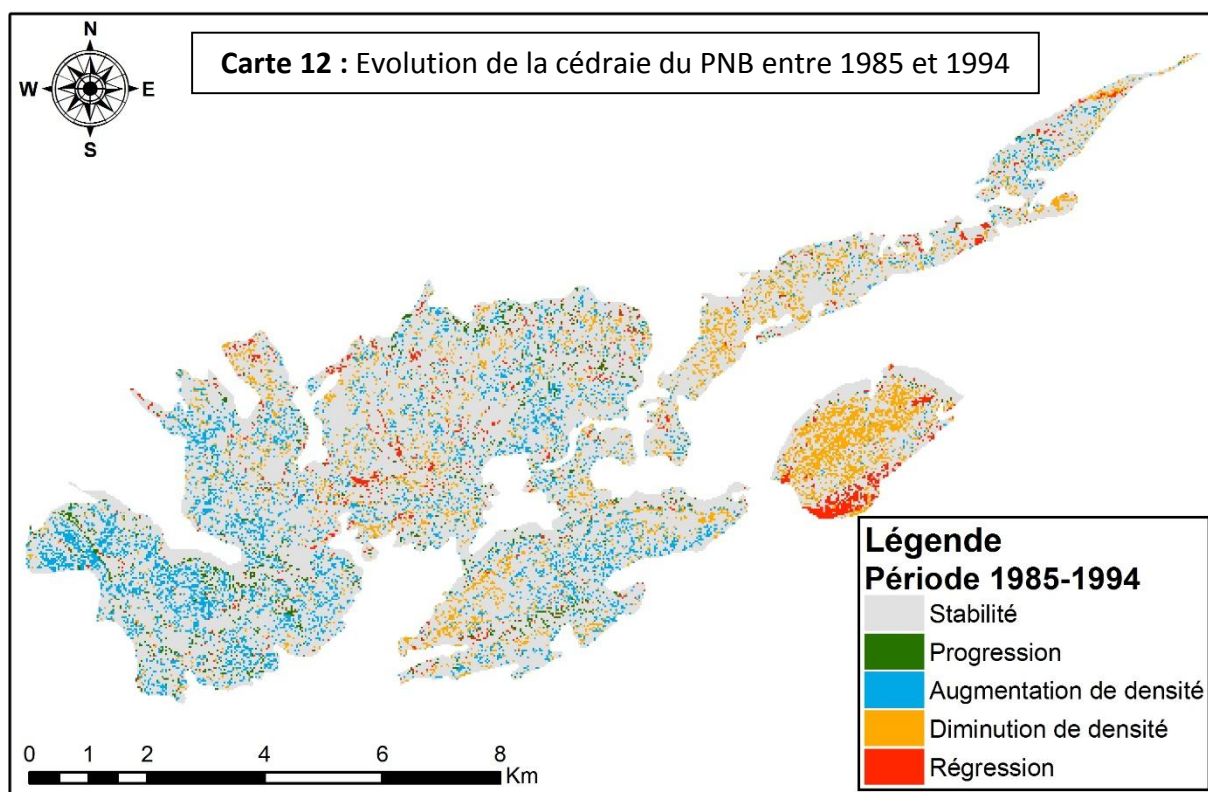
4.1. Période 1985–1994 : stabilité dominante et premières dynamiques de régénération

Durant cette première période, la végétation reste globalement stable, avec 4 344,57 ha ne subissant aucun changement (Carte 12).

Les sols nus et zones dégradées évoluent légèrement vers les zones à végétation très faible (16,38 ha), signe d'une lente reprise écologique. Les zones à végétation très faible progressent sensiblement vers la cédraie modérément dense (126,54 ha), marquant le début d'un processus de densification. La cédraie modérément dense évolue fortement vers la cédraie en bon état (300,51 ha), illustrant un renforcement du couvert végétal.

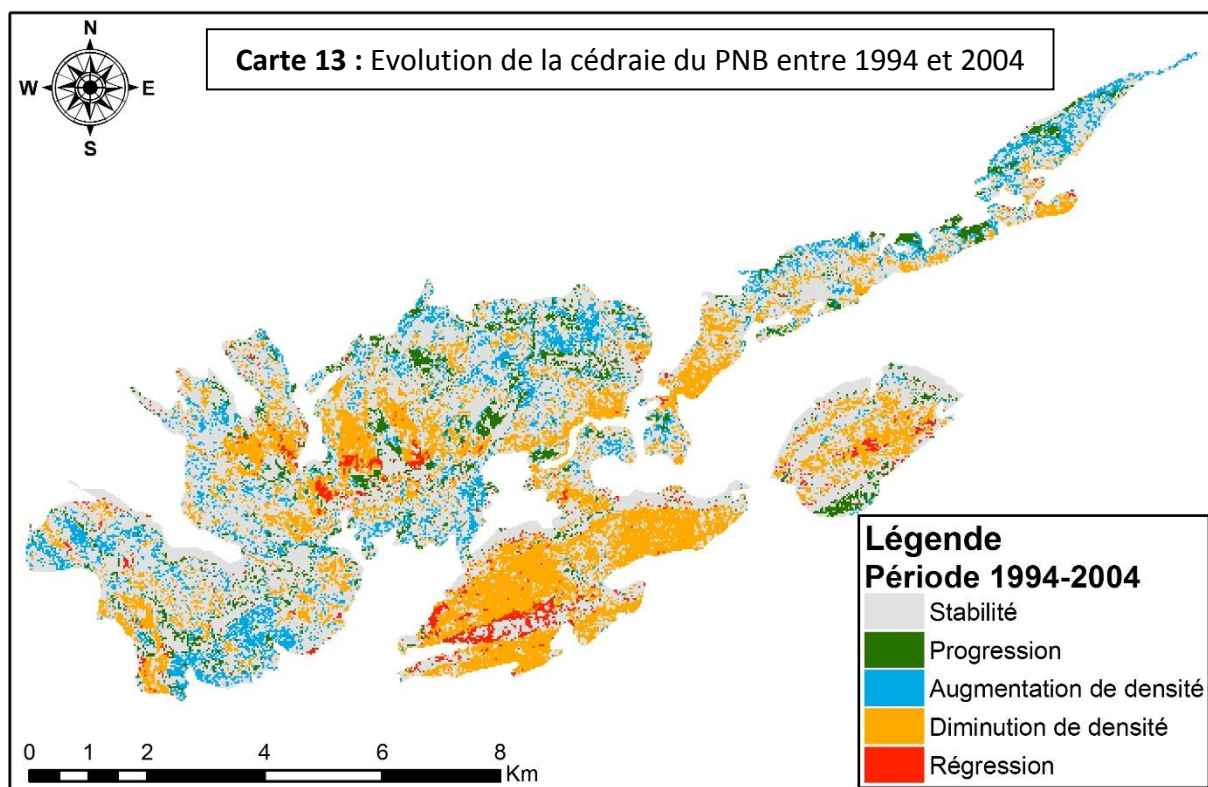
En parallèle, on note déjà une dégradation de la cédraie en bon état vers des états moins denses (185,67 ha vers modérément dense), ainsi qu'un recul de la cédraie dense et saine vers la classe inférieure (300,06 ha vers bon état).

Conclusion : période dominée par la stabilité, avec des signes positifs de régénération, mais aussi les premiers indices de perte de densité.



4.2. Période 1994–2004 : instabilité marquée et déclin des forêts denses

La stabilité diminue fortement à 3 151,89 ha, témoignant d'une mobilité végétale accrue (Carte 13).



Les zones à végétation très faible connaissent une amélioration importante vers la cédraie modérément dense (333,09 ha), et dans une moindre mesure vers la cédraie en bon état. La cédraie modérément dense continue de se densifier vers la cédraie en bon état (331,29 ha). Toutefois, des signes de dégradation importants apparaissent :

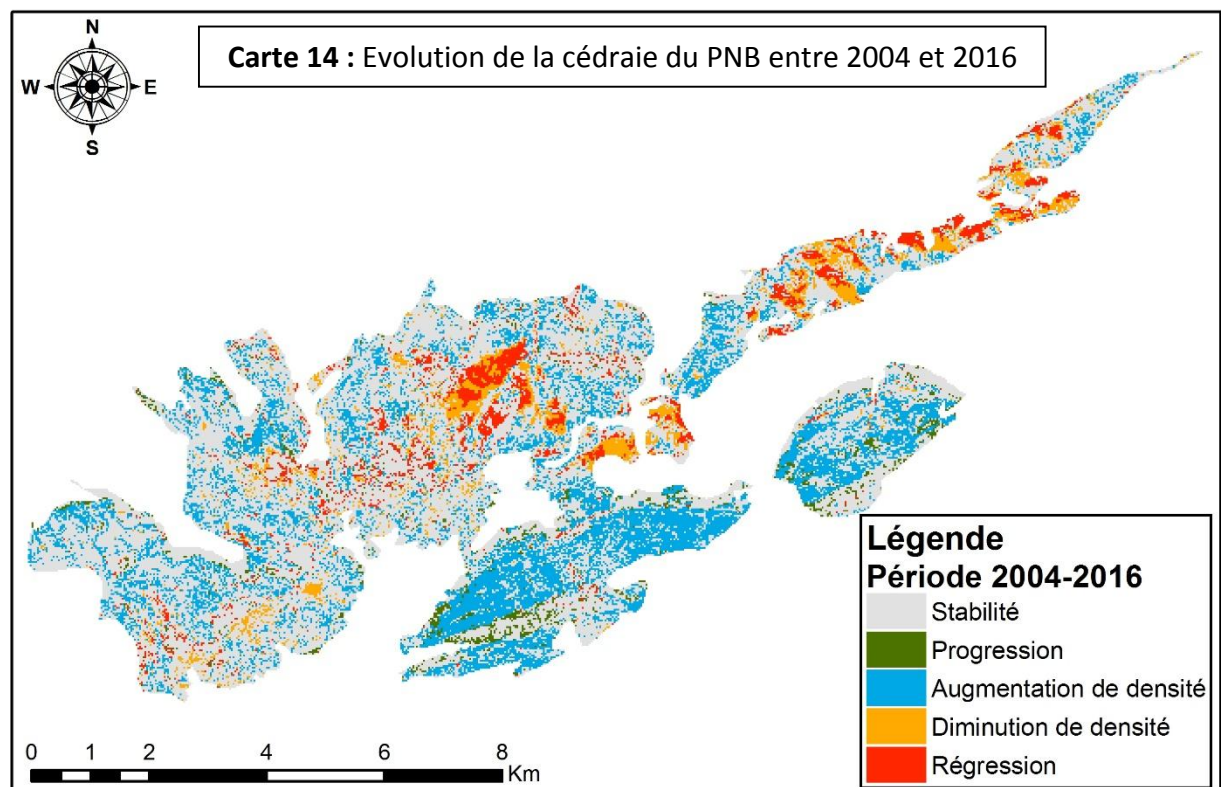
- Cédraie en bon état vers modérément dense (590,04 ha)
- Cédraie dense et saine vers bon état (573,3 ha) et modérément dense (221,4 ha)

Conclusion : période de forte recomposition, avec un déclin net des peuplements les plus denses au profit d'états intermédiaires.

4.3. Période 2004–2016 : amélioration structurale du couvert végétal

La stabilité repart à la hausse (3 452,31 ha) et les dynamiques de densification s'intensifient (Carte 14) :

- Cédraie modérément dense → bon état : 787,86 ha (valeur la plus élevée)
- Cédraie en bon état → dense et saine : 566,28 ha
- Zones à végétation très faible → modérément dense : 149,58 ha



Mais quelques reculs persistent :

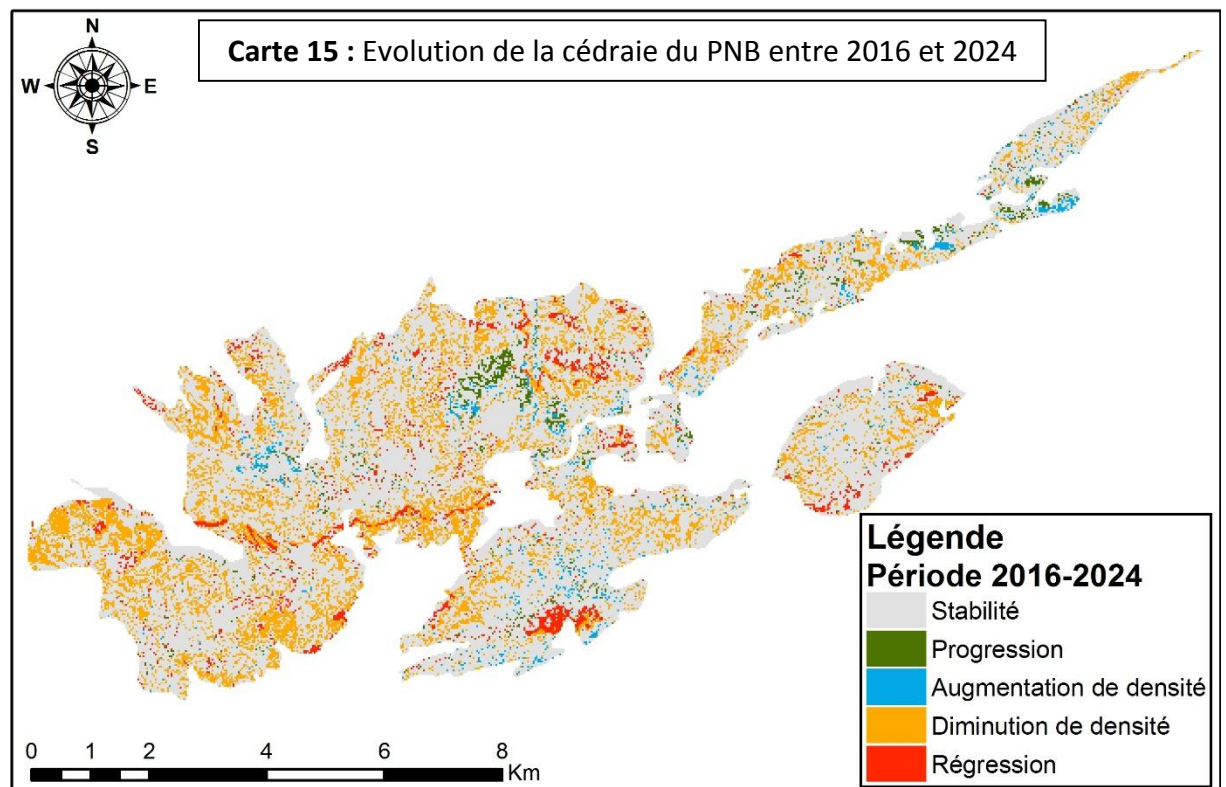
- Cédraie modérément dense → très faible : 269,37 ha
- Cédraie en bon état → modérément dense : 224,55 ha
- Cédraie dense et saine → bon état : 104,58 ha

Conclusion : période globalement positive, marquée par une restructuration ascendante de la végétation.

4.4. Période 2016–2024 : forte régression de la cédraie dense

La stabilité atteint 4 108,41 ha, mais les pertes de qualité sont préoccupantes (Carte 15) :

- La cédraie dense et saine recule fortement vers la cédraie en bon état (666,36 ha), traduisant une perte de densité.
- La cédraie en bon état recule à son tour vers des états modérés (478,98 ha).
- Moins de transitions positives sont enregistrées, avec seulement 95,4 ha de modérément dense → bon état.

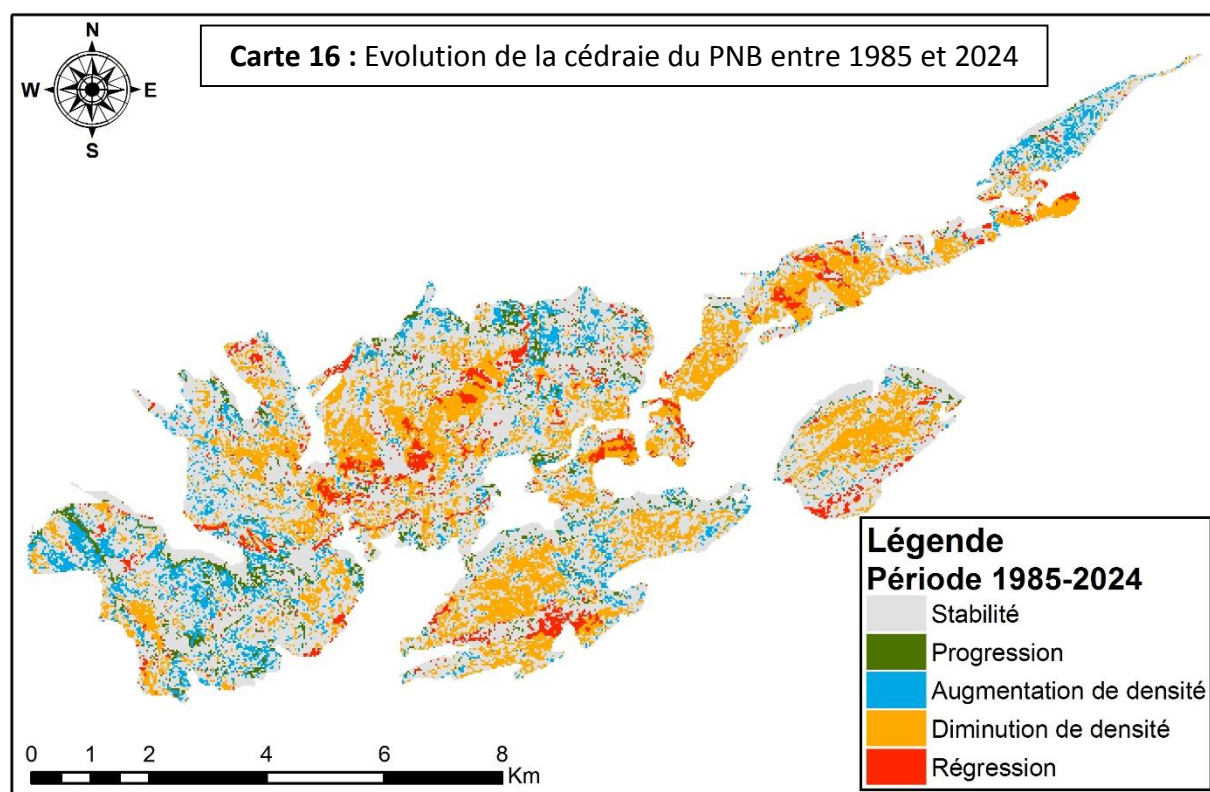


Conclusion : période de fragilisation écologique, marquée par un affaiblissement des peuplements les plus vigoureux.

4.5. Bilan global 1985–2024 : renforcement de la végétation intermédiaire, recul des peuplements très denses

Sur la période complète (Carte 16) :

- ✓ Les sols nus et zones dégradées ont connu de faibles améliorations vers les classes supérieures (44,64 ha vers végétation très faible).
- ✓ Les zones à végétation très faible ont bien évolué vers la cédraie modérément dense (191,88 ha), mais une part non négligeable a régressé.
- ✓ La cédraie modérément dense a contribué à renforcer la cédraie en bon état (362,07 ha), mais a aussi perdu 239,85 ha vers les classes plus faibles.
- ✓ La cédraie dense et saine a fortement reculé vers la cédraie en bon état (787,23 ha) et vers la modérément dense (109,62 ha), confirmant une perte globale de densité forestière.



Conclusion générale : la cédraie du Parc National de Bélezma a connu une réorganisation majeure : les peuplements intermédiaires ont progressé, tandis que les forêts les plus denses ont fortement décliné, traduisant un affaiblissement de la qualité écologique du couvert forestier malgré des signes de régénération.

5. Interprétation de l'évolution de la cédraie suivant les données climatiques

Après cette longue analyse de l'évolution spatio-temporelle de la cédraie du Parc National de Bélezma, nous avons jugé pertinent de croiser ces résultats avec les données climatiques, notamment la température maximale moyenne annuelle et la hauteur annuelle des précipitations enregistrés au niveau de la station météorologique de Batna (Figure 4).

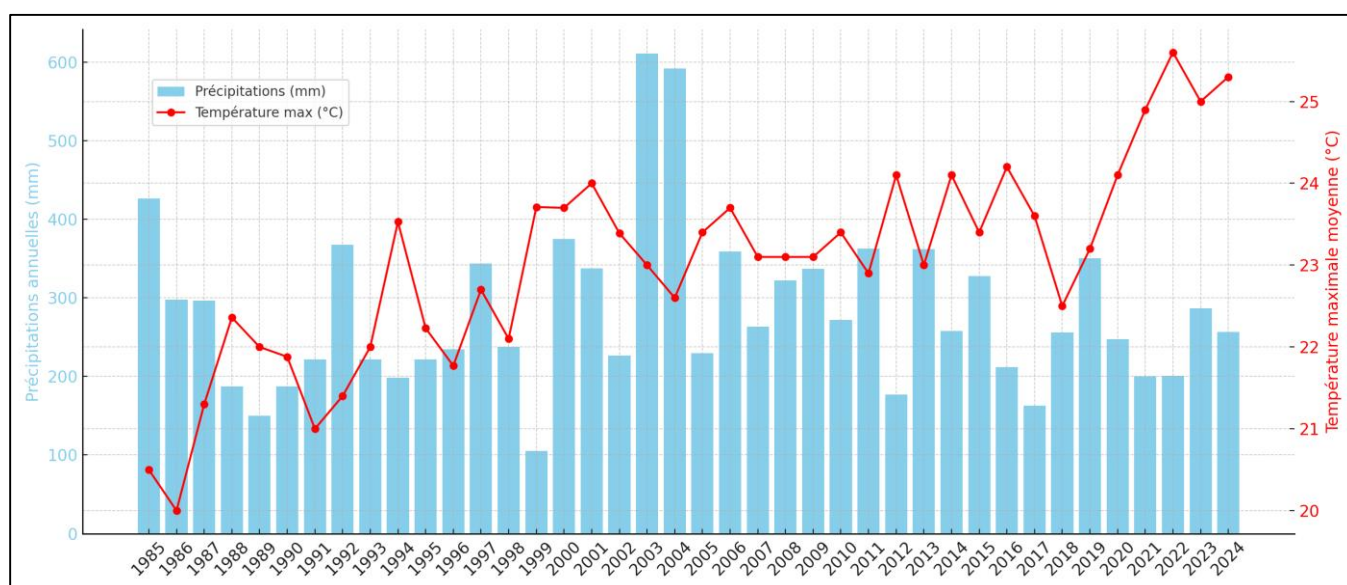


Figure 4 : Evolution des précipitations et des températures maximales de 1985 à 2024 (Station Batna)

L'intégration des données climatiques aux résultats de l'analyse spatio-temporelle de la cédraie du Parc National de Bélezma permet de mieux appréhender les facteurs environnementaux susceptibles d'influencer son évolution.

Sur la période 1985–2024, une tendance générale à la hausse des températures maximales moyennes annuelles est observée, avec une progression notable de 20,5 °C en 1985 à 25,3 °C en 2024. Parallèlement, les précipitations annuelles présentent une forte variabilité interannuelle, avec des minima inquiétants enregistrés en 1999 (105,17 mm) et 2017 (162,82 mm), traduisant une tendance vers l'aridification.

Ces conditions climatiques défavorables coïncident avec des périodes de régression ou de diminution de la densité du couvert végétal, notamment entre 1994–2004 et 2016–2024, comme l'indique l'analyse multi-dates des classes de végétation. À l'inverse, certaines années exceptionnellement humides, telles que 2003 et 2004 (respectivement 610,86 mm et 591,61 mm), semblent correspondre à des phases de progression ou de stabilisation du couvert forestier. Ces corrélations suggèrent que les fluctuations climatiques, et plus particulièrement

la disponibilité en eau et le stress thermique, jouent un rôle déterminant dans la dynamique de la cédraie.

En résumé, la dynamique de la végétation dans la cédraie de Belezma semble étroitement liée à l'évolution climatique : la hausse des températures et la baisse des précipitations ont contribué à une régression structurelle du couvert végétal, avec une baisse de la densité et une progression limitée (Photo 6).

Enfin, il convient de souligner que les effets des facteurs climatiques défavorables ne sont pas les seuls déterminants de la dynamique de la cédraie. En réalité, ces effets sont fortement amplifiés par les pressions anthropiques exercées sur l'écosystème. Le stress hydrique chronique affaiblit les cèdres et réduit leur résilience physiologique, les rendant plus vulnérables aux attaques parasitaires, notamment celles causées par les insectes xylophages ou les champignons pathogènes. Par ailleurs, le surpâturage par le bétail, particulièrement durant les saisons sèches, aggrave la dégradation du sous-bois, empêche la régénération naturelle et favorise l'érosion des sols. La collecte de bois de chauffage, les incendies d'origine humaine et le piétinement fréquent accentuent encore les pressions exercées sur les peuplements de cèdre. Ainsi, la combinaison des contraintes climatiques et anthropiques constitue une menace sérieuse pour la pérennité de la cédraie du Parc National de Bélezma, appelant à des mesures de gestion intégrée qui tiennent compte à la fois des facteurs écologiques et des dynamiques sociales.



Photo 6 : Cèdre dépéris VS jeune régénération PNB (Bachtarzi & Soltane 2025)

Conclusion

Conclusion

L'évaluation de l'évolution spatio-temporelle de la cédraie du Parc National de Bélezma sur la période 1985–2024, à travers l'exploitation de données satellitaires LANDSAT et le calcul de l'indice de végétation NDVI, a permis de documenter de manière rigoureuse les dynamiques de transformation de cet écosystème forestier montagnard. L'approche par classification en cinq classes de densité végétale a révélé des tendances différenciées selon les périodes analysées, marquées par des épisodes de régression, de stagnation ou de reprise partielle du couvert forestier.

Les résultats obtenus mettent en évidence une régression relative des cédraies denses et en bon état, accompagnée d'une augmentation des surfaces appartenant aux classes de végétation clairsemée ou en déclin. Ces changements reflètent une altération progressive des conditions de croissance, en lien avec une hausse des températures maximales moyennes et une baisse des précipitations annuelles observées à l'échelle régionale. L'analyse croisée avec les données climatiques de la région de Batna indique clairement que le stress thermique et le déficit hydrique constituent des facteurs environnementaux majeurs ayant influencé la dynamique de la cédraie au cours des quatre dernières décennies.

Cependant, ces contraintes climatiques ne sauraient être analysées isolément. Leur effet est amplifié par des pressions anthropiques persistantes, telles que le surpâturage, les coupes illicites, les incendies et l'empiètement humain, qui affectent directement la régénération du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) et accélèrent les processus de dégradation. Le croisement des analyses spatiales, climatiques et écologiques met ainsi en lumière la vulnérabilité accrue de cet habitat naturel emblématique face aux changements globaux.

Ces constats soulignent l'urgence d'une intervention concertée en matière de conservation, incluant la mise en œuvre de stratégies de gestion adaptative, le renforcement de la surveillance environnementale à l'aide de la télédétection et l'intégration des données climatiques dans la planification forestière.

Cette étude souligne l'importance cruciale d'une surveillance continue basée sur des outils géospatiaux, combinée à une gestion écologique intégrée, pour préserver durablement la cédraie du Parc National de Bélezma. Elle rappelle également la nécessité urgente de limiter les pressions anthropiques et de renforcer les actions de conservation, afin de sauvegarder un patrimoine écologique d'une grande valeur pour les générations futures.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Bennari, A. (1996). La télédétection et les indices de végétation pour la détection de la végétation éparse et moyennement dense : cas de l'environnement urbain (Thèse de doctorat). Université de Sherbrooke, 230 p.
- Bennari, A., Morin, D., Bonn, F., & Huete, A. R. (1995). A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, 13(1–2), 95–120. <https://doi.org/10.1080/02757259509532298>
- Bentouati, A. (2008). Le dépérissement du cèdre de l'Atlas en Algérie. *Revue Forestière Française*, 60(6), 547–556.
- Briki, A. (2000). Le cèdre de l'Atlas dans le Parc National de Bélezma : état des lieux et perspectives de conservation (Mémoire de Magistère). INA El Harrach.
- Chelli, D. (2005). Influence des facteurs climatiques sur la régénération du cèdre dans le massif des Aurès (Mémoire de Magister). Université de Batna.
- Corgne, S., Hubert-Moy, L., & Le Duc, M. (2004). Utilisation d'un modèle de classification supervisée pour l'analyse diachronique de données satellitaires.
- Derdjini, H. (2017). Cartographie des changements de l'occupation du sol dans la plaine de la Mitidja à partir des images Landsat (Mémoire de master). École Nationale Supérieure d'Hydraulique – Arbaoui Abdellah, 78 p.
- Gao, B. C., Montes, M. J., Davis, C. O., & Goetz, A. F. H. (2009). Atmospheric correction algorithms for hyperspectral remote sensing data of land and ocean.
- Gitas, I. Z., Mitri, G. H., & Ventura, G. (2009). Object-based image classification for burned area mapping of Creus Cape, Spain, using NOAA-AVHRR imagery. *Remote Sensing of Environment*, 113(6), 1236–1245. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.002>
- Irons, J. R., Dwyer, J. L., & Barsi, J. A. (2012). The next Landsat satellite: The Landsat Data Continuity Mission. *Remote Sensing of Environment*.
- Kheloui, F. (2012). Application de la télédétection à l'étude de la dynamique forestière du Parc National de Bélezma. *Revue des Sciences de l'Environnement*, 3(2), 119–130.

- Messaoudene, M. (2004). Problèmes écologiques et gestion de la cédraie de Bélezma. Les Cahiers Forestiers, 12(1), 32–38.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium (Vol. 1, pp. 309–317). NASA SP-351.
- Roy, D. P., et al. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. Remote Sensing of Environment.
- Samaali. (2014). Inter-comparison of Atmospheric Correction Models – SACRS2, FLAASH and 6SV Using Resourcesat-2 AWiFS Data.
- USGS (United States Geological Survey). Landsat Missions.
- Zeraia, A., Bensaci, A., & Khaldi, M. (2010). Conservation et restauration des forêts de cèdre en Algérie : cas du Parc National de Bélezma. Actes du Colloque International sur la Biodiversité Méditerranéenne, Montpellier. Remote Sensing of Environment, 113, S17–S24. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.12.015>

Résumé

Cette étude examine l'évolution spatio-temporelle de la cédraie (*Cedrus atlantica*) du Parc National de Bélezma entre 1985 et 2024, à l'aide d'images satellitaires LANDSAT et de l'indice NDVI. La classification du couvert végétal en cinq classes a permis de suivre les dynamiques de densité forestière sur près de quatre décennies. Les résultats révèlent une tendance générale à la régression des cédraies denses, en lien avec la hausse des températures et la baisse des précipitations annuelles. Ce stress climatique est aggravé par les pressions anthropiques (surpâturage, incendies, coupes), affectant la régénération et la stabilité de l'écosystème. L'approche géospatiale utilisée confirme son utilité pour le suivi écologique et la gestion durable des milieux forestiers sensibles.

Mots clés : Cèdre de l'Atlas, Bélezma, Dynamique, NDVI, Télédétection.

Abstract

This study investigates the spatio-temporal evolution of the Atlas cedar (*Cedrus atlantica*) in the Bélezma National Park between 1985 and 2024 using LANDSAT satellite imagery and NDVI analysis. Vegetation cover was classified into five density classes to track forest changes over nearly four decades. The results indicate a general decline in dense cedar formations, correlated with rising temperatures and decreasing annual precipitation. These climatic stresses are exacerbated by anthropogenic pressures (overgrazing, fires, and logging), affecting regeneration and ecological stability. The geospatial approach applied in this study proves effective for long-term forest monitoring and sustainable ecosystem management.

Keyword: Atlas Cedar, Belezma, Dynamics, NDVI, Remote Sensing

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل التطور الزمني والمكاني لغابة الأرز الأطلسي (*Cedrus atlantica*) في الحظيرة الوطنية بلزمة خلال الفترة الممتدة من 1985 إلى 2024، وذلك باستخدام صور الأقمار الصناعية LANDSAT ومؤشر الغطاء النباتي NDVI. تم تصنيف الغطاء النباتي إلى خمس فئات حسب الكثافة لتتبع التغيرات في الغابة على مدى أربعة عقود تقريبًا. أظهرت النتائج وجود تراجع عام في الكتلة الكثيفة من الأرز، مرتبط بارتفاع درجات الحرارة وانخفاض معدلات التساقط السنوي. وتتفاقم هذه الضغوط المناخية بفعل التأثيرات البشرية مثل الرعي الجائر، والحرائق، وقطع الأشجار، مما يعيق التجدد الطبيعي ويهدد استقرار النظام البيئي. وتبرز هذه المقاربة الجيوفضائية كأداة فعالة لرصد الغابات على المدى الطويل ولتحقيق إدارة مستدامة للنظم البيئية.

الكلمات المفتاحية: أرز الأطلس، بلزمة، الديناميكية، مؤشر NDVI، الاستشعار عن بعد

| | | | | | | | |
|---|---|---|----------------------------|---|----------------------------|---|----------------------------|
| Année universitaire : 2024-2025 | Présenté par : Soltane Takoua Nour El Yakine Bachterzi Riadh | | | | | | |
| Intitulé : Etude de l'évolution de la cédraie du Parc National de Bélezma | | | | | | | |
| Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master Protection des Ecosystèmes | | | | | | | |
| <p>Résumé</p> <p>Cette étude examine l'évolution spatio-temporelle de la cédraie (<i>Cedrus atlantica</i>) du Parc National de Bélezma entre 1985 et 2024, à l'aide d'images satellitaires LANDSAT et de l'indice NDVI. La classification du couvert végétal en cinq classes a permis de suivre les dynamiques de densité forestière sur près de quatre décennies. Les résultats révèlent une tendance générale à la régression des cédraies denses, en lien avec la hausse des températures et la baisse des précipitations annuelles. Ce stress climatique est aggravé par les pressions anthropiques (surpâturage, incendies, coupes), affectant la régénération et la stabilité de l'écosystème. L'approche géospatiale utilisée confirme son utilité pour le suivi écologique et la gestion durable des milieux forestiers sensibles.</p> | | | | | | | |
| Mots-clefs : Cèdre de l'Atlas, Bélezma, Dynamique, NDVI, Télédétection. | | | | | | | |
| Laboratoires de recherche : Développement et Valorisation des Ressources Phylogénétiques (U Constantine 1 Frères Mentouri). | | | | | | | |
| <table><tr><td>Président du jury : Dr Alatou Hana</td><td>MCB – UC1 Frères Mentouri.</td></tr><tr><td>Encadrant : Dr Arfa Azzedine Mohamed Touffik</td><td>MCB – UC1 Frères Mentouri.</td></tr><tr><td>Examineur : Dr Kerrouche Ibrahim</td><td>MCB – UC1 Frères Mentouri.</td></tr></table> | | Président du jury : Dr Alatou Hana | MCB – UC1 Frères Mentouri. | Encadrant : Dr Arfa Azzedine Mohamed Touffik | MCB – UC1 Frères Mentouri. | Examineur : Dr Kerrouche Ibrahim | MCB – UC1 Frères Mentouri. |
| Président du jury : Dr Alatou Hana | MCB – UC1 Frères Mentouri. | | | | | | |
| Encadrant : Dr Arfa Azzedine Mohamed Touffik | MCB – UC1 Frères Mentouri. | | | | | | |
| Examineur : Dr Kerrouche Ibrahim | MCB – UC1 Frères Mentouri. | | | | | | |