

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En** : métiers de la ville

**Spécialité** : géomatique et gestion du foncier

**Par** : BRAHMI Chams Eddine et BOUAZZA Hichem

### Sujet

« Techniques de la télédétection et des SIG dans la cartographie et l'analyse de la désertification en Algérie :

Cas d'étude des Wilayas [Djelfa, Laghouat, Naama, Tiaret et El Bayadh] »

Soutenu publiquement, le 25/06/2025, devant le jury composé de :

|                          |     |                       |               |
|--------------------------|-----|-----------------------|---------------|
| M CHERIF BENMOUSSA Yazid | MAA | Université de Tlemcen | Président     |
| Mme DERKAOUÏ Aïcha       | MAA | Université de Tlemcen | Examinatrice  |
| Mme BENZENINE faïla      | MCB | Université de Tlemcen | Encadrante    |
| Mme SELKA Imene          |     | Université de Tlemcen | Co-Encadrante |

Année universitaire : 2024/2025

## REMERCIEMENTS

Nous exprimons notre profonde gratitude à toutes les personnes qui nous ont soutenus et accompagnés dans la réalisation de ce projet de fin d'études, mené au sein de l'Université de Tlemcen, Faculté de Technologie, Département d'Architecture.

Nos remerciements les plus sincères s'adressent à Madame BENZENINE Faïla, notre encadrante, pour son accompagnement constant, sa disponibilité, ses conseils éclairés et la qualité de son encadrement tout au long de ce travail. Sa rigueur scientifique et sa bienveillance ont été pour nous une véritable source de motivation et de progrès.

Nous adressons également nos sincères remerciements à Monsieur CHERIF BENMOUSSA Yazid, Président du jury, ainsi qu'à Madame DERKAOUI Aïcha, examinatrice de notre mémoire, pour avoir accepté d'évaluer notre travail. Leur présence, leurs remarques constructives et l'intérêt qu'ils ont porté à notre sujet nous honorent profondément et ont grandement contribué à enrichir la portée scientifique de cette étude.

Nous tenons à remercier chaleureusement Madame OUSSADIT Hasna Imene, enseignante au département d'architecture, pour son soutien pédagogique, ses encouragements constants et son écoute attentive, qui nous ont été d'un précieux appui tout au long de notre formation.

Nos plus vifs remerciements vont également à Monsieur le Professeur ALILI Abdessmad, pour l'énergie positive qu'il ne cesse de transmettre à ses étudiants. Sa passion pour l'enseignement et sa capacité à motiver ont marqué notre parcours d'une empreinte humaine et inspirante.

Enfin, nous remercions l'ensemble du corps enseignant, les personnels administratifs du département d'architecture, ainsi que nos camarades, pour leur collaboration, leurs conseils et les échanges enrichissants que nous avons partagés.

Ce mémoire est l'aboutissement d'un travail d'équipe, soutenu par l'implication et la générosité de nos enseignants, que nous remercions de tout cœur.

## DEDICACES

À la mémoire de mon frère bien-aimé,

BRAHMI Djalel Eddine,

Que Dieu, dans Son infinie miséricorde, l'accueille dans Son vaste  
Paradis.

Ton absence me laisse un vide immense, mais ton sourire, ton  
soutien et tes encouragements restent vivants dans mon cœur.

Tu étais, et tu restes, une source d'inspiration, un exemple de bonté,  
de courage et d'amour fraternel.

Ce travail te revient, car tu fais partie de chaque étape de mon  
parcours.

Je ne t'oublierai jamais.

Que la paix éternelle soit sur ton âme.

Chams Eddine

## DEDICACES

Je dédie ce travail :

À mes chers parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices, leurs prières et leur patience. Leur soutien moral et matériel a été une source inestimable de force tout au long de mon parcours. Qu'Allah les protège et les récompense pour tout ce qu'ils ont fait pour moi.

À mes frères et sœurs, pour leur affection, leur soutien constant et leur confiance en moi.

À ma famille BOUAZZA, symbole de solidarité, de persévérance et de valeurs nobles, qui m'a toujours encouragé à aller de l'avant et à viser l'excellence.

À mon binôme, pour la collaboration sincère, le partage des efforts et l'esprit d'équipe qui ont marqué cette aventure scientifique.

À tous mes amis et camarades de l'Université de Tlemcen, pour les moments d'entraide, de travail et d'amitié inoubliables.

Hichem

## Résumé

Ce mémoire traite la problématique de la désertification dans les Hauts Plateaux algériens, une région fortement menacée par la dégradation des terres sous l'effet combiné du climat aride et des pressions anthropiques. En mobilisant les outils de la télédétection et des systèmes d'information géographique (SIG), nous avons identifié, cartographié et analysé les zones sensibles à la désertification à l'aide de l'Indice de Sensibilité à la Désertification (DSI). L'analyse a été menée sur cinq wilayas (Djelfa, Laghouat, Tiaret, El Bayadh, Naâma), en intégrant des données satellites (NDVI, AOD, SRTM, etc.) et climatiques (précipitations, évapotranspiration, aérosols). Les résultats révèlent des zones critiques nécessitant des actions prioritaires. L'étude souligne l'importance des dynamiques climatiques et de la coopération internationale, notamment avec la Chine, pour s'inspirer de solutions efficaces de lutte contre la désertification.

Mots clés : Désertification, Télédétection, SIG, Climat, Géomatique

## ملخص

يتناول هذا البحث مشكلة التصحر في الهضاب العليا الجزائرية، وهي منطقة مهددة بشدة نتيجة تدهور الأراضي بسبب المناخ الجاف والضغط البشرية. باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية، تم تحديد ورسم خرائط وتحليل المناطق الحساسة للتصحر من خلال مؤشر حساسية التصحر. شملت الدراسة خمس ولايات الجلفة، الأغواط، تيارت، البيض، النعامة، وتم الاعتماد على بيانات الأقمار الصناعية والمعطيات المناخية الأمطار، التبخر الهباء الجوي. أظهرت النتائج وجود مناطق حرجة تتطلب تدخلات عاجلة. كما تؤكد الدراسة على أهمية الديناميكيات المناخية والتعاون الدولي، خاصة مع الصين، للاستفادة من خبراتها في مكافحة التصحر.

### :الكلمات المفتاحية

التصحر، الاستشعار عن بعد، نظم المعلومات الجغرافية، المناخ، الجيوماتكس

## **Abstract**

This thesis addresses the issue of desertification in the Algerian High Plateaus, a region severely threatened by land degradation due to both arid climate and human pressure. Using remote sensing and Geographic Information Systems (GIS), we identified, mapped, and analyzed areas sensitive to desertification through the Desertification Sensitivity Index (DSI). The analysis focused on five wilayas (Djelfa, Laghouat, Tiaret, El Bayadh, Naâma), integrating satellite data (NDVI, AOD, SRTM, etc.) and climate parameters (precipitation, evapotranspiration, aerosols). The results highlight critical zones requiring urgent action. The study emphasizes the importance of climate dynamics and international cooperation particularly with China to learn from successful strategies to combat desertification.

Keywords: Desertification, Remote Sensing, GIS, Climate, Geomatics

## SOMMAIRE

|                                                                                                                                                                 |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| REMERCIEMENTS .....                                                                                                                                             | 1         |
| DEDICACES .....                                                                                                                                                 | 2         |
| Résumé.....                                                                                                                                                     | 4         |
| ملخص.....                                                                                                                                                       | 5         |
| Abstract .....                                                                                                                                                  | 6         |
| Sommaire .....                                                                                                                                                  | 7         |
| Table des illustrations.....                                                                                                                                    | 9         |
| Liste des Acronymes .....                                                                                                                                       | 12        |
| Introduction générale : .....                                                                                                                                   | 13        |
| <b>CHAPITRE I : SIG, TELEDETECTION ET INDICES ENVIRONNEMENTAUX.....</b>                                                                                         | <b>15</b> |
| 1 Introduction : .....                                                                                                                                          | 15        |
| 2 Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) : .....                                                                                                         | 15        |
| 3 La Télédétection.....                                                                                                                                         | 18        |
| 4 Utilisation des outils numériques pour l'analyse géospatiale : .....                                                                                          | 26        |
| 5 Conclusion : .....                                                                                                                                            | 29        |
| <b>CHAPITRE II : DESERTIFICATION, VENTS DE SABLE, AEROSOLS.....</b>                                                                                             | <b>30</b> |
| 1 Introduction .....                                                                                                                                            | 30        |
| 2 La désertification.....                                                                                                                                       | 30        |
| 3 Les vents : .....                                                                                                                                             | 39        |
| 4 Les Aérosols Atmosphériques et leur Impact sur la Désertification en Algérie .....                                                                            | 41        |
| 5 Modélisation SRTM .....                                                                                                                                       | 44        |
| 6 Conclusion.....                                                                                                                                               | 45        |
| <b>CHAPITRE III : METHODOLOGIE ET ETUDE CLIMATIQUE SUR LA ZONE D'ETUDE.....</b>                                                                                 | <b>46</b> |
| 1 Introduction .....                                                                                                                                            | 46        |
| 2 Présentation la zone d'étude.....                                                                                                                             | 46        |
| 3 L'évolution de la couverture végétale dans la zone d'étude à l'aide des données Satellitaires Landsat .....                                                   | 48        |
| 4 Changements dans l'occupation des sols .....                                                                                                                  | 49        |
| 5 Facteurs physiques et climatiques de la désertification : .....                                                                                               | 53        |
| 6 La pente (carte de pente) .....                                                                                                                               | 55        |
| 7 Les précipitations .....                                                                                                                                      | 56        |
| 8 Température moyenne annuelle de l'air en surface dans la zone d'étude .....                                                                                   | 62        |
| 9 L'humidité de surface du sol de la zone d'étude .....                                                                                                         | 67        |
| 10 La relation entre la précipitation et la température de l'air en surface et l'humidité de surface du sol dans l'étude de la désertification (1981-2024)..... | 70        |
| 11 Indice d'Aridité Global .....                                                                                                                                | 70        |

|                                                                                           |                                                                  |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------|
| 12                                                                                        | La vitesse et la direction des vents dans la zone d'étude .....  | 73        |
| 13                                                                                        | Conclusion : .....                                               | 76        |
| <b>CHAPITRE VI : ANALYSE SPATIO-TEMPORELLE VENTS DE SABLE, TOPOGRAPHIE, COULOIRS.....</b> |                                                                  | <b>77</b> |
| 1                                                                                         | Introduction .....                                               | 77        |
| 2                                                                                         | Méthodologie générale.....                                       | 77        |
| 3                                                                                         | Travaux sur Aérosols.....                                        | 78        |
| 4                                                                                         | Procédure de détection des couloirs de vent de sable.....        | 93        |
| 5                                                                                         | Sortie de terrain reconnaissance sur l'axe Sougueur – Aflou..... | 96        |
| 6                                                                                         | Conclusion.....                                                  | 97        |
| <b>V. CONCLUSION, RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES .....</b>                               |                                                                  | <b>98</b> |
| 1                                                                                         | Conclusion générale : .....                                      | 98        |
| 2                                                                                         | Recommandations spéciales pour la zone d'étude : .....           | 99        |
| 3                                                                                         | Perspectives : .....                                             | 99        |
|                                                                                           | Références .....                                                 | 101       |
|                                                                                           | Annexes : .....                                                  | 103       |
|                                                                                           | Table des matières .....                                         | 103       |

## Table des illustrations

### Liste des figures.

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1: Les Composantes d'un SIG .....                                                                                | 16 |
| Figure 2: Principe générale de la TLD .....                                                                             | 19 |
| Figure 3: Exemple NDVI des Bouches-du-Rhône pour le 13 juin 2019 Image en ligne (R1).....                               | 24 |
| Figure 4: Interface GEE .....                                                                                           | 26 |
| Figure 5: Interface Jupiter Notebook .....                                                                              | 27 |
| Figure 6: Logo Python .....                                                                                             | 28 |
| Figure 7: Logo des logiciel ArcGIS et QGIS .....                                                                        | 29 |
| Figure 8: Phénomène de la désertification image en ligne (R2) .....                                                     | 31 |
| Figure 9: Schéma de la circulation atmosphérique globale sur Terre image de Kaidor via Libération .....                 | 31 |
| Figure 10: Effet de Foehn et ombre pluviométrique Image de Météo France .....                                           | 32 |
| Figure 11: Desertification Sensitivity Index (Kouba, 2023) par Ahmed Alliouche et Yacine Kouba .....                    | 33 |
| Figure 12: Les déserts dans le monde image en ligne (R4) quizlet.com.....                                               | 34 |
| Figure 13: Les grands déserts du monde image de ProjetEcolo.....                                                        | 35 |
| Figure 14: Types des dunes de sable Image de Dictionnaire Visuel.....                                                   | 37 |
| Figure 15: Erosion éolienne dans les régions arides et semi-arides image de Jean Louis RAJOT Christel BOUET.....        | 38 |
| Figure 16: Délimitation des steppes algériennes par Nedjraoui Dalila et Bédrani Slimane (Slimane, 2008) .....           | 39 |
| Figure 17: Exemple prévision du vent 18/05/2025 à 09 UTC animation (Inf) .....                                          | 40 |
| Figure 18: Tempête de sable vue de l'espace (source : NASA image). .....                                                | 41 |
| Figure 19: Sable du Sahara Image de meteo-express.com.....                                                              | 43 |
| Figure 20: Carte de la zone d'étude .....                                                                               | 47 |
| Figure 21: Image Landsat L5 (1984) ET L9 (2024).....                                                                    | 48 |
| Figure 22: Méthodologie de réalisation d'une carte d'occupation de sol .....                                            | 49 |
| Figure 23: La carte d'occupation de sol (Année 1985).....                                                               | 51 |
| Figure 24: La carte d'occupation de sol (Année 2022).....                                                               | 52 |
| Figure 25: Méthodologie pour élaborer une carte hypsométrique .....                                                     | 53 |
| Figure 26: Carte hypsométrique de la zone d'étude.....                                                                  | 54 |
| Figure 27: Méthodologie d'élaborer une carte de pente.....                                                              | 55 |
| Figure 28: Carte des pentes de la zone d'étude.....                                                                     | 56 |
| Figure 29: Méthodologie pour élaborer une carte de pluviométrique.....                                                  | 57 |
| Figure 30: Carte de pluviométrique de la zone d'étude .....                                                             | 58 |
| Figure 31: Analyse de la précipitation dans la wilaya de Laghouat (1981-2025) .....                                     | 59 |
| Figure 32: Analyse de la précipitation dans la wilaya El Bayedh (1981-2025) .....                                       | 60 |
| Figure 33: Analyse de la précipitation dans la wilaya de Naama (1981-2025).....                                         | 61 |
| Figure 34: Analyse de la précipitation dans la wilaya de Djelfa (1981-2025) .....                                       | 61 |
| Figure 35: Analyse de la précipitation dans la wilaya de Tiaret (1981-2025).....                                        | 62 |
| Figure 36: Analyse de la température moyenne de l'air en surface (annuelle) dans la wilaya de Laghouat (1981-2023)..... | 63 |
| Figure 37: Analyse de la température moyenne de l'air en surface (annuelle) dans la wilaya El Baydh (1981-2023) .....   | 64 |
| Figure 38: Analyse de la température moyenne de l'air en surface (annuelle) dans la wilaya de Djelfa (1981-2023).....   | 65 |

|                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 39: Analyse de la température moyenne de l'air en surface (annuelle) dans la wilaya de Naama (1981-2023) .....                       | 66 |
| Figure 40: Analyse de la température moyenne de l'air en surface (annuelle) dans la wilaya de Tiaret (1981-2023) .....                      | 67 |
| Figure 41: Humidité de surface du sol de la zone d'étude .....                                                                              | 69 |
| Figure 43: Carte des zones arides dans notre cas d'étude. ....                                                                              | 72 |
| Figure 44: Méthodologie d'élaborer une carte des vents .....                                                                                | 74 |
| Figure 45: Carte des vents dans la zone d'étude .....                                                                                       | 75 |
| Figure 46: L'année la plus poussiéreuse dans la période du 2018 au 2024.....                                                                | 78 |
| Figure 47: Le mois le plus poussiéreux en 2022.....                                                                                         | 79 |
| Figure 48: Classement des wilayas de votre zone d'étude selon le pourcentage d'exposition à l'AOD en 2022 .....                             | 81 |
| Figure 49: Carte DSI Wilaya Djelfa.....                                                                                                     | 84 |
| Figure 50: Répartition du DSI pie chart Djelfa .....                                                                                        | 84 |
| Figure 51: Carte DSI Wilaya Elbayadh.....                                                                                                   | 86 |
| Figure 52: Répartition du DSI pie chart Elbayadh .....                                                                                      | 87 |
| Figure 53: Carte DSI Wilaya Laghouat.....                                                                                                   | 88 |
| Figure 54: Répartition du DSI Pie chart Laghouat.....                                                                                       | 89 |
| Figure 55: Carte DSI Wilaya Naama.....                                                                                                      | 90 |
| Figure 56: Répartition du DSI Pie chart Naama.....                                                                                          | 91 |
| Figure 57: Carte DSI Wilaya Tiaret.....                                                                                                     | 92 |
| Figure 58: Répartition du DSI Pie chart Tiaret.....                                                                                         | 93 |
| Figure 59: Topographie des Wilayas de la zone d'étude de gauche à droite Naama Elbayadh Lghouate Tiaret et Djelfa.....                      | 95 |
| Figure 60: Aérosol des Wilayas de la zone d'étude de gauche à droite Naama Elbayadh Lghouate Tiaret et Djelfa .....                         | 95 |
| Figure 61: Couloire de vent de sable dans les Wilayas de la zone d'étude de gauche à droite Naama El-Bayadh Laghouat Tiaret et Djelfa ..... | 96 |

## Liste des tableaux.

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1: Types de données utilisées dans les SIG.....                                               | 17 |
| Tableau 2: Différence entre les satellites d'observation et les modèles de réanalyse .....            | 20 |
| Tableau 3: Tableau global des satellites et modèles utilisés en télédétection multidisciplinaire..... | 21 |
| Tableau 4: Tableau Modèles et réanalyses .....                                                        | 23 |
| Tableau 5: Tableau des principaux indices en télédétection.....                                       | 24 |
| Tableau 6: Python et ses bibliothèques géospatiales .....                                             | 28 |
| Tableau 7: Type de désert selon leur origine climatique .....                                         | 33 |
| Tableau 8: Type de désert Selon la température .....                                                  | 34 |
| Tableau 9: Types de déserts selon la couverture du sol (formes morphologiques) .....                  | 35 |
| Tableau 10: Type de dune.....                                                                         | 36 |
| Tableau 11: Les principaux types de vents en Afrique du Nord.....                                     | 39 |
| Tableau 12: Différentes longueurs d'onde (AOD) et comparaison avec PM.....                            | 42 |
| Tableau 13: Caractéristiques des données SRTM .....                                                   | 44 |
| Tableau 14: Types de cartes obtenues à partir du SRTM .....                                           | 44 |
| Tableau 15: Pourcentage d'exposition à l'AOD en 2022 % Algérie.....                                   | 80 |
| Tableau 16: Les indicateurs utilisés pour calcul DSI .....                                            | 82 |
| Tableau 17: Résumé des indicateurs environnementaux Wilaya de Djelfa.....                             | 82 |
| Tableau 18: Résumé des indicateurs environnementaux et calcul (DSI)Wilaya d'El Bayadh.....            | 85 |

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 19: Résumé des indicateurs environnementaux et calcul (DSI) Wilaya de Laghouat ..... | 87 |
| Tableau 20: Résumé des indicateurs environnementaux calcul (DSI) Wilaya de Naâma.....        | 89 |
| Tableau 21: Résumé des indicateurs environnementaux calcul (DSI) Wilaya de Tiaret.....       | 91 |

## Liste des Acronymes

| Abréviation    | Signification                                                                                          |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>SIG/GIS</b> | Système d'Information Géographique (Geographic Information System)                                     |
| <b>TLD</b>     | Télédétection                                                                                          |
| <b>DSI</b>     | Desertification Sensitivity Index (Indice de Sensibilité à la Désertification)                         |
| <b>NDVI</b>    | Normalized Difference Vegetation Index (Indice de Végétation par Différence Normalisée)                |
| <b>AOD</b>     | Aerosol Optical Depth (Profondeur Optique des Aérosols)                                                |
| <b>DEM</b>     | Digital Elevation Model (Modèle Numérique d'Élévation)                                                 |
| <b>SRTM</b>    | Shuttle Radar Topography Mission                                                                       |
| <b>GEE</b>     | Google Earth Engine                                                                                    |
| <b>PET</b>     | Evapotranspiration Potentielle                                                                         |
| <b>PRECIP</b>  | Précipitations (en mm/an)                                                                              |
| <b>VQI</b>     | Vegetation Quality Index (Indice de Qualité de la Végétation)                                          |
| <b>CQI</b>     | Climate Quality Index (Indice de Qualité Climatique)                                                   |
| <b>SQI</b>     | Soil Quality Index (Indice de Qualité du Sol)                                                          |
| <b>MQI</b>     | Management Quality Index (Indice de Qualité de Gestion)                                                |
| <b>FAO</b>     | Food and Agriculture Organization                                                                      |
| <b>MODIS</b>   | Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer                                                          |
| <b>LST</b>     | Land Surface Temperature (Température de surface terrestre)                                            |
| <b>MNT</b>     | Modèle Numérique de Terrain                                                                            |
| <b>POP</b>     | Population (densité ou estimation démographique)                                                       |
| <b>DSI</b>     | Desertification Sensitivity Index (Indice de Sensibilité à la Désertification)                         |
| <b>SHP</b>     | Shapefile                                                                                              |
| <b>PM10</b>    | Particulate Matter $\leq 10$ micromètres (Particules en suspension de diamètre $\leq 10 \mu\text{m}$ ) |
| <b>PM2.5</b>   | Particulate Matter $\leq 2.5$ micromètres (Particules fines de diamètre $\leq 2.5 \mu\text{m}$ )       |
| <b>ONU</b>     | Organisation des Nations Unies                                                                         |
| <b>BNEDR</b>   | Bureau National d'Etudes pour le Développement Rural                                                   |
| <b>AI</b>      | Aérosol Index                                                                                          |
| <b>GEE</b>     | Google Earth Engine                                                                                    |
| <b>UNCCD</b>   | Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification                                    |

## **Introduction générale :**

Dans son célèbre mythe de la caverne, Platon décrit des hommes enchaînés depuis leur naissance, contraints de ne percevoir du monde extérieur que des ombres projetées sur un mur. Ces ombres, qu'ils prennent pour la réalité, ne sont qu'un reflet partiel du monde réel. Ce n'est qu'en se libérant et en accédant à la lumière extérieure qu'un des prisonniers découvre la véritable nature des choses. Cette allégorie illustre le passage de l'illusion à la connaissance, de l'obscurité à la compréhension éclairée.

De la même manière, la géomatique et plus particulièrement la télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG) représente aujourd'hui cette lumière moderne, nous permettant de sortir de la caverne de l'ignorance géographique. Grâce aux avancées technologiques, il est désormais possible d'observer la Terre avec une précision inédite, de suivre les changements environnementaux sur de vastes territoires, et de croiser des millions de données géospatiales pour appuyer les prises de décision.

Dans ce paradigme renouvelé, le géomaticien occupe un rôle central. À l'image d'un radiologue, il interprète des images complexes issues de capteurs satellitaires et mobilise des compétences transdisciplinaires en environnement, climatologie, géologie, écologie ou encore en analyse spatiale pour identifier les dynamiques du territoire. L'un des enjeux les plus préoccupants, notamment en Algérie, est celui de la désertification.

La désertification est un processus de dégradation des terres dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches. En Algérie, elle affecte fortement les Hauts Plateaux, menaçant les écosystèmes et les moyens de subsistance. Face à ce défi, la géomatique constitue un levier stratégique pour la cartographie, le suivi et l'analyse multiscalaire de ce phénomène complexe.

Ce mémoire s'inscrit dans cette dynamique, en mobilisant des données issues de la télédétection et des outils SIG pour mieux comprendre, modéliser et anticiper les processus de désertification en Algérie. L'étude se focalise sur les wilayas steppiques de l'Ouest algérien, avec pour objectif de proposer des solutions opérationnelles à partir d'une approche intégrée, fondée sur la science ouverte.

Ce travail s'inscrit dans le champ de l'analyse spatiale appliquée à l'environnement, avec un focus sur les dynamiques de désertification dans les Hauts Plateaux algériens. Ces zones de transition entre l'Atlas tellien et le Sahara sont particulièrement exposés à l'aridification, à la réduction de la couverture végétale et à l'érosion éolienne. L'objectif est d'évaluer l'apport des données satellitaires et des outils géomatiques pour cartographier et comprendre les dynamiques de dégradation à l'échelle régionale.

Malgré la mise en place de politiques publiques, telles que l'initiative nationale de restauration du Barrage Vert encadrée par le BNEDER, ou encore l'engagement de l'Algérie dans la Convention des Nations Unies sur la Lutte contre la Désertification (UNCCD, ratifiée le 22 janvier 1996), la surveillance environnementale reste freinée par un manque de données actualisées, d'indicateurs fiables et de méthodologies reproductibles.

Comment mobiliser les outils géomatiques modernes en particulier la télédétection et les SIG pour améliorer la cartographie et la compréhension des dynamiques de désertification en Algérie ?

Les hypothèses adoptées sont :

- Les indices de végétation (NDVI) et d'aérosols (AOD), dérivés des données Sentinel-5P et MODIS via Google Earth Engine, permettent de détecter les dynamiques de dégradation des terres. (Fensholt, 2013)
- L'analyse SIG des MNT (SRTM) et des composantes du vent permet de modéliser les couloirs de transport préférentiel du sable.
- L'intégration de données multi-capteurs (Sentinel, MODIS, SRTM) améliore la précision des cartes de vulnérabilité.

- L'utilisation combinée de Google Earth Engine, Python et Jupyter Notebook constitue un cadre reproductible et efficace pour l'analyse spatiale. (Gorelick, 2017) (McKinney, 2010)

De ce fait, l'objectif principal est de Développer une méthodologie d'analyse géospatiale pour évaluer la dynamique de la désertification dans les wilayas steppiques de l'Ouest algérien notamment :

- Interpoler les données climatiques (température, humidité, précipitations) à l'échelle régionale.
- Identifier les zones sensibles à partir du NDVI et de l'indice d'aérosols (AOD).
- Étudier la saisonnalité des tempêtes de poussière.
- Modéliser les couloirs de vent en lien avec le relief (via SRTM).
- Proposer des zones prioritaires pour la reforestation ou la stabilisation.

Ce travail contribue à renforcer les capacités d'observation environnementale en Algérie par :

- L'utilisation de données ouvertes (MODIS, Sentinel) et d'outils libres (GEE, Python).
- La production de cartes décisionnelles pour les acteurs territoriaux.
- La valorisation des SIG dans la planification écologique.
- L'encouragement à une approche scientifique ouverte et reproductible

La méthodologie s'appuie sur une chaîne de traitement complète :

- Étude climatique régionale (température, vent, humidité, aridité).
- Extraction des données via Google Earth Engine (NDVI, AOD, SRTM).
- Traitement local sous Jupyter Notebook avec Python (rasterio, xarray, geopandas...).
- Génération de cartes dans QGIS/ArcGIS.
- Classification des zones à risque selon le Desertification Sensitivity Index (DSI).

Le mémoire est structuré en cinq chapitres :

- I. Cadre théorique : SIG, télédétection et indices environnementaux
- II. Concepts clés : désertification, désert, vents de sable, aérosols
- III. Méthodologie et étude climatique sur la zone d'étude
- IV. Analyse spatio-temporelle : vents de sable, topographie, couloirs
- V. Conclusion, recommandations et perspectives

# CHAPITRE I : SIG, TELEDETECTION ET INDICES ENVIRONNEMENTAUX

## 1 Introduction :

Dans un monde confronté à des mutations environnementales rapides et complexes, la maîtrise de l'information géographique est devenue un enjeu stratégique pour la compréhension des dynamiques territoriales, la gestion durable des ressources naturelles et l'aide à la décision. C'est dans ce contexte que s'inscrit la géomatique, une discipline transversale qui regroupe l'ensemble des outils, méthodes et savoirs scientifiques liés à l'acquisition, au traitement, à l'analyse et à la représentation de l'information géospatiale. (Longley, 2011)

Apparue dans les années 1980 au Québec, la géomatique s'est imposée comme un domaine central à l'intersection de la géographie, de l'informatique, de la cartographie, de la télédétection et des sciences de la Terre. Elle repose sur une approche systémique et intégrée de l'espace, permettant une lecture fine et objective des phénomènes spatiaux et temporels. (Burrough, 1998)

Parmi les outils clés de la géomatique, deux disciplines occupent une place majeure :

- Les Systèmes d'Information Géographique (SIG), qui permettent de stocker, manipuler, croiser et visualiser des données géoréférencées sous forme vectorielle ou raster (Tomlinson, 2003).
- La télédétection, qui permet d'acquérir des données continues et à large échelle depuis des capteurs embarqués (satellites, drones, avions), apportant ainsi une observation régulière et systématique du territoire. (Lillesand, 2015)

L'usage combiné de ces deux technologies permet une analyse spatiale poussée, en particulier dans les contextes de suivi environnemental, de gestion du territoire, de cartographie des risques naturels, ou encore d'évaluation des impacts climatiques (Longley, 2011) . Dans le cas spécifique de la lutte contre la désertification et de la détection des vents de sable en Algérie, cette synergie constitue une approche méthodologique robuste et innovante.

Ainsi, ce chapitre vise à présenter le cadre théorique des SIG et de la télédétection, en tant qu'outils centraux de la géomatique appliquée à l'analyse environnementale. Il s'ouvrira par une définition approfondie des SIG, leurs composants, fonctions et apports dans l'étude spatiale. La seconde section développera ensuite les fondements physiques, techniques et méthodologiques de la télédétection, en insistant sur ses contributions dans l'observation des phénomènes atmosphériques et écologiques.

## 2 Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) :

### 2.1 Définition et origine des SIG

Un Système d'Information Géographique (SIG) est un système informatique destiné à la collecte, la gestion, l'analyse, la modélisation et la représentation de données géographiques. Il permet de lier des données attributaires à des entités spatiales, facilitant ainsi l'analyse spatiale et la prise de décision territoriale (Longley, 2011) .

Le concept est apparu dans les années 1960 avec la création du Canada Geographic Information System (CGIS) par Roger Tomlinson, considéré comme le père du SIG moderne.

## 2.2 Composantes d'un SIG

Un SIG se compose de cinq éléments fondamentaux :

- Données spatiales : vecteurs (points, lignes, polygones) et raster (images satellites, MNT) .
- Données attributaires : informations descriptives associées aux entités spatiales.
- Matériel informatique : ordinateurs, serveurs, GPS, etc.
- Logiciels SIG : ex. QGIS, ArcGIS, GRASS.
- Utilisateurs et procédures : analystes, cartographes, chercheurs



Figure 1: Les Composantes d'un SIG

## 2.3 Fonctionnalités principales des SIG

Les SIG offrent une large palette de fonctionnalités, dont :

- Saisie et structuration des données géospatiales (numérisation, géocodage, géoréférencement)
- Analyse spatiale :
  - Intersections, unions, extractions spatiales
  - Requêtes attributaires ou spatiales

- Calculs de distance, densité, pentes, orientation
- Modélisation spatiale : analyse multicritère (AMC), modélisation hydrologique, érosion, etc.
- Cartographie thématique et dynamique : production de cartes synthétiques ou interactives
- Gestion de bases de données géographiques (spatial databases, PostgreSQL/PostGIS)

**Exemple** : En analysant un MNT (Modèle Numérique de Terrain), un SIG permet de générer des couches de pente ou d'orientation, utiles dans la modélisation des vents ou de l'érosion éolienne.

## 2.4 Types de données utilisées dans les SIG :

*Tableau 1: Types de données utilisées dans les SIG*

| Type de données      | Format               | Exemple                         | Usage                           |
|----------------------|----------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Données vectorielles | .shp, .geojson, .kml | Limites administratives, routes | Analyse de réseaux, zonage      |
| Données raster       | .tif, .img           | NDVI, MNT, images satellites    | Modélisation environnementale   |
| Données tabulaires   | .csv, .xls           | Base attributaire, statistiques | Jointure avec couches spatiales |

Selon Goodchild (2007), l'un des points forts du SIG réside dans sa capacité à intégrer des données multi sources (climatiques, pédologiques, topographiques, etc.) dans une même interface d'analyse.

## 2.5 SIG et prise de décision environnementale :

Les SIG sont largement utilisés pour :

- La surveillance des ressources naturelles (sols, forêts, eau)
- La planification territoriale durable (zonage, aménagement)
- La gestion des risques (inondation, érosion, désertification)
- L'aide à la lutte contre la désertification : localisation des zones sensibles, suivi de la végétation, simulation d'impacts.

**Exemple dans ce mémoire** : L'utilisation du SIG permet de superposer les couches d'aérosols, de relief, de végétation et d'occupation du sol pour identifier les zones vulnérables au passage des vents de sable et à la dégradation des terres.

## 2.6 Avantages et limites des SIG

### 2.6.1 Avantages :

- Vision intégrée et spatialisée
- Analyses multicritères avancées
- Gain de temps dans le traitement de grandes zones
- Réplication des analyses dans le temps

### 2.6.2 Limites :

- Nécessité de données fiables et bien géoréférencées
- Complexité des outils pour les non-spécialistes

- Risques d'interprétations biaisées sans validation terrain

## **2.7 Les données thématiques nécessaires pour une étude et analyse SIG :**

- Les données thématiques font référence à des ensembles d'informations spécifiques, organisées autour d'un thème particulier. Dans le contexte de la cartographie, de la télédétection ou des systèmes d'information géographique (SIG), les données thématiques sont utilisées pour représenter des caractéristiques ou des phénomènes spécifiques sur la Terre :
- Données topographiques : Elles incluent des informations sur le relief, les courbes de niveau, les montagnes, les vallées, et d'autres caractéristiques du terrain.
- Données hydrographiques : Elles représentent les caractéristiques liées à l'eau, comme les rivières, les lacs, les océans, et d'autres formations aquatiques.
- Données sur l'occupation des sols : Ces données indiquent comment la surface terrestre est utilisée, par exemple, en distinguant les zones urbaines, les terres agricoles, les zones forestières, etc.
- Données climatiques : Elles fournissent des informations sur les conditions météorologiques, les températures, les précipitations, le vent, et d'autres variables climatiques.
- Imagerie satellitaire : Les images satellites peuvent être classées comme données thématiques en fonction du type d'informations qu'elles capturent, comme la végétation, la couverture nuageuse, la qualité de l'eau, etc.
- Données démographiques : Elles incluent des informations sur la population, la densité démographique, la répartition des groupes d'âge, etc.
- Données environnementales : Elles englobent divers aspects liés à l'environnement, tels que la qualité de l'air, la qualité de l'eau, la biodiversité, etc.
- Données géologiques : Elles décrivent les caractéristiques géologiques de la terre, comme les types de sols, les formations rocheuses, les failles, etc.

## **3 La Télédétection**

### **3.1 Définition et principes**

La télédétection est l'ensemble des techniques permettant d'acquérir des informations sur la surface terrestre sans contact direct, généralement à partir de capteurs embarqués sur des satellites, des avions ou des drones. Elle repose sur la mesure du rayonnement électromagnétique réfléchi, absorbé ou émis par les objets à la surface de la Terre. (Lillesand, 2015)

Chaque objet possède une signature spectrale caractéristique, c'est-à-dire une façon unique de réagir aux différentes longueurs d'onde, permettant ainsi leur identification et leur analyse. (Chuvieco, 2016)

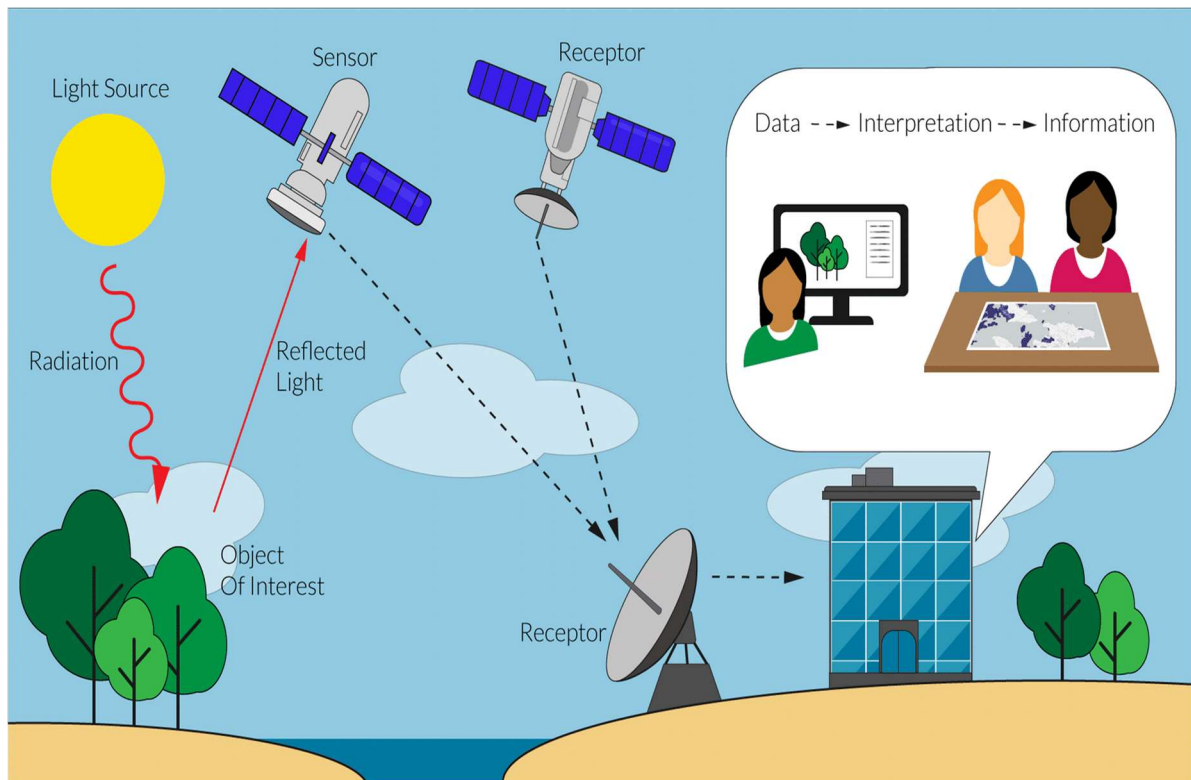


Figure 2: Principe générale de la TLD

Figure Exemple d'un système passif de télédétection par satellite. Image © The Nature Conservancy

### 3.2 Types de capteurs et plateformes

On distingue deux grandes familles de capteurs :

- Capteurs passifs : ils mesurent la lumière solaire réfléchiée par la surface terrestre (ex : Sentinel-2, Landsat).
- Capteurs actifs : ils émettent leur propre signal (radar ou laser) et mesurent son retour (ex : Sentinel-1, LiDAR) (Sabins, 1996) .

Les plateformes d'acquisition peuvent être : orbitales, aériennes ou terrestres (Chuvieco, 2016) .

### 3.3 Produits et applications

Les données de télédétection sont exploitées pour :

- La surveillance de la couverture végétale (NDVI, EVI)
- Le suivi des sols (humidité, texture, occupation)
- L'observation des phénomènes atmosphériques (aérosols, nuages)
- La détection des changements à grande échelle (déforestation, urbanisation) (Lillesand et al., 2015)

Dans le cadre de ce mémoire, la télédétection permet d'analyser les indices d'aérosols (AOD), la dynamique de la végétation (NDVI) et le relief (MNT) pour comprendre les processus liés à la désertification.

### 3.4 Limites et complémentarité avec les SIG

Si la télédétection permet d'observer les phénomènes sur de grandes étendues et à haute fréquence, elle présente certaines limites :

- Sensibilité aux conditions atmosphériques (pour les capteurs optiques)
- Complexité des traitements

### 3.5 Sources de données satellitaires et atmosphériques :

Le choix de la source de données dépend fortement du phénomène environnemental à étudier. Les satellites permettent une observation directe (optique, thermique, radar), tandis que les modèles de réanalyse (comme MERRA-2 ou ERA5) offrent une estimation continue des paramètres atmosphériques issus de l'intégration de multiples observations. Le tableau suivant présente un résumé des plateformes et produits essentiels disponibles pour les études sur la désertification, les aérosols, les vents de sable et les changements environnementaux.

### 3.6 Différence entre les satellites d'observation et les modèles de réanalyse :

Tableau 2: Différence entre les satellites d'observation et les modèles de réanalyse

| Satellites                                                                                                                                                 | Modèles (réanalyses, simulations numériques)                                                                                                                                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Définition : Objets physiques en orbite autour de la Terre équipés de capteurs pour observer directement la surface terrestre, l'atmosphère ou les océans. | Définition : Systèmes numériques qui combinent des observations (y compris satellites) avec des lois physiques pour estimer l'état de l'atmosphère ou de la Terre à tout moment et en tout point. |
| Exemples : Sentinel-2, Landsat-8, MODIS, SMAP, CALIPSO, SRTM                                                                                               | Exemples : MERRA-2 (NASA), ERA5 (ECMWF), GEOS-FP (NASA), GloSSAC                                                                                                                                  |
| Type de données : Images, mesures directes (optique, thermique, radar, lidar, spectromètre)                                                                | Type de données : Grilles numériques, simulations atmosphériques, reconstructions climatiques                                                                                                     |
| Données mesurées : Température, NDVI, humidité du sol, aérosols, élévation, réflectance                                                                    | Données estimées : Vent, température, précipitation, flux radiatif, aérosols (intégrés dans l'espace et le temps)                                                                                 |
| Avantage : Mesures réelles et directes de la Terre, très utiles pour la cartographie précise                                                               | Avantage : Couverture continue dans le temps et dans l'espace, très utile là où il n'y a pas d'observations                                                                                       |
| Inconvénient : Dépend des conditions (ex. nuages), parfois des trous temporels, orbite limitée                                                             | Inconvénient : Ce ne sont pas des observations réelles, mais des estimations modélisées                                                                                                           |
| Utilisation typique : Cartographie, détection de changements, suivi agricole, études locales ou régionales                                                 | Utilisation typique : Études climatiques, modélisation atmosphérique, dynamique du vent ou des aérosols                                                                                           |

### 3.7 Tableau global des satellites et modèles utilisés en télédétection multidisciplinaire :

Tableau 3: Tableau global des satellites et modèles utilisés en télédétection multidisciplinaire

| Nom                  | Type                  | Agence / Organisation | Date lancement / début    | Résolution spatiale        | Résolution temporelle | Domaines d'application                                                                | Données / Capteurs | Accès                              |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|------------------------------------|
| <b>Landsat (5–9)</b> | Satellite optique     | NASA / USGS           | 1984 / 1999 / 2013 / 2021 | 30 m (optique), 100 m (IR) | 16 jours              | Sol, végétation, géologie, mines, usage du sol, géomorphologie                        | OLI, TIRS          | <a href="#">USGS EarthExplorer</a> |
| <b>Sentinel-1A/B</b> | Radar (SAR)           | ESA (Copernicus)      | 2014 / 2016               | ~10 m (SAR)                | 6–12 jours            | Géologie, glissements de terrain, mouvements du sol, inondations, structures urbaines | C-band SAR         | <a href="#">SciHub</a>             |
| <b>Sentinel-2A/B</b> | Optique multispectral | ESA (Copernicus)      | 2015 / 2017               | 10–60 m                    | 5 jours               | Végétation, sols, agriculture, eau, cartographie géologique, occupation du sol        | MSI                | idem                               |
| <b>Sentinel-5P</b>   | Atmosphère            | ESA (Copernicus)      | 2017                      | ~7 km                      | 1 jour                | Aérosols, gaz atmosphériques, pollution, poussière saharienne                         | TROP OMI           | idem                               |
| <b>ASTER (Terra)</b> | Thermique + stéréo    | NASA / METI (Japon)   | 1999                      | 15–90 m                    | 16 jours              | Température, topographie, cartographie géologique, indices miniers                    | VNIR, SWIR, TIR    | <a href="#">ASTER Web</a>          |

|                           |                     |                        |                              |               |                     |                                                                      |                          |                                             |
|---------------------------|---------------------|------------------------|------------------------------|---------------|---------------------|----------------------------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------------|
| <b>MODIS (Terra/Aqua)</b> | Imagerie globale    | NASA                   | 1999 / 2002                  | 250 m – 1 km  | 1 jour              | Végétation, feu, aérosols, climat, hydrologie, température           | NDVI, EVI, LST, AOD      | <a href="#"><u>LP DAAC</u></a>              |
| <b>SMAP</b>               | Radar / radiomètre  | NASA                   | 2015                         | 9 – 36 km     | 2–3 jours           | Humidité des sols, sécheresse, agriculture                           | Radar L-band, radiomètre | <a href="#"><u>NASA SMAP</u></a>            |
| <b>SRTM</b>               | Radar embarqué      | NASA (Shuttle Mission) | 2000                         | 30 m (global) | Unique              | MNT, pente, hydrologie, géomorphologie, infrastructure               | Radar C-band             | <a href="#"><u>USGS</u></a>                 |
| <b>ASTER GDEM</b>         | MNT stéréoscopique  | NASA / METI            | 2009                         | 30 m          | Unique              | Modèle numérique d'élévation, analyse géomorphologique               | VNIR                     | idem                                        |
| <b>ALOS / PALSAR</b>      | Radar (L-band)      | JAXA (Japon)           | 2006 – 2011 (ALOS-1), ALOS-2 | 10 m – 100 m  | Variable            | Mouvements du sol, déformations crustales, géophysique               | L-band SAR               | <a href="#"><u>ALOS PALSAR Data Hub</u></a> |
| <b>GPM</b>                | Radar précipitation | NASA / JAXA            | 2014                         | ~5 km         | 3 heures            | Pluviométrie globale, hydrologie, gestion des ressources en eau      | GMI, DPR                 | <a href="#"><u>GPM Portal</u></a>           |
| <b>ICESat-2</b>           | Lidar altimétrique  | NASA                   | 2018                         | ~17 m         | 91 jours (revisite) | Épaisseur glace, topographie fine, structure végétale, océanographie | ATLAS Lidar              | <a href="#"><u>NSIDC</u></a>                |
| <b>Aeolus (fini)</b>      | Lidar Doppler vent  | ESA                    | 2018 (fin 2023)              | ~87 km        | 1–2 jours           | Vents horizontaux en altitude,                                       | ALADIN                   | <a href="#"><u>ESA Aeolus</u></a>           |

|                            |                            |     |                |                 |         |                                                               |         |                     |
|----------------------------|----------------------------|-----|----------------|-----------------|---------|---------------------------------------------------------------|---------|---------------------|
|                            |                            |     |                |                 |         | dynamique<br>atmosphérique                                    | Doppler |                     |
| <b>Envisat /<br/>MERIS</b> | Multi-<br>instru-<br>ments | ESA | 2002 –<br>2012 | 300 m<br>– 1 km | 3 jours | Couleur de<br>l'eau,<br>phytoplancton,<br>environnement marin | MERIS   | Archives<br>via ESA |

### 3.8 Modèles et réanalyses

Tableau 4: Tableau Modèles et réanalyses

| Nom du modèle  | Agence       | Type                       | Résolution | Domaines d'application                             | Données principales                         |
|----------------|--------------|----------------------------|------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| <b>MERRA-2</b> | NASA<br>GMAO | Réanalyse<br>atmosphérique | ~50 km     | Climat, vent,<br>poussières,<br>aérosols           | Vent, humidité,<br>température, AOD         |
| <b>ERA5</b>    | ECMWF        | Réanalyse<br>climatique    | ~31 km     | Climat global,<br>hydrologie,<br>température       | Température,<br>évapotranspiration,<br>vent |
| <b>GEOS-FP</b> | NASA         | Modèle<br>atmosphérique    | ~25 km     | Aérosols,<br>poussière, CO <sub>2</sub> ,<br>ozone | Concentrations<br>atmosphériques            |
| <b>GloSSAC</b> | NASA         | Données<br>climatologiques | 2.5°       | Aérosols<br>stratosphériques                       | Extinction optique,<br>SSA                  |

### 3.9 Indices en télédétection :

Un indice en télédétection est une formule mathématique appliquée aux valeurs spectrales (réflectance) des bandes d'un capteur satellite afin d'amplifier ou d'extraire une information thématique précise sur la surface terrestre (ex. végétation, eau, urbanisation, brûlure, poussière, etc.). Ces indices permettent de simplifier l'interprétation des images satellites en traduisant la signature spectrale des objets géographiques en valeurs numériques

#### 3.9.1 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index):

Le NDVI est un indice de végétation qui mesure la vigueur et la densité de la végétation verte. Il repose sur le principe que les plantes absorbent fortement la lumière rouge (RED) pour la photosynthèse et réfléchissent l'infrarouge proche (NIR). Nous avons utilisé cet indice comme l'étude déjà fait dans "Mapping Desertification in Algerian Steppes Using NDVI and Rainfall Data" (Pr Mederbal, 2017)

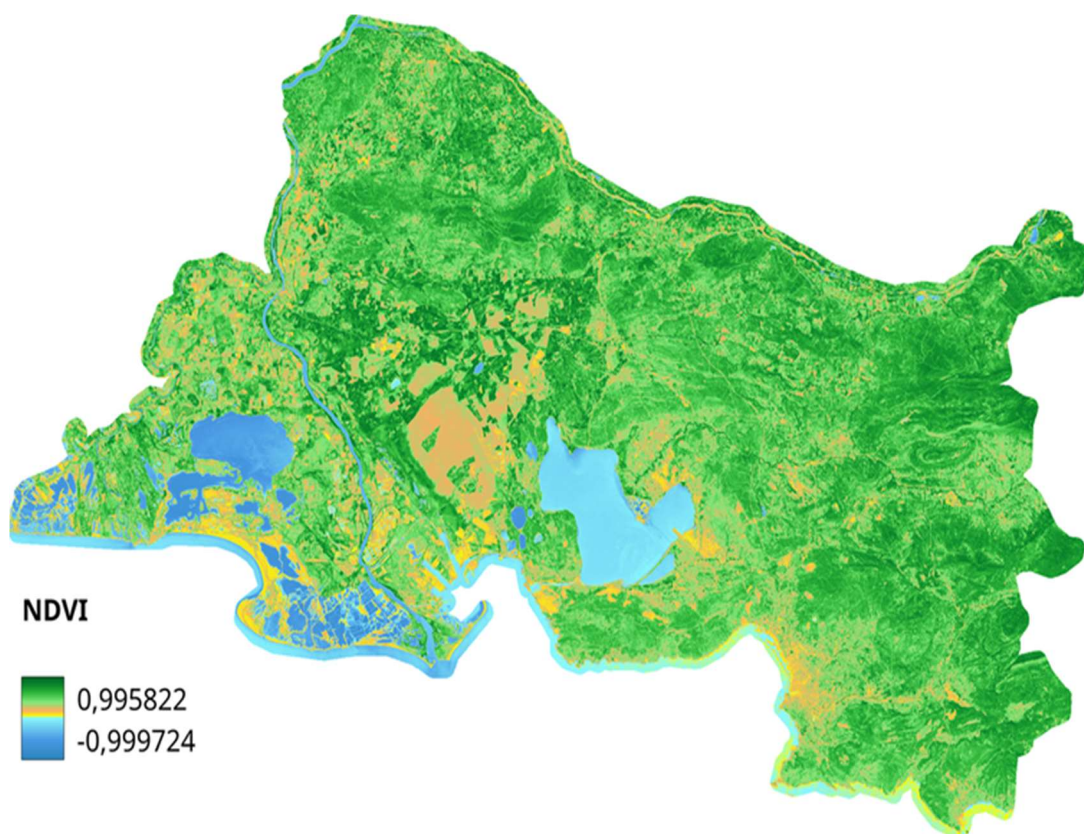


Figure 3: Exemple NDVI des Bouches-du-Rhône pour le 13 juin 2019 Image en ligne (R1)

<https://briques-de-geomatique.readthedocs.io/fr/latest/outils-teledetection.html#indices-monteverdi>

### 3.9.2 NDWI (Normalized Difference Water Index):

Le NDWI est conçu pour détecter la présence d'eau ou l'humidité du sol. Il utilise les différences de réflectance entre les bandes NIR et SWIR.

### 3.9.3 NDBI (Normalized Difference Built-up Index):

Le NDBI est un indice utilisé pour détecter les zones bâties (urbaines). Il exploite la réflectance élevée des structures en béton dans le SWIR comparée à celle dans le NIR.

### 3.9.4 AOD (Aerosol Optical Depth) :

L'épaisseur optique des aérosols (AOD) n'est pas un indice calculé manuellement, mais un paramètre dérivé des mesures satellitaires. Il représente la quantité d'aérosols atmosphériques dans une colonne verticale d'air, utilisé pour évaluer la pollution atmosphérique, la poussière saharienne, les tempêtes de sable.

## 3.10 Les principaux indices en télédétection

Tableau 5: Tableau des principaux indices en télédétection

| Nom de l'indice                                | Abréviation | Formule                                                 | Domaine d'application                 | Capteurs satellites               | Références         |
|------------------------------------------------|-------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| Indice de Végétation par Différence Normalisée | NDVI        | $(\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED})$ | Végétation, biomasse, désertification | Landsat, MODIS, Sentinel-2, AVHRR | Rouse et al., 1974 |

|                                            |            |                                                                                                          |                                                      |                          |                       |
|--------------------------------------------|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Indice d'Eau Normalisé                     | NDWI       | $(\text{NIR} - \text{SWIR}) / (\text{NIR} + \text{SWIR})$                                                | Hydrologie, humidité du sol, surveillance sécheresse | Landsat, Sentinel-2      | Gao, 1996             |
| Indice d'Eau de McFeeters                  | NDWI (McF) | $(\text{GREEN} - \text{NIR}) / (\text{GREEN} + \text{NIR})$                                              | Détection des plans d'eau                            | Landsat, Sentinel-2      | McFeeters, 1996       |
| Indice de Brûlure Normalisé                | NBR        | $(\text{NIR} - \text{SWIR2}) / (\text{NIR} + \text{SWIR2})$                                              | Zones brûlées, incendies forestiers                  | Landsat, MODIS           | Key & Benson, 2006    |
| Indice de Sécheresse de Végétation         | VHI        | Combinaison de NDVI et TCI                                                                               | Stress hydrique de la végétation                     | MODIS, NOAA-AVHRR        | Kogan, 1995           |
| Indice de Poussière                        | AOD        | Mesure directe via inversion optique                                                                     | Aérosols, poussières désertiques                     | MODIS, Sentinel-5P, CAMS | Kaufman et al., 1997  |
| Indice de Minéralisation                   | SMI        | $(\text{SWIR1} - \text{SWIR2}) / (\text{SWIR1} + \text{SWIR2})$                                          | Minéraux, sols nus                                   | ASTER, Landsat           | Kruse et al., 1993    |
| Indice de Bâtiment Normalisé               | NDBI       | $(\text{SWIR} - \text{NIR}) / (\text{SWIR} + \text{NIR})$                                                | Urbanisation, artificialisation des sols             | Landsat, Sentinel-2      | Zha et al., 2003      |
| Indice de Chlorophylle                     | GCI        | $(\text{NIR} / \text{GREEN}) - 1$                                                                        | Productivité végétale                                | Sentinel-2, MODIS        | Gitelson et al., 1996 |
| Indice de Stress Hydrique (thermal)        | TCI        | $(\text{LSTmax} - \text{LST}) / (\text{LSTmax} - \text{LSTmin})$                                         | Stress hydrique, température de surface              | MODIS, Landsat (thermal) | Kogan, 1995           |
| Indice de végétation ajusté au sol         | SAVI       | $[(\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED} + \text{L})] \times (1 + \text{L})$               | Zones peu végétalisées, semi-arides                  | Landsat, MODIS           | Huete, 1988           |
| Indice de végétation amélioré              | EVI        | $2.5 \times (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + 6 \times \text{RED} - 7.5 \times \text{BLUE} + 1)$ | Milieux tropicaux, densité végétale élevée           | MODIS, Sentinel-2        | Huete et al., 2002    |
| Indice de végétation par différence simple | DVI        | $\text{NIR} - \text{RED}$                                                                                | Estimation simple de la biomasse                     | Tous capteurs optiques   | Tucker, 1979          |

|                                                  |      |                                                 |                                   |                     |                       |
|--------------------------------------------------|------|-------------------------------------------------|-----------------------------------|---------------------|-----------------------|
| Indice de végétation atmosphériquement résistant | ARVI | (NIR - (2×RED - BLUE)) / (NIR + (2×RED - BLUE)) | Corrigé des effets atmosphériques | MODIS, AVHRR        | Kaufman & Tanré, 1992 |
| Indice de végétation basé sur les bandes rouges  | RVI  | NIR / RED                                       | Ancêtre du NDVI                   | Landsat, MODIS      | Jordan, 1969          |
| Indice de surface imperméable                    | ISI  | NDBI - NDVI                                     | Urbanisation, étalement urbain    | Landsat, Sentinel-2 | Xu, 2008              |

## 4 Utilisation des outils numériques pour l'analyse géospatiale :

### 4.1 Google Earth Engine (GEE)

#### 4.1.1 Présentation générale

Google Earth Engine (GEE) est une plateforme de traitement géospatial massivement parallèle qui permet d'analyser des images satellites et des ensembles de données géospatiales à l'échelle planétaire via le cloud. Elle intègre une immense base de données satellite (Landsat, Sentinel, MODIS, SRTM...) et propose une interface de programmation JavaScript ou Python.

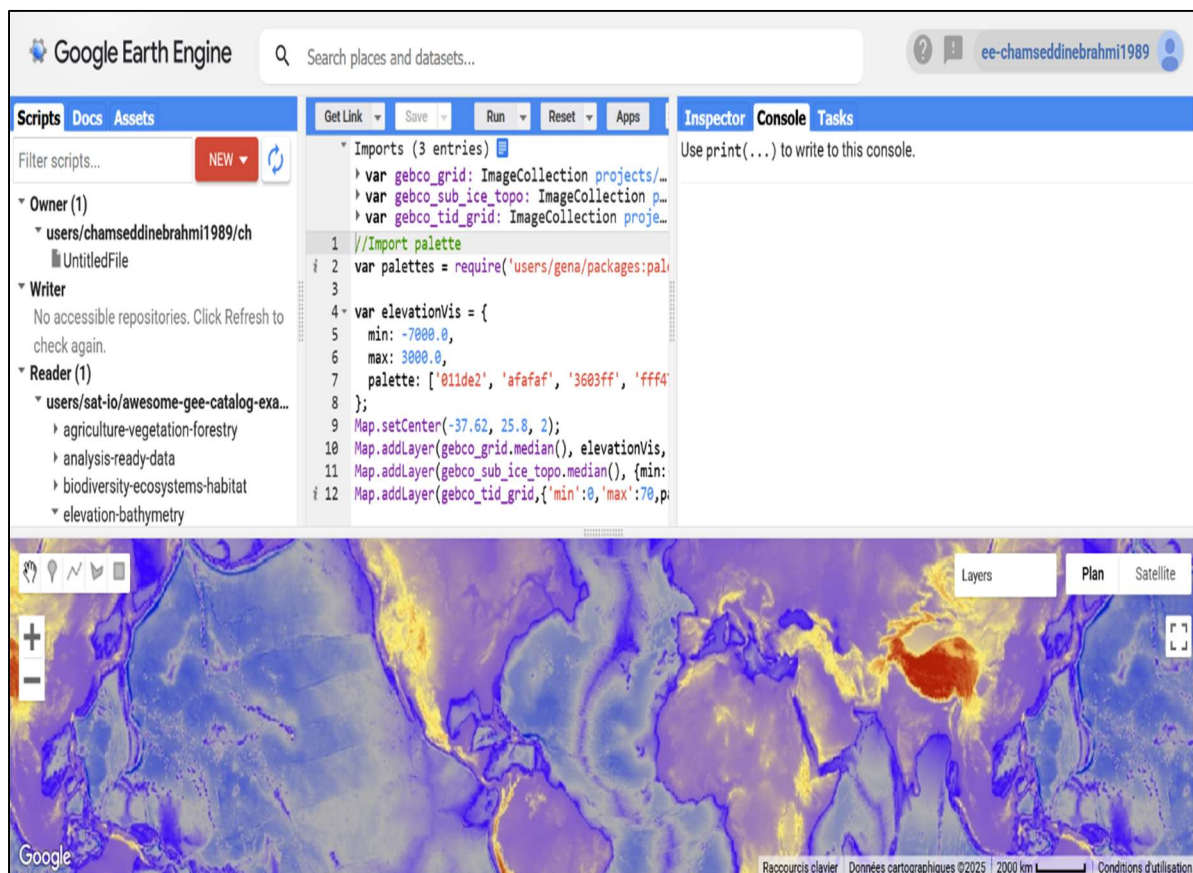


Figure 4: Interface GEE

#### 4.1.2 Utilité dans ce PFE

GEE a été utilisé dans ce projet pour :

- Télécharger les données d'aérosols MODIS AOD et SRTM sur l'Algérie.
- Réaliser une analyse temporelle de l'épaisseur optique des aérosols (AOD) pour identifier les périodes et régions les plus affectées.
- Exporter les résultats sous forme de GeoTIFF et CSV pour traitement local.

## 4.2 Jupyter Notebook

### 4.2.1 Présentation

Jupyter Notebook est un environnement interactif permettant d'écrire et d'exécuter du code Python dans un format documenté, incluant du texte en Markdown, des équations, des graphiques et des cartes. C'est un outil central en sciences des données, télédétection et géomatique.

### 4.2.2 Utilité dans ce PFE

- Intégration des résultats exportés de GEE pour analyse locale.
- Visualisation des MNT (Modèles Numériques de Terrain), des cartes d'aérosols et des zones exposées à la désertification.
- Génération de graphiques temporels et statistiques à partir des données CSV.
- Calcul de l'indice DSI

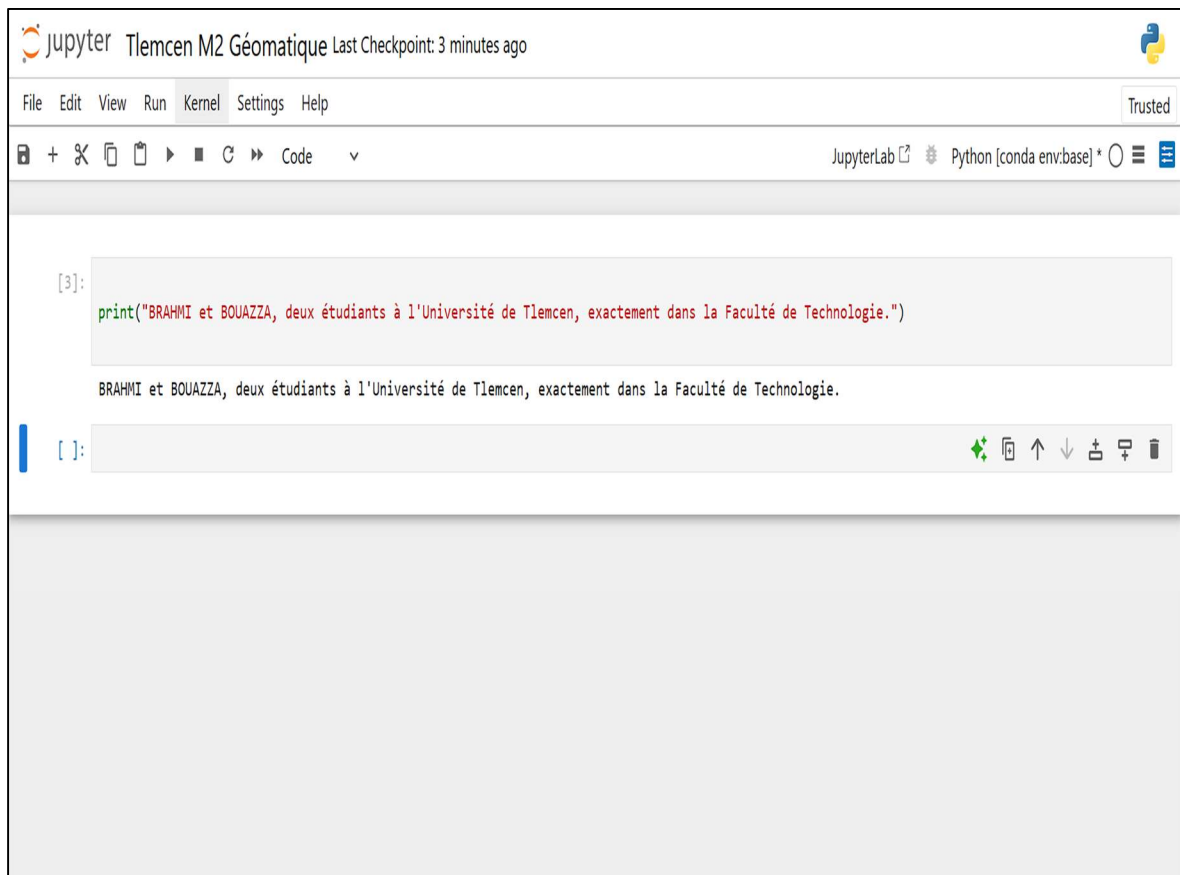


Figure 5: Interface Jupyter Notebook

### 4.3 Python et ses bibliothèques géospatiales

Tableau 6: Python et ses bibliothèques géospatiales

| Bibliothèque    | Description & Référence                                                         |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Geopandas       | Manipulation des shapefiles et données vectorielles (Jordahl et al., 2014–2024) |
| Rasterio        | Lecture et analyse de rasters GeoTIFF (Gillies et al., 2013–2024)               |
| Matplotlib      | Visualisation graphique (Hunter, 2007)                                          |
| Numpy           | Calculs matriciels (van der Walt et al., 2011)                                  |
| Pandas          | Analyse de données tabulaires (McKinney, 2010)                                  |
| Xarray          | Données multidimensionnelles comme NetCDF/GRIB (Hoyer & Hamman, 2017)           |
| Earthengine-api | API Python pour GEE (Google Developers, 2024)                                   |
| Folium          | Cartes interactives (Folium Docs, 2024)                                         |

La combinaison de Arcgis, Qgis, Google Earth Engine, Python et Jupyter Notebook forme une chaîne de traitement robuste et moderne pour les études environnementales. Elle permet :

- Une acquisition massive de données satellitaires (GEE)
- Un traitement avancé localement (Python, Arcgis, Qgis)
- Une visualisation efficace et interactive (Jupyter/Folium/Matplotlib/Arcgis/Qgis)

Cette méthodologie est recommandée dans de nombreuses publications récentes (Li et al., 2021) pour les analyses multi-sources à grande échelle, notamment pour la télédétection appliquée aux problématiques de désertification, vents de sable et gestion territoriale.



Figure 6: Logo Python

### 4.4 Perplexity AI :

Aide à la pratique de la programmation, leur intégration dans le processus de développement permet d'accélérer la résolution de problèmes, de gagner du temps sur la documentation, et d'améliorer la qualité du code produit

### 4.5 ArcGIS et QGIS :

Logiciels de Systèmes d'Information Géographique (SIG) permettant la gestion, l'analyse et la visualisation de données spatiales ; ArcGIS est une solution propriétaire développée par Esri, tandis que QGIS est une alternative libre et open source soutenue par une large communauté internationale.



*Figure 7: Logo des logiciel ArcGIS et QGIS*

## **5 Conclusion :**

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) et la télédétection représentent aujourd'hui des outils incontournables dans l'analyse environnementale, grâce à leur capacité à fournir une vision intégrée, spatio-temporelle et évolutive du territoire. Tandis que les SIG permettent la structuration, l'analyse et la représentation des données spatiales, la télédétection offre une source inépuisable de données actualisées sur l'état de la surface terrestre et de l'atmosphère, leur complémentarité méthodologique s'avère particulièrement pertinente dans le cadre de la surveillance des dynamiques de désertification. En croisant des indicateurs géographiques, topographiques, climatiques et atmosphériques, ces outils offrent un cadre rigoureux pour identifier les zones à risque, anticiper les évolutions futures et appuyer les politiques de lutte contre la dégradation des terres.

# **CHAPITRE II :**

## **DESERTIFICATION, VENTS DE SABLE, AEROSOLS**

### **1 Introduction**

La désertification est un processus de dégradation des terres dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches, principalement dû à des facteurs climatiques et aux activités humaines. Elle se traduit par une perte de la productivité biologique et économique des sols, Milliards d'hectares. Chaque année, environ 12 millions d'hectares sont perdus, à travers le monde, du fait de la dégradation de la terre, et ce rythme va en s'accroissant

Dans les zones arides et semi-arides, le bilan hydrologique annuel est négatif, ce qui signifie que l'eau s'évapore plus qu'elle ne tombe au cours d'une année. Par conséquent, l'eau est, la plupart du temps, peu abondante et les implantations humaines peuvent se regrouper autour des rares sources d'eau, telle que les rivières, sources, puits, points de captage d'eau, réservoirs et oasis. La population totale des zones sèches à l'échelle mondiale est de 2 milliards de personnes, hors zones hyperarides (désert), ainsi les zones sèches accueillent actuellement presque un tiers de la population mondiale (UNCCD,2011)

### **2 La désertification**

#### **2.1 Définition du désert**

Le désert est une zone géographique caractérisée par une faible précipitation annuelle (généralement moins de 250 mm/an), une végétation très clairsemée et une forte évaporation. Les déserts ne sont pas nécessairement chauds : on distingue les déserts chauds (ex. Sahara) et les déserts froids (ex. Antarctique). UNEP (United Nations Environment Programme), 1992.

#### **2.2 La désertification en Algérie**

La désertification, en Algérie, concerne essentiellement les steppes des régions arides et semiarides qui ont toujours été l'espace privilégié de l'élevage ovin extensif. Ces parcours naturels qui jouent un rôle fondamental dans l'économie agricole du pays sont soumis à des sécheresses récurrentes et à une pression anthropique croissante : surpâturage, exploitation de terres impropres aux cultures... Depuis plus d'une trentaine d'années, ils connaissent une dégradation de plus en plus accentuée de toutes les composantes de l'écosystème (Couvert végétal, sol et ses éléments, faune et son habitat). Cette dégradation des terres et la désertification qui en est le stade le plus avancé, se traduisent par la réduction du potentiel biologique et par la rupture des équilibres écologiques et socio-économique. (Slimane, 2008)



Figure 8: Phénomène de la désertification image en ligne (R2)

## 2.3 Comment les scientifiques expliquent la formation des déserts ?

Les scientifiques ont proposé plusieurs facteurs naturels et anthropiques expliquant la formation et l'évolution des déserts. Voici les principaux modèles :

### 2.3.1 Facteurs naturels (modèles climatiques et géographiques)

**2.3.1.1 Modèle de Hadley (circulation atmosphérique) :** Les zones désertiques se situent généralement autour des tropiques (environ  $30^{\circ}$  N/S) où l'air sec descend, provoquant un manque de pluie (ex. Sahara, désert d'Arabie). (Hadley)

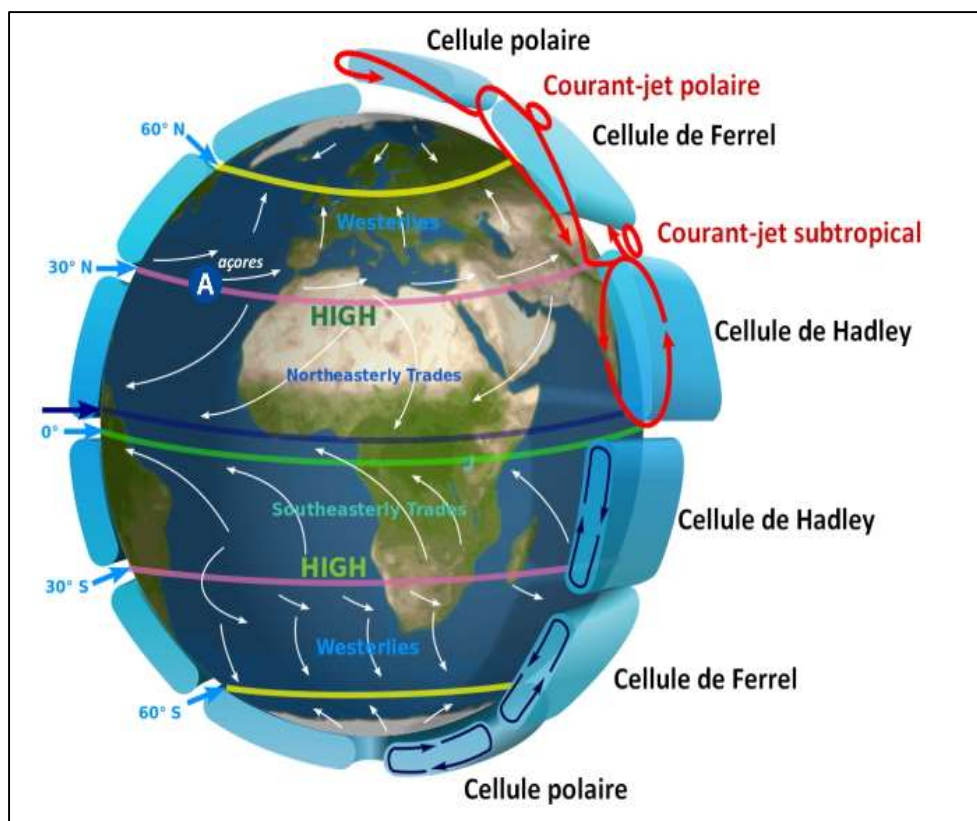


Figure 9: Schéma de la circulation atmosphérique globale sur Terre image de Kaidor via Libération

- 2.3.1.2 **Effet de Foehn et ombre pluviométrique** : Les montagnes bloquent les nuages. L'air perd son humidité en montant, et redescend sec de l'autre côté formation de déserts d'abri orographique (ex. désert d'Atacama). (Barry, 2009)
- 2.3.1.3 **Continentalité** : Les déserts à l'intérieur des continents sont loin des océans et donc reçoivent peu d'humidité (ex. désert de Gobi).



Figure 10: Effet de Foehn et ombre pluviométrique Image de Météo France

## 2.3.2 Facteurs anthropiques (modèles de dégradation des terres) (Basso, 2000)

- 2.3.2.1 **Désertification (MEDALUS, UNCCD)** : Les scientifiques distinguent les déserts naturels des zones désertifiées, le projet MEDALUS (EU) propose que la désertification soit liée aux : Surpâturage, Déforestation, Irrigation non durable, Urbanisation incontrôlée, Changements climatiques induits. (Kosmas, 1999)
- 2.3.2.2 **Modèle DSI (Desertification Sensitivity Index)** : Utilisé pour identifier la sensibilité à la désertification il combine plusieurs facteurs : sol, climat, végétation, pression humaine. Dans notre projet de fin d'étude nous avons procédé au calcul de cet indice.

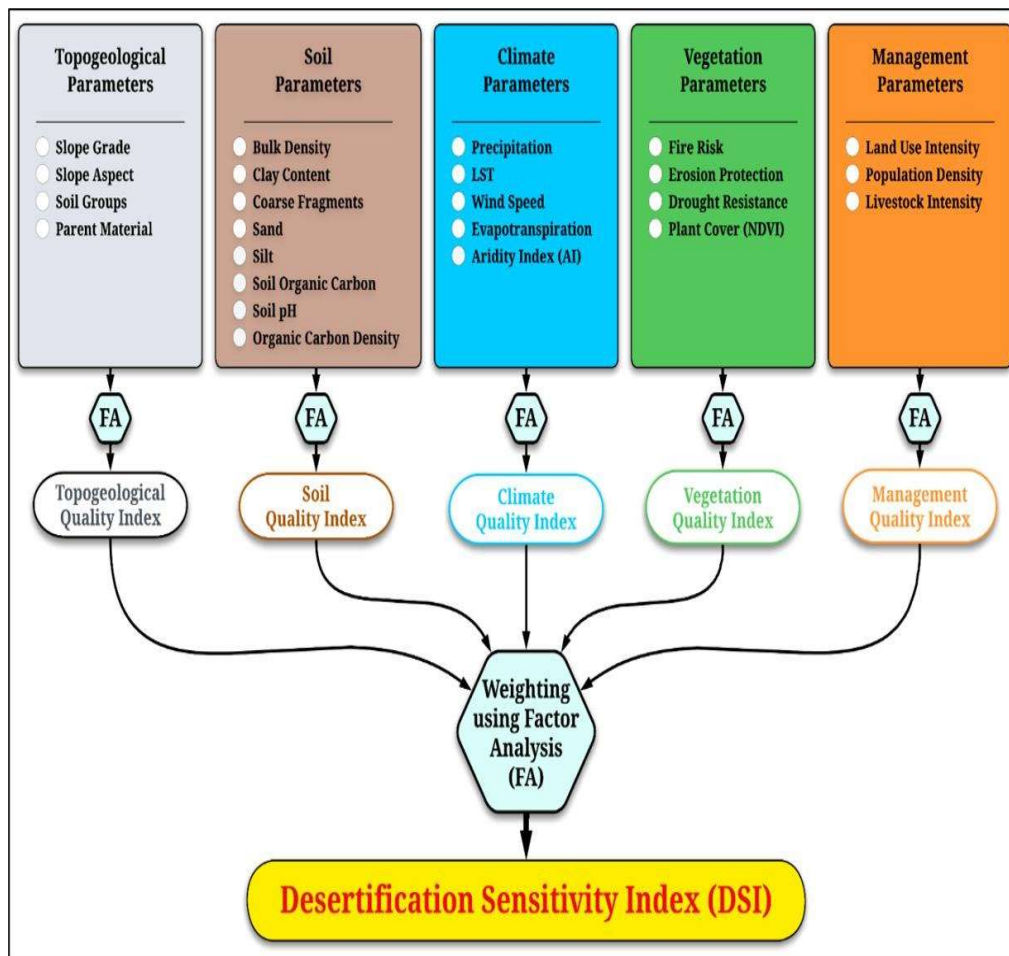


Figure 11: Desertification Sensitivity Index (Kouba, 2023) par Ahmed Alliouche et Yacine Kouba

## 2.4 Les grands types de déserts :

Les déserts peuvent être classés en quatre catégories principales :

### 2.4.1 Selon leur origine climatique :

Tableau 7: Type de désert selon leur origine climatique

| Type de désert                                         | Description                                                        | Exemples                                                     | Mécanisme                                |
|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| <b>Désert subtropical</b>                              | Chaud et sec, autour de 20–30° de latitude.                        | Sahara (Afrique), Rub al-Khali (Arabie), Kalahari (Afrique)  | Cellule de Hadley → air sec qui descend  |
| <b>Désert d'abri orographique</b> (rain shadow desert) | Situé derrière une chaîne de montagnes, bloqué des précipitations. | Désert de Mojave (USA), Patagonie (Argentine)                | Ombre pluviométrique                     |
| <b>Désert côtier</b>                                   | Bord de mer, influencé par un courant océanique froid.             | Atacama (Chili), Namib (Namibie), Périphérie ouest du Sahara | Air froid et sec → pas de condensation   |
| <b>Désert intérieur / continental</b>                  | Situé à l'intérieur des terres, loin des océans.                   | Gobi (Chine/Mongolie), Taklamakan                            | Pas d'humidité transportée depuis la mer |

|                       |                                                       |                       |                                 |
|-----------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| <b>Désert polaire</b> | Très froid, précipitations très faibles (< 200 mm/an) | Antarctique, Arctique | Air froid = peu de vapeur d'eau |
|-----------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------|

## 2.4.2 Selon la température

Tableau 8: Type de désert Selon la température

| Type                | Température                         | Exemple           |
|---------------------|-------------------------------------|-------------------|
| <b>Désert chaud</b> | > 30°C en journée, très aride       | Sahara, Sonora    |
| <b>Désert froid</b> | < 10°C, précipitations très faibles | Antarctique, Gobi |

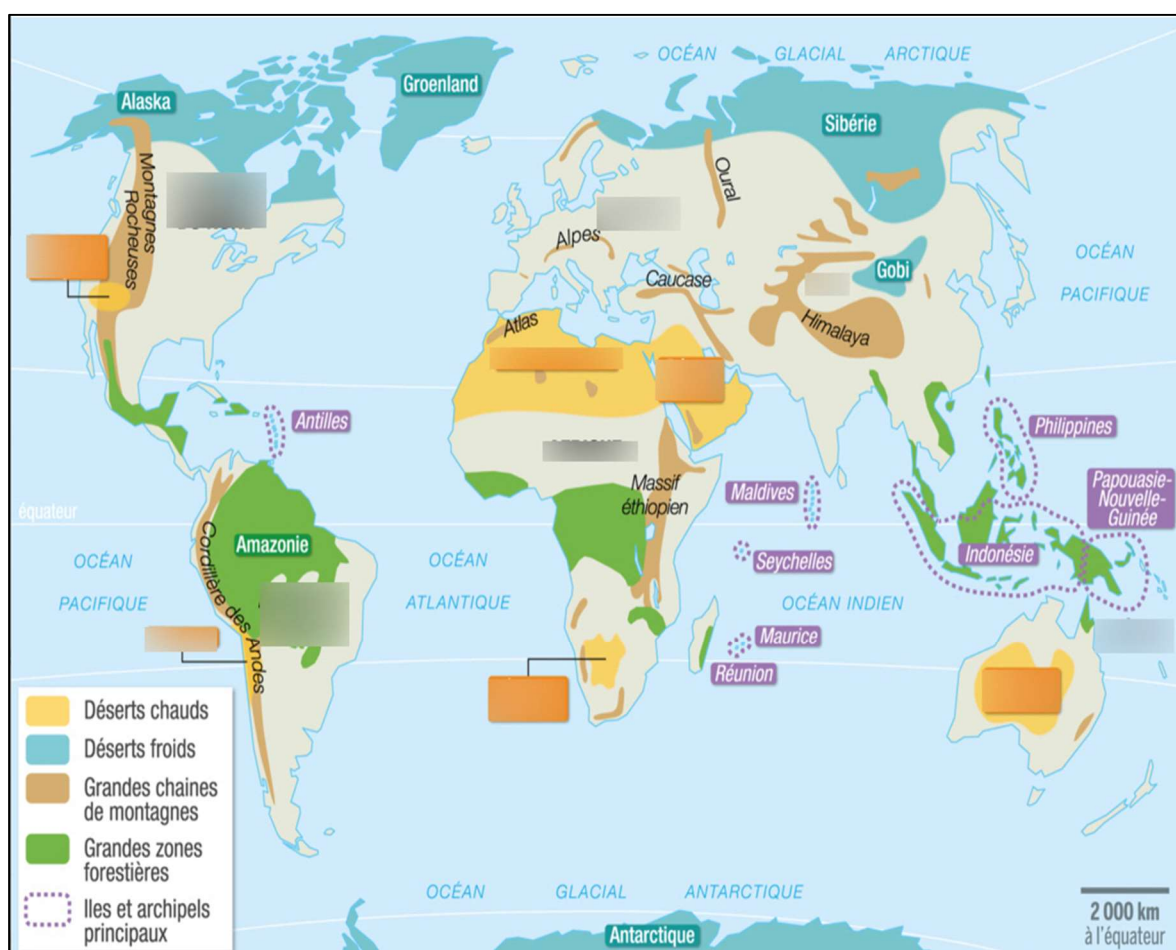


Figure 12: Les déserts dans le monde image en ligne (R4) quizlet.com



Figure 13: Les grands déserts du monde image de ProjetEcolo

### 2.4.3 Types de déserts selon la couverture du sol (formes morphologiques) :

Les scientifiques classifient les déserts en plusieurs types selon la nature de leur surface :

Tableau 9: Types de déserts selon la couverture du sol (formes morphologiques)

| Type de désert                        | Description                                                | Composition dominante                    | Exemple                                             |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| <b>Erg</b> (ou désert de dunes)       | Vast espace couvert de dunes de sable formées par le vent  | Sable fin, mobile                        | Grand Erg Oriental (Algérie), Rub al-Khali (Arabie) |
| <b>Reg</b> (ou désert de pierres)     | Surface recouverte de cailloux ou galets polis par le vent | Graviers, galets, surface dure et érodée | Sahara algérien, désert de Libye                    |
| <b>Hamada</b>                         | Plateau rocheux, surface dure, sans sable ni végétation    | Roches nues, très peu altérées           | Hamada du Dra (Maroc), Tassili n'Ajjer              |
| <b>Serir</b>                          | Surface de graviers fins (plus fins que dans un reg)       | Petits cailloux, souvent bien triés      | Sud libyen, entre reg et hamada                     |
| <b>Désert salin (sebkha ou chott)</b> | Zone où l'eau s'évapore et laisse des sels à la surface    | Sels minéraux (chlorure, gypse, etc.)    | Chott Melrhir (Algérie), Salar d'Uyuni (Bolivie)    |
| <b>Désert argileux (playa)</b>        | Ancien lac asséché, surface argileuse fissurée             | Argile, limons                           | Vallée de la Mort (USA), Chott El Jerid (Tunisie)   |

**Détails :**

Erg = mot arabe signifiant "dune". Représente jusqu'à 20% du Sahara.

Reg = appelé parfois "désert minéral", formé après le lessivage éolien d'anciens ergs.

Hamada = du mot arabe "ḥammāda" = "terre dure", très difficile à traverser.

Sebkha / chott = zone très saline, dangereuse pour les véhicules.

**2.5 Types de dunes (formes principales) :**

Les dunes sont des formes d'accumulation de sable créées par le vent (processus éolien). Leur forme dépend :

- De la direction et la constance du vent
- De la quantité de sable disponible
- De la présence ou non de végétation ou d'obstacles (Pye, 2009) (Lancaster, 1995)

Tableau 10: Type de dune

| Type de dune                        | Description                                                    | Conditions                                          |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| <b>Dune en croissant (Barchane)</b> | En forme de croissant, avec les pointes dirigées sous le vent. | Vent unidirectionnel, peu de sable, sol dur.        |
| <b>Dune longitudinale (ou seif)</b> | Longue crête parallèle à la direction du vent.                 | Vents dominants parallèles, sable modéré.           |
| <b>Dune transversale</b>            | Crêtes perpendiculaires au vent, très régulières.              | Vent constant, beaucoup de sable.                   |
| <b>Dune étoilée (ou pyramidal)</b>  | Forme de pyramide avec crêtes multiples partant d'un centre.   | Vents multidirectionnels, grande quantité de sable. |
| <b>Dune parabole</b>                | En forme de U inversé, les bras pointent vers le vent.         | Présence de végétation, vent fort, sable humide.    |
| <b>Dune en dôme (dome dune)</b>     | Monticule arrondi sans crête visible.                          | Rare, vent faible et sable abondant.                |



Figure 14: Types des dunes de sable Image de Dictionnaire Visuel

## 2.6 Formation des dunes (processus éolien)

Les dunes se forment par un processus en 3 étapes :

- **Érosion (déflation)** : Le vent soulève les grains de sable (surtout les plus petits) et les transporte.
- **Transport** :
  - ✓ **Saltation** : Sauts des grains de sable (80% du transport).
  - ✓ **Reptation** : Roulement ou glissement sur le sol.
  - ✓ **Suspension** : Pour les particules très fines (poussière).
- **Dépôt (accumulation)** : Quand la vitesse du vent diminue, les grains se déposent et forment des dunes.

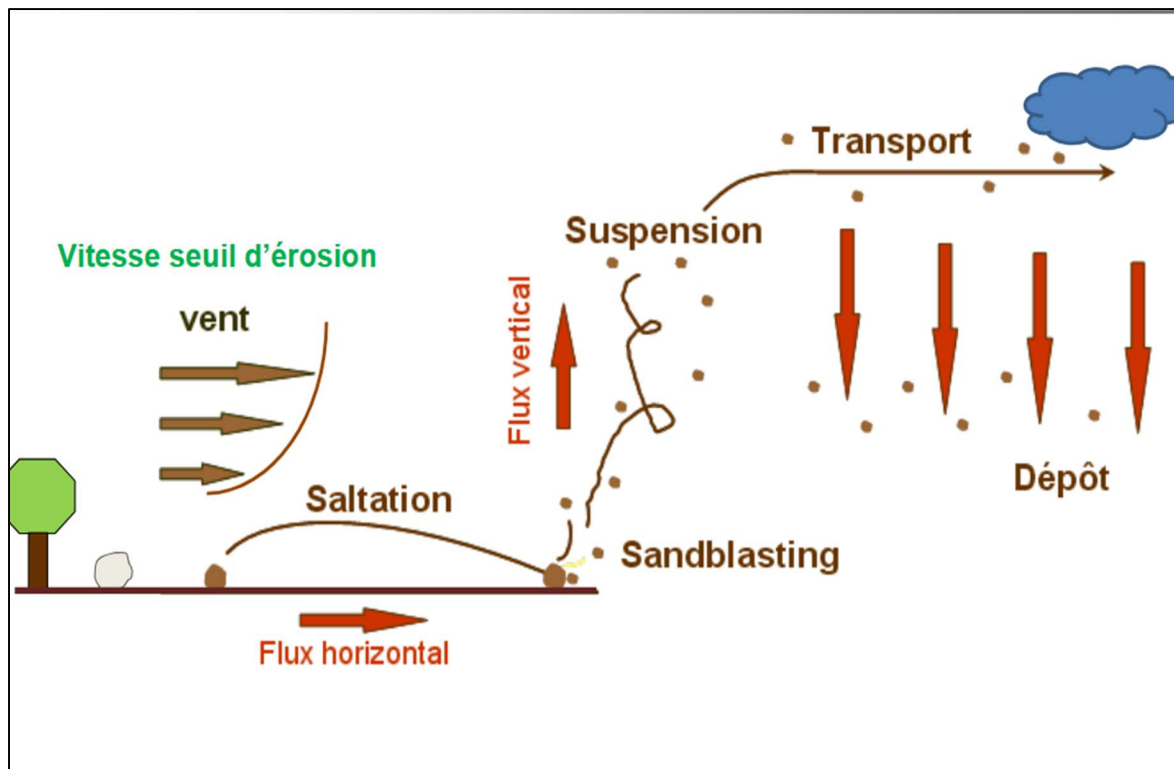


Figure 15: Erosion éolienne dans les régions arides et semi-arides image de Jean Louis RAJOT Christel BOUET

## 2.7 La désertification en Algérie

La désertification, en Algérie, concerne essentiellement les steppes des régions arides et semiarides qui ont toujours été l'espace privilégié de l'élevage ovin extensif. Ces parcours naturels qui jouent un rôle fondamental dans l'économie agricole du pays sont soumis à des sécheresses récurrentes et à une pression anthropique croissante : surpâturage, exploitation de terres impropres aux cultures... Depuis plus d'une trentaine d'années, ils connaissent une dégradation de plus en plus accentuée de toutes les composantes de l'écosystème (Couvert végétal, sol et ses éléments, faune et son habitat). Cette dégradation des terres et la désertification qui en est le stade le plus avancé, se traduisent par la réduction du potentiel biologique et par la rupture des équilibres écologiques et socio-économiques (Slimane, 2008)

## 2.8 La zone steppique

Les steppes algériennes, situées entre les isohyètes 100 à 400 mm, couvrent plus de 20 millions d'hectares d'une végétation basse et rabougrie, soumise à une exploitation humaine très accentuée. La vocation des steppes est principalement l'élevage extensif d'ovins, complété par une céréaliculture aléatoire. De nos jours, le constat majeur est celui d'une diminution de la superficie de ces steppes due à une dégradation parfois extrême. Le tout est aggravé par des sécheresses périodiques plus ou moins sévères et prolongées. (BRAHIM, 2012)

### 2.8.1 Présentation des régions steppiques

Sur le plan physique, les steppes algériennes, situées entre l'Atlas Tellien au Nord et l'Atlas Saharien au Sud couvrent une superficie globale de 20 millions d'hectares. (Slimane, 2008)

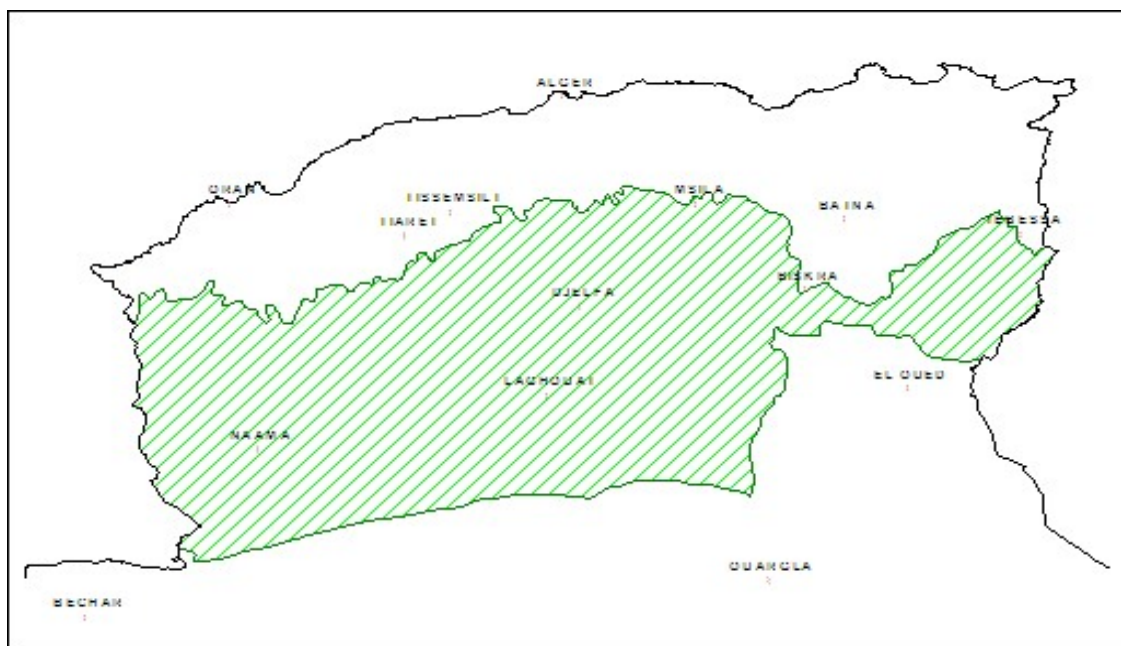


Figure 16: Délimitation des steppes algériennes par Nedjraoui Dalila et Bédrani Slimane (Slimane, 2008)

### 3 Les vents :

#### 3.1 Les principaux types de vents en Afrique du Nord : Références (Shear, 2010) (Middleton, 2001) (Kröpelin, 2008) (Seznec, 1991)

Tableau 11: Les principaux types de vents en Afrique du Nord

| Nom du vent                   | Origine                            | Direction                    | Période           | Effets                                                                           |
|-------------------------------|------------------------------------|------------------------------|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Sirocco (ou Chili)</b>     | Dépression saharienne              | Sud → Nord                   | Printemps, été    | Vent chaud et sec, transporte poussières vers la Méditerranée et l'Europe du Sud |
| <b>Ghibli (Libye)</b>         | Dépression thermique saharienne    | Sud-ouest → Nord-est         | Printemps, été    | Vent chaud, sec, très poussiéreux, baisse rapide de l'humidité                   |
| <b>Khamsin (Égypte)</b>       | Masse d'air saharienne             | Sud / Sud-ouest → Nord       | Mars à juin       | Vent chaud, sec et chargé de sable, durée de 2 à 5 jours                         |
| <b>Chergui (Algérie)</b>      | Hautes pressions sur le Sahara     | Est / Sud-est → Nord-ouest   | Été               | Vent très chaud, sec, cause des canicules et transporte des poussières           |
| <b>Haboob</b>                 | Front de tempêtes (surtout Soudan) | Variable (vents descendants) | Saison des pluies | Violente tempête de poussière, soudaine, souvent en fin d'orage                  |
| <b>Vent de Nord (Nortada)</b> | Haute pression atlantique          | Nord / Nord-ouest → Sud      | Été               | Vent marin frais, parfois humide, pénètre jusqu'au sud marocain                  |

|                               |                         |                      |                    |                                                                                       |
|-------------------------------|-------------------------|----------------------|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Alizé continental sec</b>  | Anticyclone subtropical | Est → Ouest          | Toute l'année      | Vent régulier, sec, peu poussiéreux (hors des zones sahariennes)                      |
| <b>Vent d'est (Harmattan)</b> | Désert du Sahara        | Est → Ouest          | Novembre à mars    | Vent sec, froid le matin, poussiéreux, surtout dans le Sahel                          |
| <b>Monsoon marin</b>          | Océan Atlantique        | Sud-ouest → Nord-est | Été (juillet-août) | Apporte humidité sur les côtes de Mauritanie et du Maroc, limite au Sahara occidental |

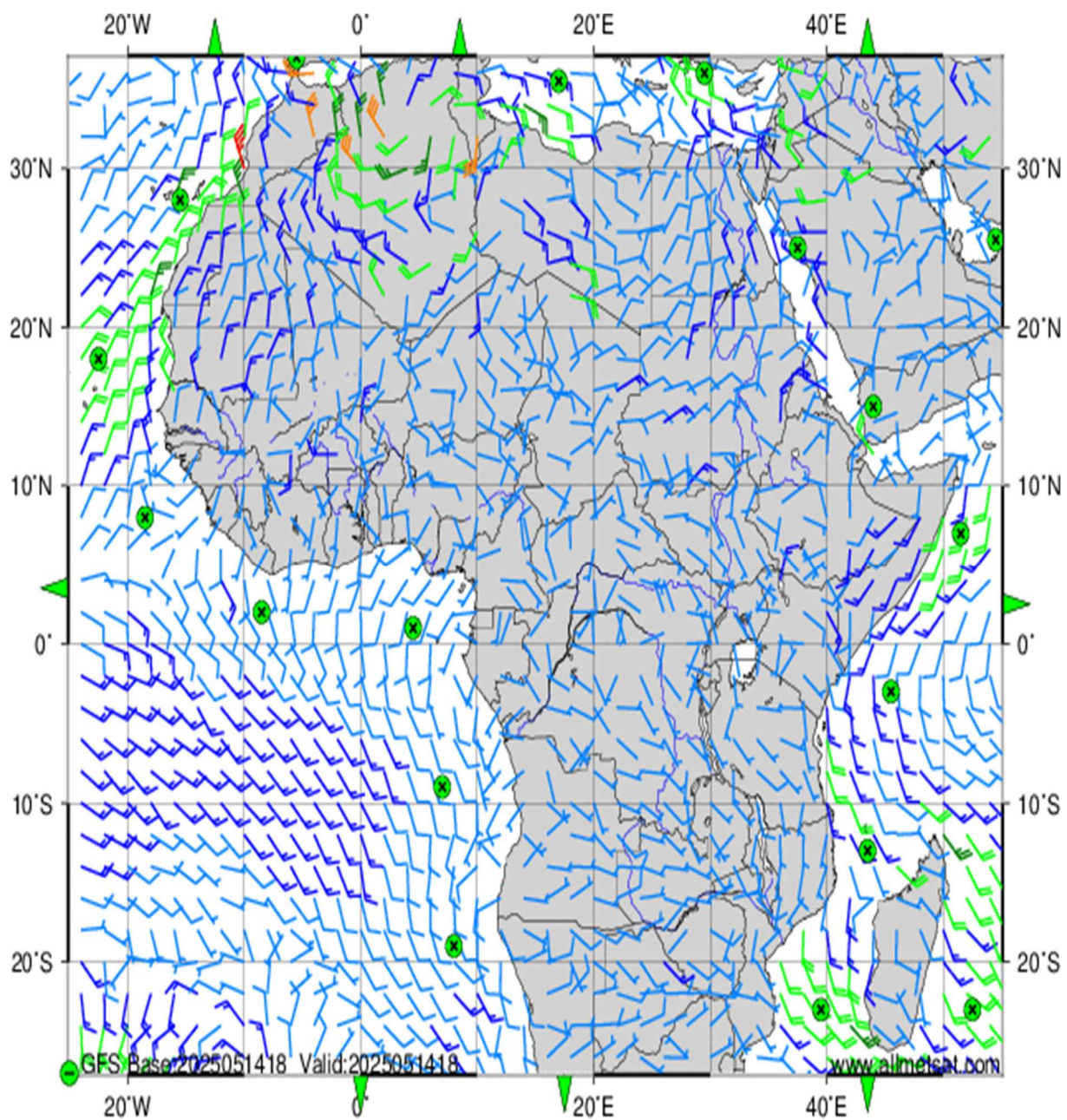
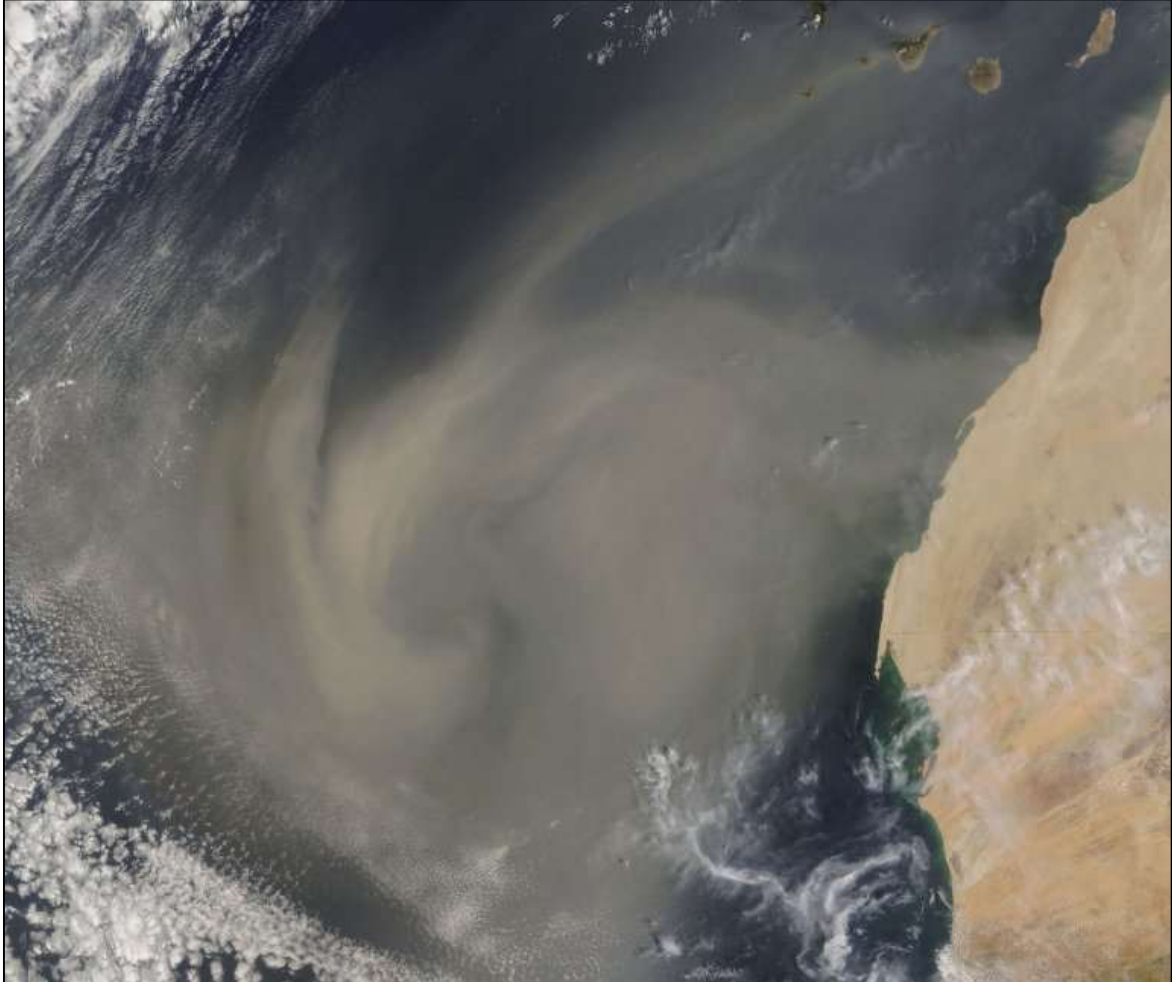


Figure 17: Exemple prévision du vent 18/05/2025 à 09 UTC animation (Inf)

## 4 Les Aérosols Atmosphériques et leur Impact sur la Désertification en Algérie

Les aérosols atmosphériques jouent un rôle central dans la dynamique du climat, la qualité de l'air et les processus désertiques. Dans le contexte des zones steppiques et sahariennes de l'Algérie, l'étude des aérosols permet d'évaluer la fréquence et la direction des vents de sable, ainsi que leur contribution à l'avancée de la désertification. (Seinfeld, 2016) (Change, 2021)



*Figure 18: Tempête de sable vue de l'espace (source : NASA image).*

### 4.1 Définition des aérosols

Un aérosol est une suspension de particules solides ou liquides dans l'atmosphère. Ces particules, de taille microscopique, proviennent soit de sources naturelles (poussière saharienne, cendres volcaniques, sel marin, pollen), soit de sources anthropiques (combustion industrielle, émissions véhiculaires, fumée des feux de forêts).

### 4.2 Impact climatique et environnemental

Les aérosols influencent le climat de deux manières principales :

- **Effet direct** : réflexion ou absorption du rayonnement solaire.
- **Effet indirect** : modification de la formation des nuages et de l'albédo du sol.

Ils ont un effet refroidissant ou réchauffant selon leur nature, et participent à la réduction de la visibilité, à l'érosion des sols, ainsi qu'à la dégradation de la santé humaine.

### 4.3 Types de particules « PM10 et PM2.5 »

Les PM (Particulate Matter) sont classées selon leur diamètre :

- **PM10 ( $\leq 10 \mu\text{m}$ )** : particules grossières, affectent les voies respiratoires supérieures. Très présentes dans les tempêtes de sable et les régions désertiques.
- **PM2.5 ( $\leq 2.5 \mu\text{m}$ )** : particules fines, pénètrent dans les poumons et le sang. Elles sont souvent issues de la combustion, de la pollution urbaine ou des feux.

### 4.4 Observation des aérosols par télédétection

#### – Produits satellitaires utilisés

Le satellite Sentinel-5P (TROPOMI), via le programme Copernicus, fournit le produit :

COPERNICUS/S5P/OFFL/L3\_AER\_AI

Bande utile : absorbing\_aerosol\_index, exprimant l'indice des aérosols absorbants (AAI).

#### – Fonctionnement de l'indice AAI

L'indice AAI (Absorbing Aerosol Index), aussi appelé indice d'aérosols absorbants, est un paramètre dérivé de la réflectance UV mesurée par satellite. Il permet de détecter la présence d'aérosols atmosphériques absorbants tels que les poussières minérales (dust), les cendres volcaniques ou la fumée des feux de végétation. Mais cet indice est précalculé dans les données Copernicus et accessible via Earth Engine.

### 4.5 Différentes longueurs d'onde (AOD) et comparaison avec PM

L'AOD (Aerosol Optical Depth) mesure l'opacité de l'atmosphère due aux aérosols à différentes longueurs d'onde. Voici une comparaison : (Agency., 2020) (al., 2002) (WHO, 2021)

Tableau 12: Différentes longueurs d'onde (AOD) et comparaison avec PM

| Longueur d'onde | Nom de bande            | Sensibilité                                                                  | Types de particules détectées                                | Applications principales                          |
|-----------------|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 469 nm          | Bleu                    | Très sensible aux petites particules (forte diffusion Rayleigh)              | PM2.5 (fumée, pollution fine)                                | Pollution urbaine, feux, aérosols de combustion   |
| 550 nm          | Vert                    | Sensibilité modérée (bande standard MODIS)                                   | Mélange PM2.5 / PM10                                         | Observation climatologique, albédo, NDVI (base)   |
| 670 nm          | Rouge                   | Sensible aux particules plus grosses (plus de diffusion Mie)                 | PM10, poussières, sable                                      | Détection poussière, surveillance désertification |
| 865 nm          | Infrarouge proche (NIR) | Moins affecté par les petites particules, bon pour la détection de poussière | Particules grossières $> 2.5 \mu\text{m}$ (PM10 + sable fin) | Détection sable/poussière, suivi désert           |

|                |                         |                                                                                   |                                                      |                                                 |
|----------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| <b>1240 nm</b> | Infrarouge moyen (SWIR) | Très peu affecté par l'atmosphère (faible diffusion), pénètre les aérosols denses | Très grosses particules (sable, cendres volcaniques) | Étude des colonnes de sable, particules lourdes |
|----------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|

Les PM2.5 sont plus légères et fines, liées à la combustion (transport, industrie). Les PM10 incluent PM2.5 + particules grossières, souvent minérales (poussière saharienne, sable, pollen).

#### ❖ Explications scientifiques :

- **Le bleu est sensible aux PM2.5 :**

- Les petites particules diffusent plus efficacement la lumière courte (effet Rayleigh).
- C'est pour cela que la fumée et la pollution urbaine apparaissent bien en bleu sur MODIS ou Sentinel-5P.

- **L'infrarouge capte mieux la poussière :**

- Les grosses particules ( $> 1 \mu\text{m}$ ) diffusent moins la lumière bleue mais davantage dans le proche infrarouge (diffusion de Mie).
- Les bandes 865 nm et 1240 nm sont utilisées pour détecter les colonnes de sable (comme avec le produit AOD Deep Blue de MODIS).

#### 4.6 Couloirs de vent de sable :

Un couloir de vent de sable ou couloir éolien est une zone préférentielle de circulation des vents chargés en poussière ou sable, où la topographie et les conditions climatiques canalisent ces flux sur des trajectoires répétitives.

En Algérie, ces couloirs se forment souvent du Sud (zones sahariennes) vers le Nord (steppes, Hauts Plateaux) pendant le printemps, transportant les aérosols désertiques (détection : Sentinel-5P, MODIS).

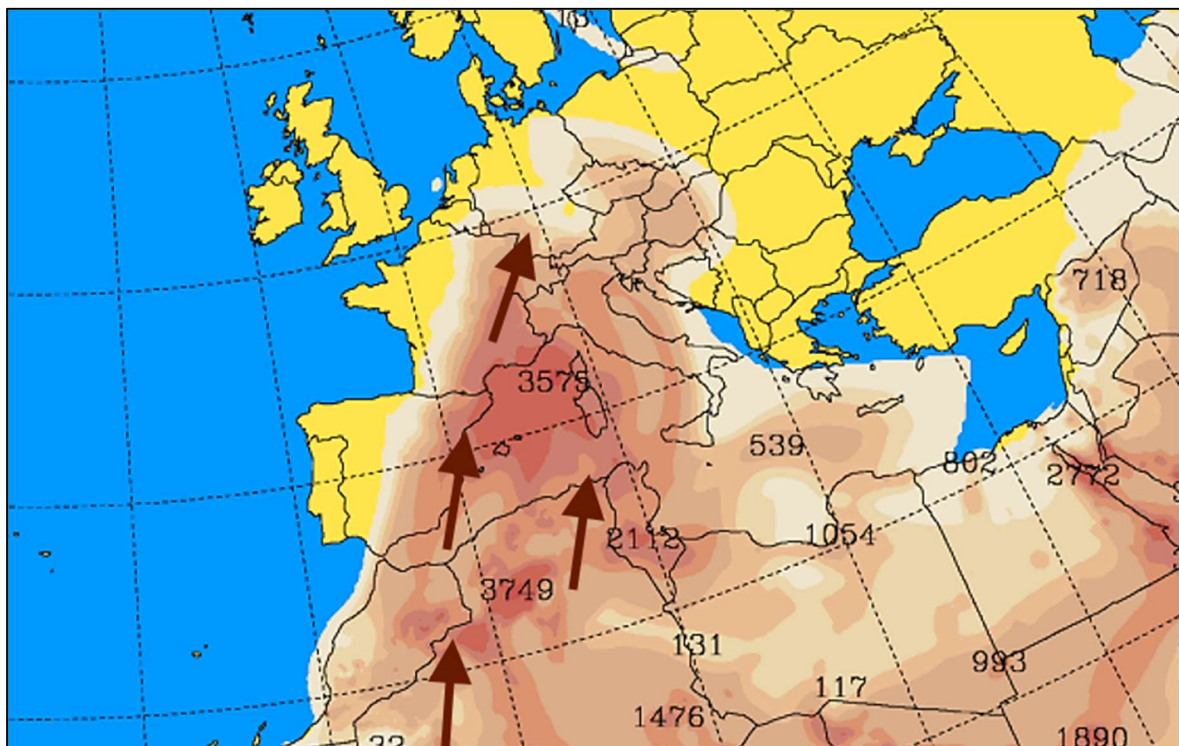


Figure 19: Sable du Sahara Image de meteo-express.com

## 5 Modélisation SRTM

### 5.1 Définition :

La modélisation SRTM désigne l'exploitation des données altimétriques issues de la mission Shuttle Radar Topography Mission, menée par la NASA en 2000, pour représenter en trois dimensions la surface terrestre sous forme de Modèle Numérique de Terrain (MNT). (Farr, 2007)

### 5.2 Caractéristiques des données SRTM

Tableau 13: Caractéristiques des données SRTM

| Caractéristique        | Valeur                                  |
|------------------------|-----------------------------------------|
| Origine                | NASA, mission SRTM (2000)               |
| Résolution spatiale    | 90 m (globale) / 30 m (SRTM1 - USA)     |
| Type de données        | Modèle numérique de terrain (MNT / DEM) |
| Format courant         | Raster (GeoTIFF, .hgt)                  |
| Référence altimétrique | Niveau moyen de la mer (EGM96)          |

### 5.3 Types de cartes obtenues à partir du SRTM :

Tableau 14: Types de cartes obtenues à partir du SRTM

| Type de carte                                  | Description                                                            | Utilité principale                                                              |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Carte hypsométrique (altitude)</b>          | Représente l'altitude du terrain par des couleurs graduées             | Analyse du relief, des altitudes, délimitation des zones de haute montagne      |
| <b>Carte des pentes</b>                        | Calcule l'inclinaison (%) de chaque pixel par rapport à l'horizontale  | Études d'érosion, agriculture, infrastructures, glissements de terrain          |
| <b>Carte des courbes de niveau</b>             | Lignes d'altitude régulières dérivées du MNT                           | Cartographie classique, appui à la navigation et l'aménagement                  |
| <b>Carte des bassins versants / écoulement</b> | Délimite les zones de drainage et les directions de l'eau              | Analyse hydrologique, prévention des inondations, gestion des ressources en eau |
| <b>Carte des obstacles topographiques</b>      | Met en évidence les zones dépassant un seuil d'altitude (ex. > 1200 m) | Études sur les couloirs de vent, la dispersion des poussières                   |

### 5.4 Rôle des montagnes dans le blocage des vents

Un Montagnes est une barrière naturelle au vent de sable

Les chaînes montagneuses (ex : Atlas saharien, Djebel Amour, Monts des Ksour, etc.) créent un effet d'ombre éolienne :

- Le vent est dévié, canalisé ou freiné

- Les particules sont piégées ou déposées (formation de dunes ou dépôts)
- Derrière les montagnes, zones abritées, moins exposées aux aérosols

Les vents contournent les montagnes forment des couloirs naturels visibles par télédétection

## **6 Conclusion**

L'analyse des concepts de désertification et de vents de sable constitue une étape fondamentale pour appréhender les dynamiques environnementales affectant les zones Des Hauts Plateaux algériens. La désertification, en tant que processus complexe et multifactoriel, résulte d'interactions entre les conditions climatiques, les pratiques humaines et les caractéristiques physiques du milieu. Les vents de sable, quant à eux, jouent un rôle clé dans l'aggravation de ce phénomène en contribuant à l'érosion éolienne. La compréhension fine de ces notions permet de mieux orienter les méthodologies d'analyse spatiale, de cibler les indicateurs pertinents (comme le NDVI ou l'AOD) et de développer des outils d'aide à la décision adaptés à l'échelle régionale. Ce socle conceptuel est indispensable pour construire une approche cohérente et rigoureuse dans le cadre de l'étude géomatique menée sur la désertification en Algérie.

# **CHAPITRE III : METHODOLOGIE ET ETUDE CLIMATIQUE SUR LA ZONE D'ETUDE**

## **1 Introduction**

Ce chapitre est consacré à l'analyse des caractéristiques climatiques et topographiques de la région d'étude, englobant les wilayas de Laghouat, Djelfa, Tiaret et Naâma, El Baydh . L'objectif est de mieux comprendre l'influence des facteurs naturels, notamment les précipitations, la température, l'humidité, le vent et le relief, sur la dynamique de la désertification. L'approche adoptée repose sur l'analyse des courbes pluviométriques, la cartographie climatique (précipitations, températures, vents) ainsi que l'étude du modelé topographique, afin de mettre en évidence les conditions naturelles qui favorisent ou limitent l'avancée du phénomène.

## **2 Présentation la zone d'étude**

La zone d'étude couvre une partie importante de l'Algérie située dans la région des Hautes Plaines steppiques. Elle comprend les wilayas de El Bayadh, Laghouat, Tiaret, Djelfa et Naâma, situées entre les latitudes approximatives de 32°N à 36°N et les longitudes de 0° à 3°Ouest. Ces wilayas sont caractérisées par une topographie variée comprenant des plateaux, des collines et des dépressions. Cette diversité physique influence la répartition des ressources naturelles et la dynamique des processus de dégradation environnementale, notamment la désertification.

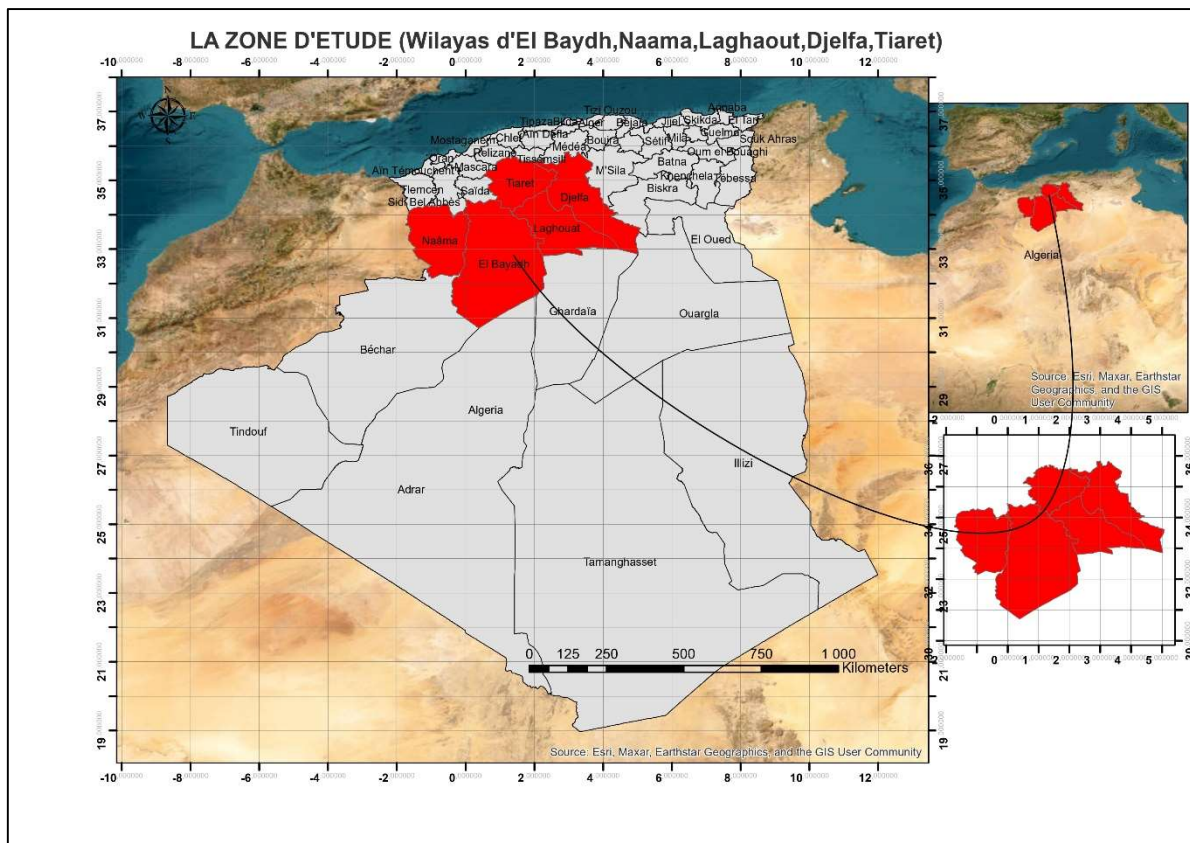


Figure 20: Carte de la zone d'étude

## 2.1 Climat

Le climat de la zone est de type semi-aride à aride, marqué par une faible pluviométrie annuelle variant entre 150 mm et 350 mm, avec une forte irrégularité interannuelle.

Les étés sont chauds et secs, avec des températures pouvant dépasser 40°C, tandis que les hivers sont froids, surtout dans les zones élevées comme à Djelfa ou El Bayadh, où les températures peuvent descendre en dessous de 0°.

## 2.2 Population et activités économiques

La population des wilayas étudiées est majoritairement rurale, avec des activités économiques centrées sur l'élevage extensif, notamment de moutons et de chèvres, et l'agriculture traditionnelle dépendant fortement des conditions climatiques.

Ces régions souffrent de surexploitation des ressources naturelles, notamment des sols et de la végétation steppique, ce qui accentue la vulnérabilité écologique face à la désertification.

Les pressions anthropiques, combinées aux facteurs climatiques, favorisent la dégradation des terres et la perte de couverture végétale.

### 3 L'évolution de la couverture végétale dans la zone d'étude à l'aide des données Satellitaires Landsat

#### 3.1 Données et méthodologie

- Accéder à Landsat Explorer : Ouvrez le lien : <https://landsatexplorer.esri.com>
- Définir la zone d'étude
- Choisir des images satellites appropriées : utilise landsat 8 ou 9
- Sélectionnez différentes dates (ex. : 1984 et 2024) pour observer les changements dans le temps.
- Afficher l'indice de végétation NDVI : Dans le menu latéral, sélectionnez Rendus (Renderers) ou Analyse (Analysis)
- Comparer les dates : Utilisez l'outil de comparaison Swipe Tool ou Compare pour visualiser deux images en parallèle.

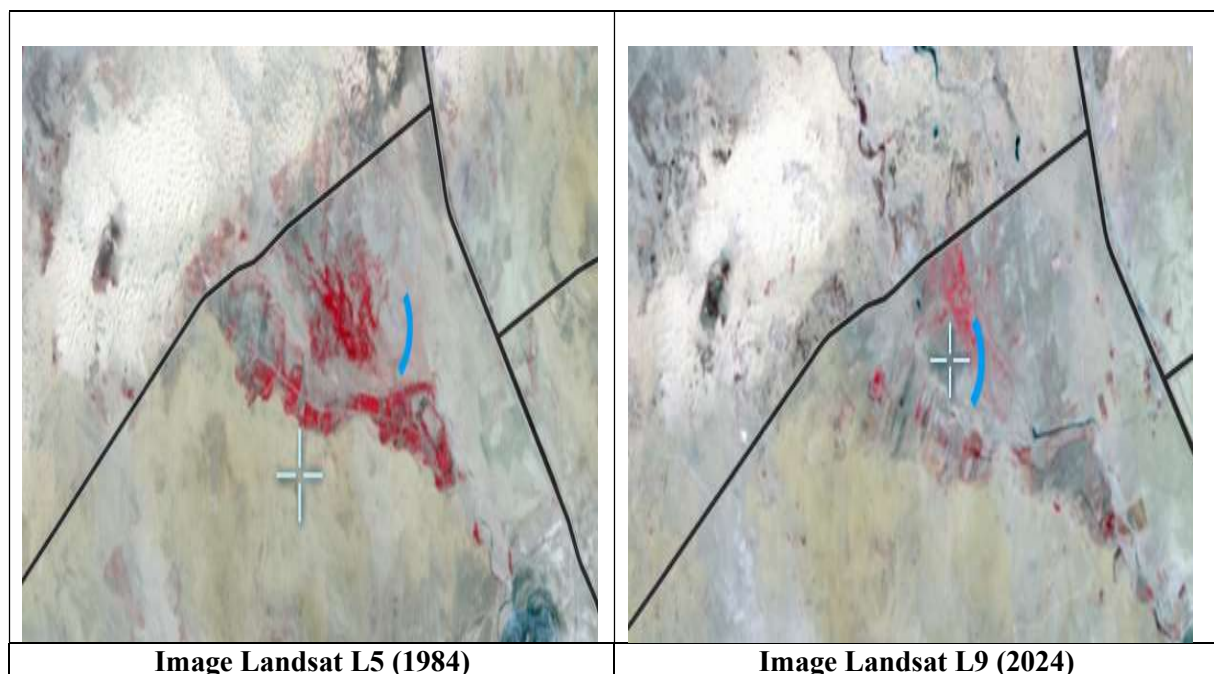


Figure 21: Image Landsat L5 (1984) ET L9 (2024)

#### 3.2 Résultats

Une comparaison des deux images satellites Landsat de la même zone, prises à 40 ans d'intervalle (1984 et 2024) :

##### 3.2.1 Végétation et couverture du sol (zones rouges)

###### – 1984 (Landsat 5) :

La zone rouge, qui représente généralement la végétation (en fausses couleurs infrarouges), est bien plus étendue et dense.

On observe des taches rouges continues et intenses, indiquant une couverture végétale significative.

###### – 2024 (Landsat 9) :

La zone rouge est nettement réduite, plus diffuse et fragmentée.

La couverture végétale semble avoir diminué, avec des zones rouges plus petites et moins intenses.

## 4 Changements dans l'occupation des sols

- **Réduction de la végétation** : La diminution de la zone rouge suggère une dégradation de la couverture végétale, probablement due à des facteurs comme la sécheresse, l'urbanisation, l'agriculture intensive ou le changement climatique.

### 4.1 La carte d'occupation de sol

Une carte d'occupation des sols représente la couverture biophysique de la surface terrestre, c'est-à-dire les types de surfaces visibles comme l'eau, les forêts, les prairies, les zones urbaines, ou les terres nues. Elle décrit la nature physique du sol, sans forcément indiquer l'usage humain précis.

#### 4.1.1 Données et méthodologie

##### 4.1.1.1.1 Données :

- GLC\_FCS30D (Global Land Cover Fine Classification System 30 mètres (résolution spatiale) Dynamic (temporel : série de données sur plusieurs années))
- GLC\_FCS30D est un jeu de données mondial sur l'occupation du sol avec une résolution de 30 mètres, couvrant la période de 1985 à 2022. Il a été produit à l'aide de techniques d'intelligence artificielle et d'images satellites (comme Landsat).
- Lien officiel pour le téléchargement : Page des données GLC\_FCS30 (Université Tsinghua), le format (généralement GeoTIFF ou NetCDF).

##### 4.1.1.1.2 Méthodologie : carte d'occupation de sol

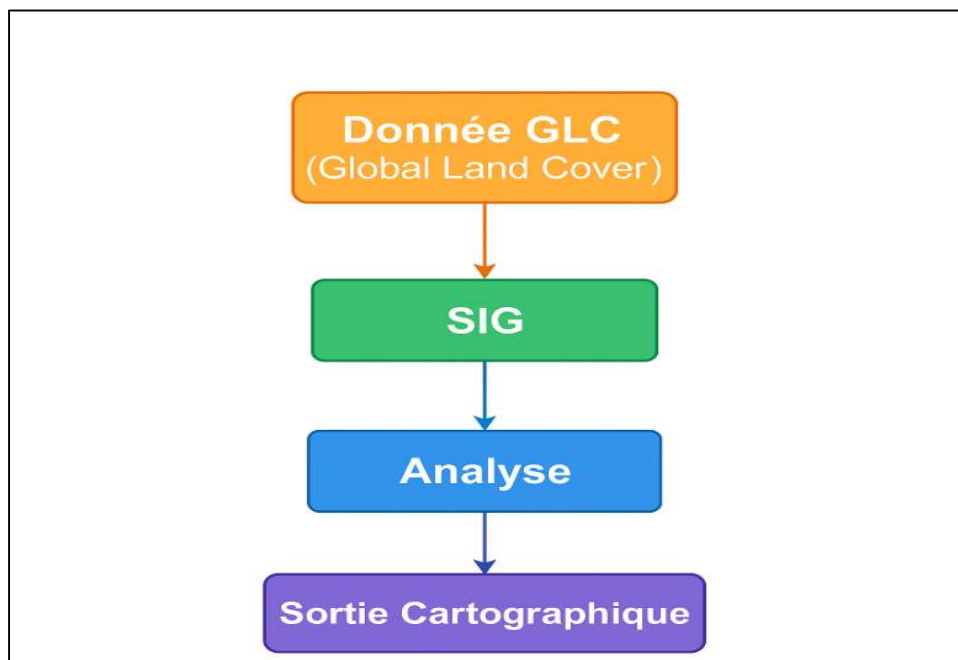


Figure 22: Méthodologie de réalisation d'une carte d'occupation de sol

#### 4.1.1.1.3 Les résultats

La carte de l'occupation du sol d'utilisation des terres de la zone d'étude en 1985 et 2022 pour les années (figure 23 et 24)

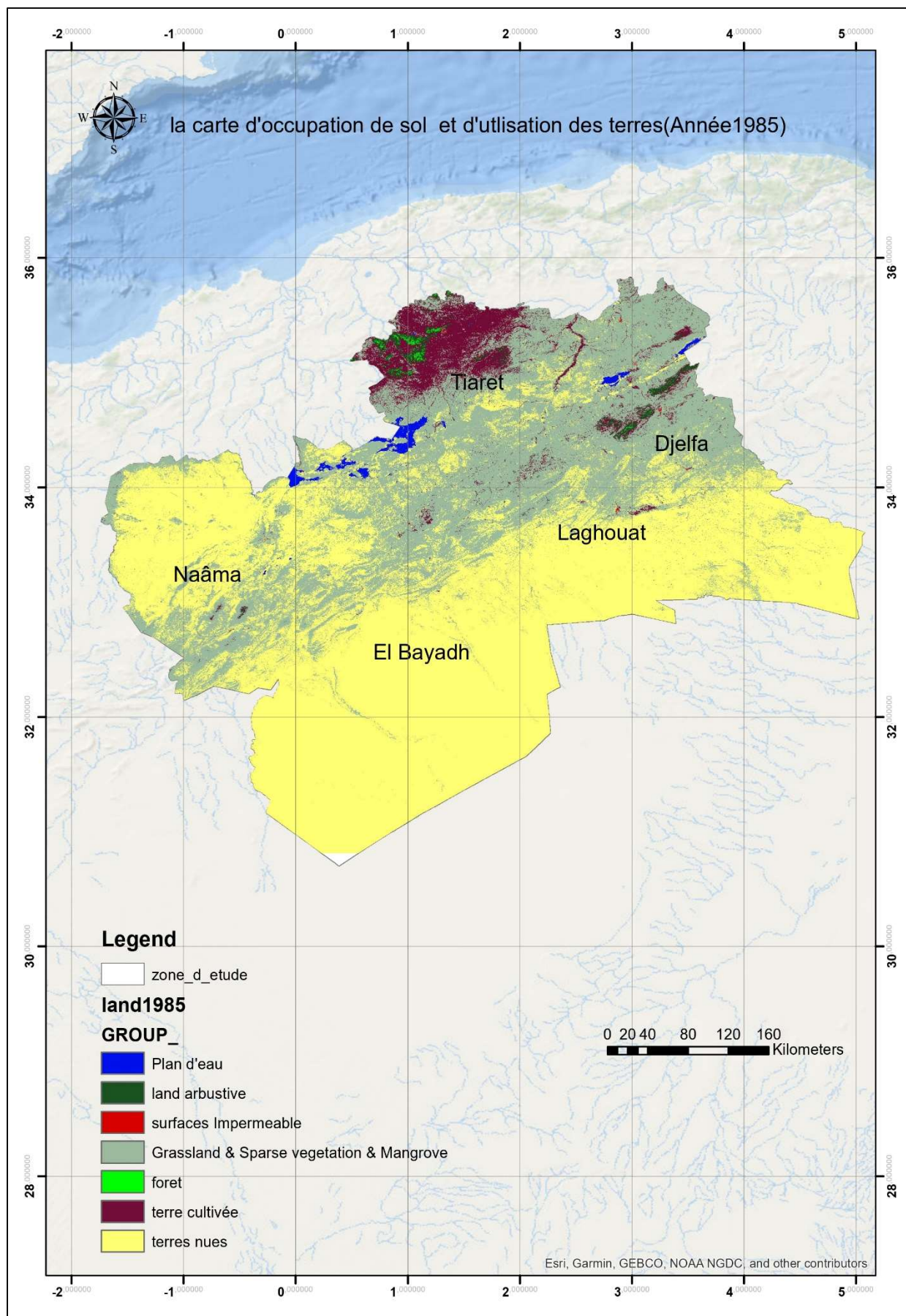


Figure 23: La carte d'occupation de sol (Année 1985)

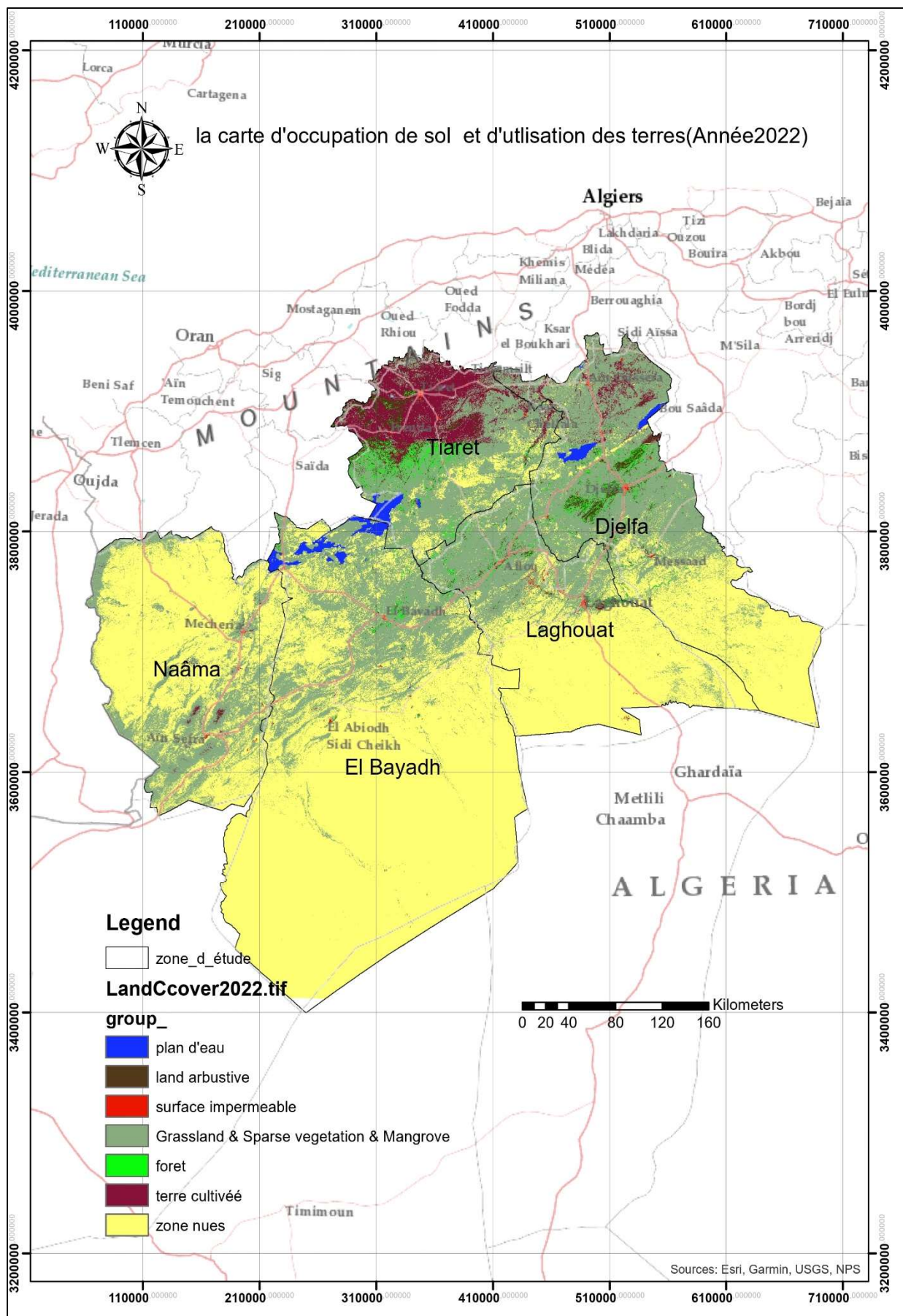


Figure 24: La carte d'occupation de sol (Année 2022)

#### 4.1.1.1.4 Analyse des résultats :

- Changements observés entre 1985 et 2022
- Terres cultivées (terre cultivée - marron foncé)
- 1985 : Concentrées surtout autour de Tiaret et un peu vers l'est.
- 2022 : Expansion notable vers le nord-est et aussi dans certaines zones de Djelfa.
- Pour les forêts en 1985 : Très peu présentes, surtout dans le nord de Tiaret.
- En 2022 : Extension visible, surtout dans le nord.
- Pour la végétation clairsemée et mangrove (vert clair) en 1985 : Très présente dans presque toute la zone d'étude.
- En 2022 : Toujours dominante, mais certaines zones ont été transformées (ex : terres cultivées ou surfaces imperméables).

#### 4.1.1.1.5 Conclusion :

- Il y a eu une augmentation dans l'agriculture, probablement à cause des politiques de développement agricole.
- Légère réduction dans les forêts due à l'urbanisation ou à l'agriculture.

## 5 Facteurs physiques et climatiques de la désertification :

### 5.1 Altitude (La carte hypsométrique) :

La carte hypsométrique permet de visualiser la répartition des altitudes et donc de mieux comprendre la morphologie du terrain. Cette information est essentielle, car le relief influence directement l'érosion, le ruissellement, la rétention d'eau et la distribution de la végétation, qui sont tous des facteurs clés dans la dynamique de la désertification.

#### 5.1.1 Données et méthodologie :

- Modèle Numérique d'Élévation (MNE) ou Digital Elevation Model source : SRTM 30m format de fichier : raster (.tif), Résolution : 30 mètres (ou meilleure disponible).

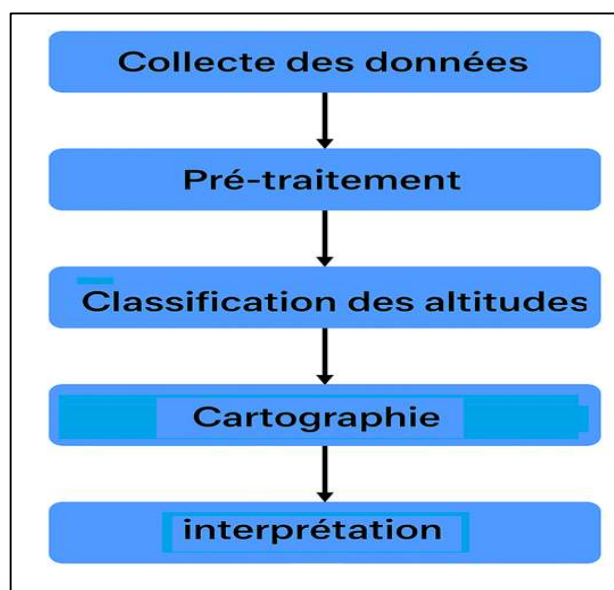


Figure 25: Méthodologie pour élaborer une carte hypsométrique

### 5.1.2 Résultats

Une carte présente la répartition altitudinale (hypsométrique) de cinq wilayas du centre-ouest de l'Algérie : El Bayadh, Naama, Laghouat, Djelfa et Tiaret. Elle utilise une échelle de couleurs pour représenter différentes classes d'altitude, allant de moins de 100 mètres à plus de 1600 mètres.

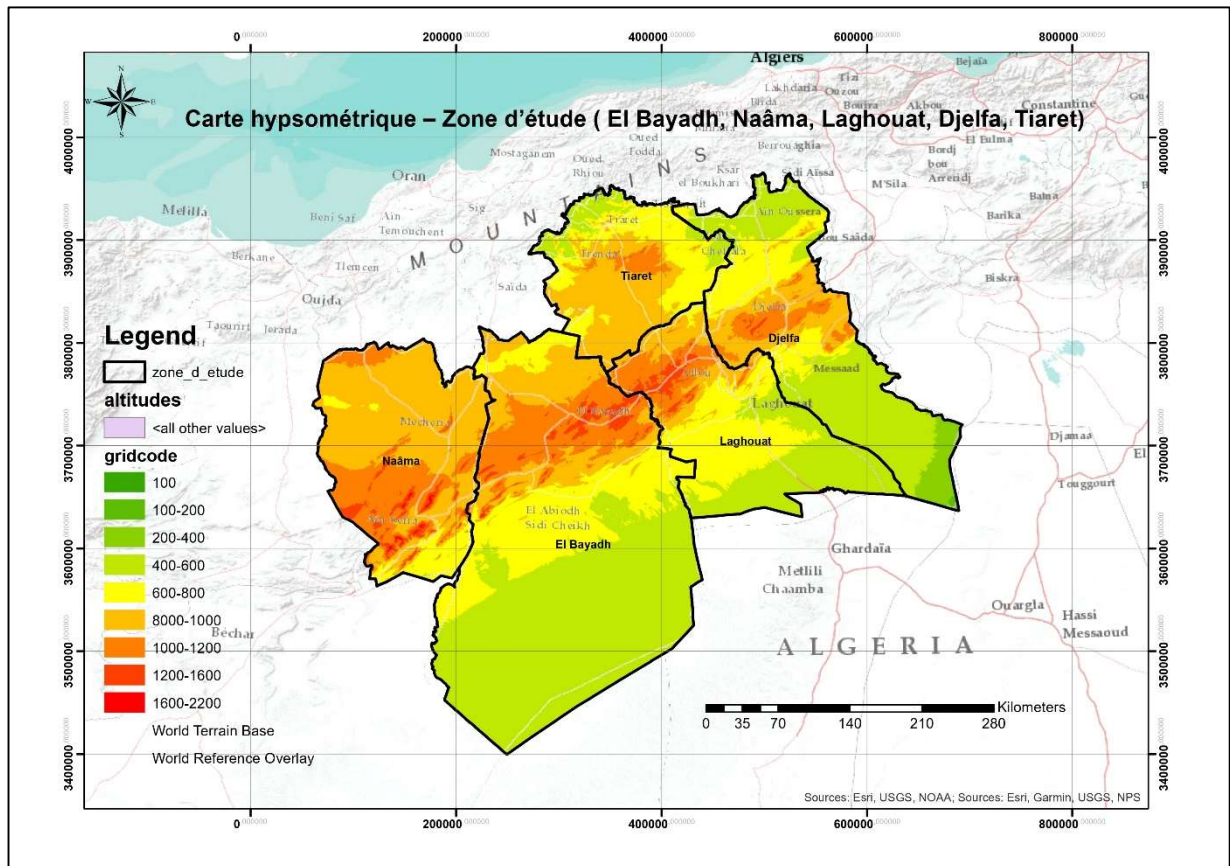


Figure 26: Carte hypsométrique de la zone d'étude

### 5.1.3 Analyse

- Les zones de basse altitude (verts) se situent principalement au sud-est des wilayas (notamment Laghouat et El Bayadh).
- Les altitudes moyennes à élevées (jaune à rouge) dominent le centre et le nord-ouest, notamment dans les wilayas de Naama, Djelfa et Tiaret.
- Les plus hautes altitudes (rouge foncé) sont localisées dans des zones restreintes, principalement dans le nord-ouest et le centre-ouest (Naama, El Bayadh).
- La carte met en évidence la présence d'un relief accidenté, caractéristique des Hauts Plateaux algériens et des zones pré-sahariennes.
- Les transitions de couleurs montrent des gradients d'altitude marqués, ce qui suggère la présence de chaînes de montagnes, de plateaux et de dépressions.

## 6 La pente (carte de pente)

- La pente est un facteur déterminant dans les processus d'érosion des sols, notamment l'érosion hydrique.
- Les zones à forte pente sont plus vulnérables au ruissellement et à la perte de sol, surtout en cas de précipitations intenses et irrégulières.

### 6.1 Données et méthodologie

-Modèle Numérique d'Élévation (MNE / DEM).

-Source : SRTM 30m, Format : raster (.tif)

-Logiciel utilisé : ArcGIS

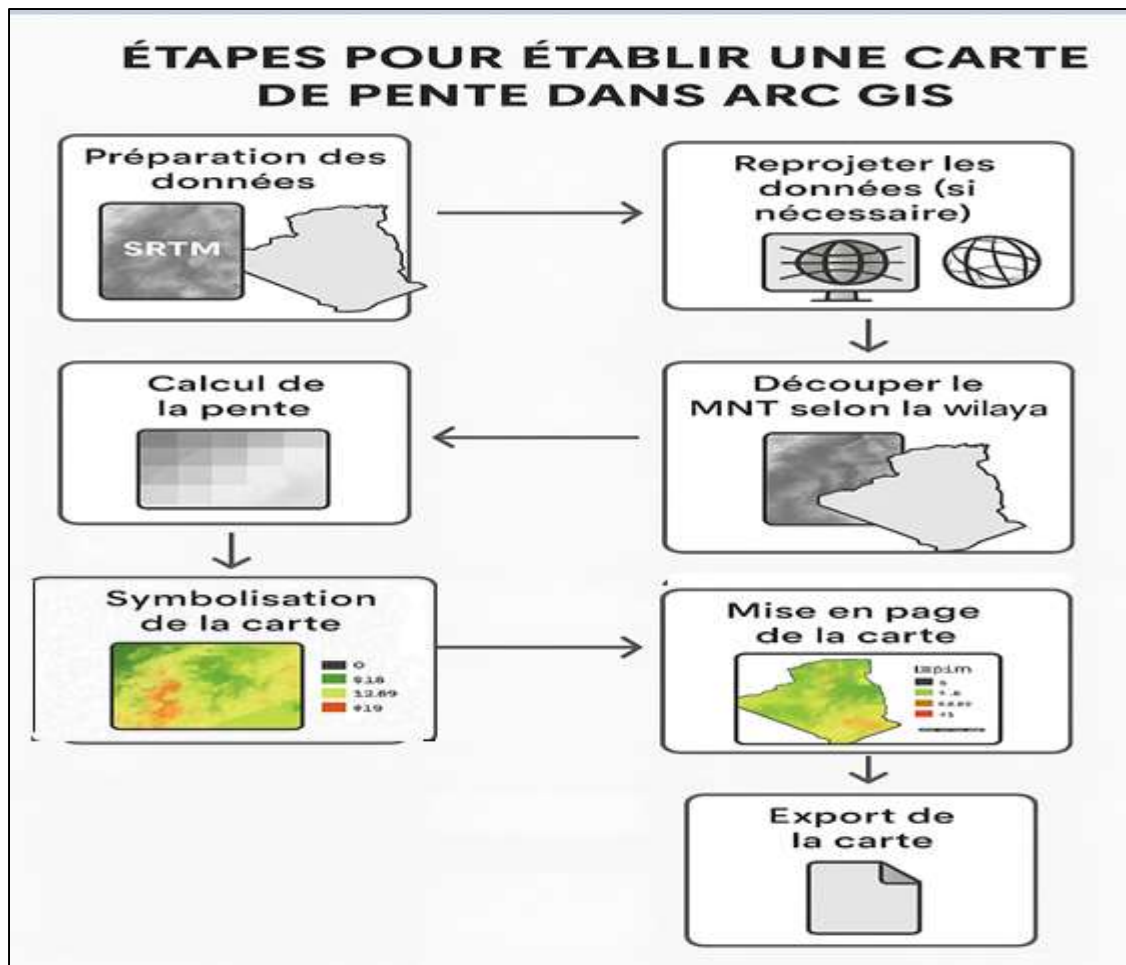


Figure 27: Méthodologie d'élaborer une carte de pente

### 6.2 Résultats

La carte représente la répartition des pentes dans cinq wilayas du centre-ouest de l'Algérie : El Bayadh, Naâma, Laghouat, Djelfa et Tiaret. Elle utilise un code couleur pour indiquer différentes Classes de pente, exprimées en degrés, sur l'ensemble de ces territoires.

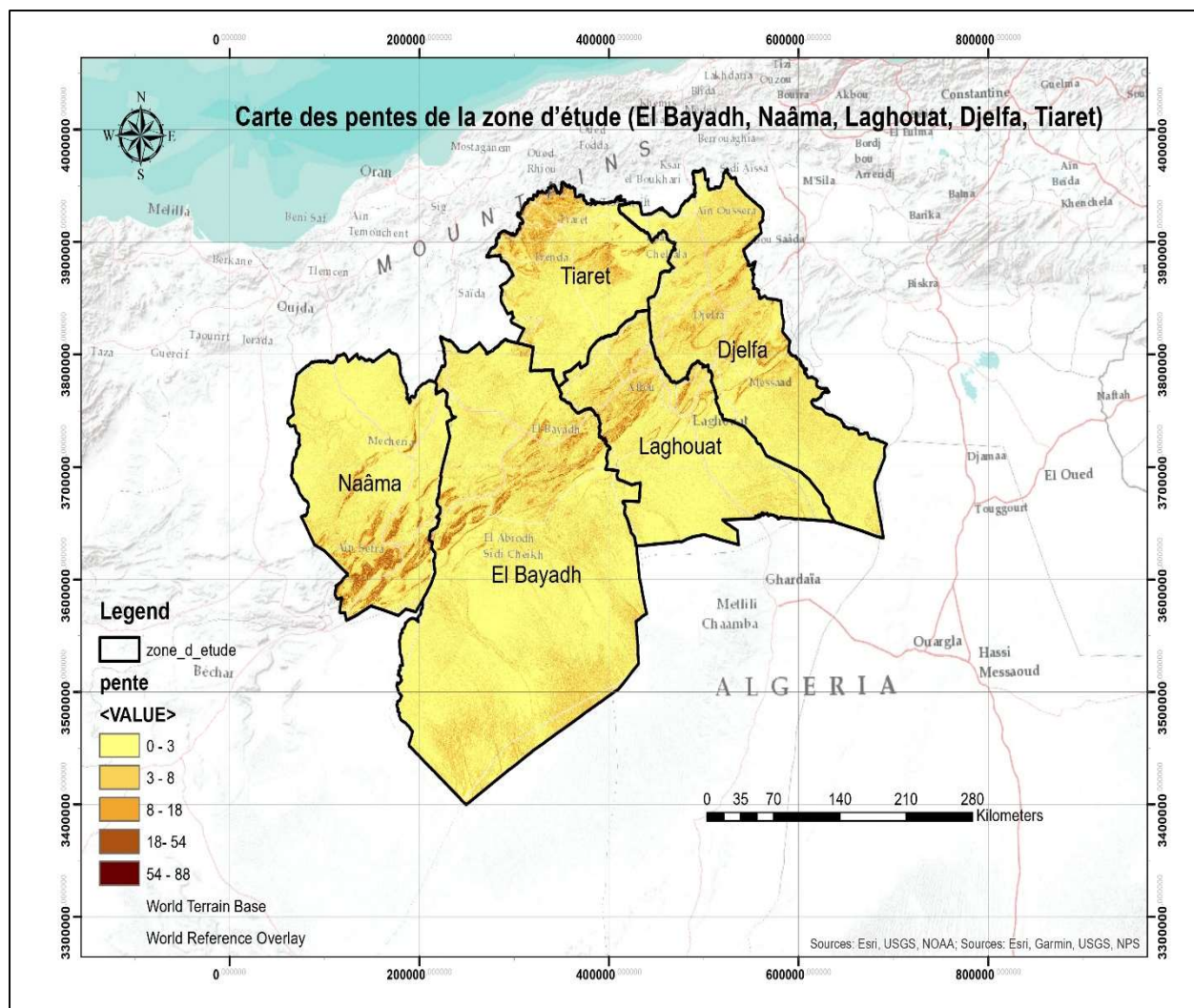


Figure 28: Carte des pentes de la zone d'étude

### 6.3 Analyse

- La majorité des surfaces dans les cinq wilayas sont couvertes par les classes de pente les plus faibles (0–3° et 3–8°), indiquant des reliefs globalement plats à faiblement ondulés.
- Les zones de pentes plus élevées (8–18°, 18–54°, 54–88°) sont localisées principalement dans certaines portions, notamment à l'ouest de Naâma et El Bayadh, ainsi que dans quelques secteurs du nord de Djelfa et Tiaret. Ces zones correspondent vraisemblablement à des reliefs montagneux ou des escarpements.
- Laghouat et Djelfa présentent une topographie majoritairement plane, avec très peu de zones à forte pente.

## 7 Les précipitations

Particulièrement dans les zones arides et semi-arides dans notre cas nous avons basé sur la période entre (1981-2025).

## 7.1 Données et méthodologie :

La plateforme NASA POWER (Prédiction Of Worldwide Energy Ressources) fournit des données climatiques (y compris les précipitations) accessibles gratuitement. Lien :<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

Dans le cadre de cette étude, nous avons élaboré une carte de la pluviométrie en nous appuyant sur les données climatiques extraites de la plateforme NASA POWER. Après avoir défini des stations météorologiques virtuelles situées aux frontières de la zone d'étude, nous avons obtenu des données mensuelles de précipitations couvrant la période de 1981 à 2025. Ces données ont été agrégées pour calculer la pluviométrie annuelle de chaque année. Par la suite, nous avons intégré ces informations dans le logiciel ArcGIS afin de procéder à une interpolation spatiale à l'aide de la méthode IDW (Inverse Distance Weighting) ou Krigeage, permettant ainsi de générer des cartes continues de la répartition des précipitations sur toute la zone d'étude. Ces cartes ont ensuite été analysées pour observer l'évolution spatio-temporelle des précipitations et identifier les tendances ou les zones sujettes à des changements climatiques marqués. (cf. figure 29 )

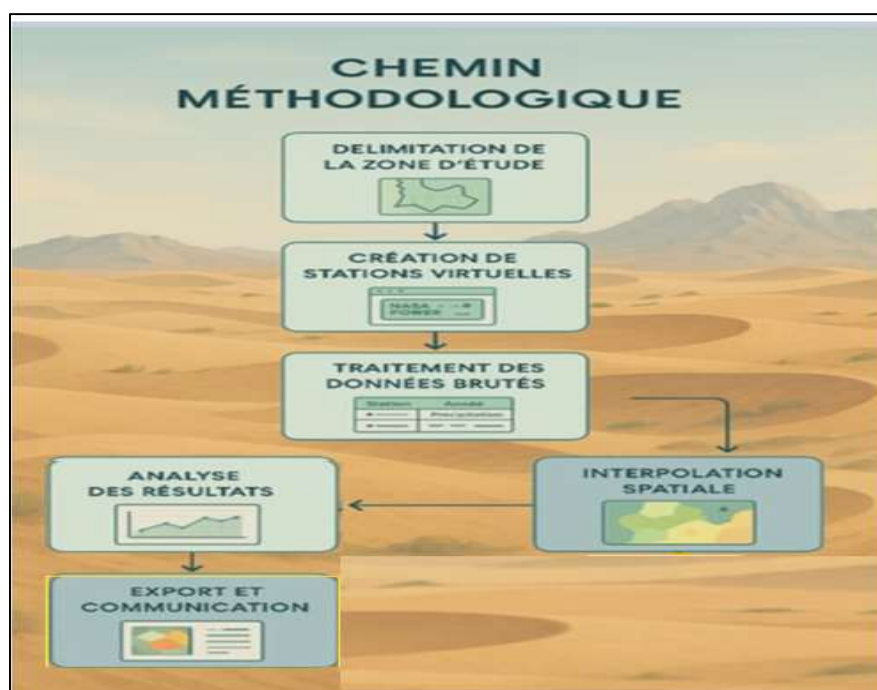


Figure 29: Méthodologie pour élaborer une carte de pluviométrie

## 7.2 le résultat

La carte présente la répartition spatiale des précipitations mensuelles moyennes (en mm/mois) sur cinq wilayas du centre-ouest de l'Algérie : Naâma, El Bayadh, Laghouat, Djelfa et Tiaret, pour la période 1981-2025. Les précipitations sont représentées par différentes nuances de bleu, allant du bleu très clair (faibles précipitations) au bleu foncé (fortes précipitations). Les stations météorologiques sont indiquées par des cercles verts.

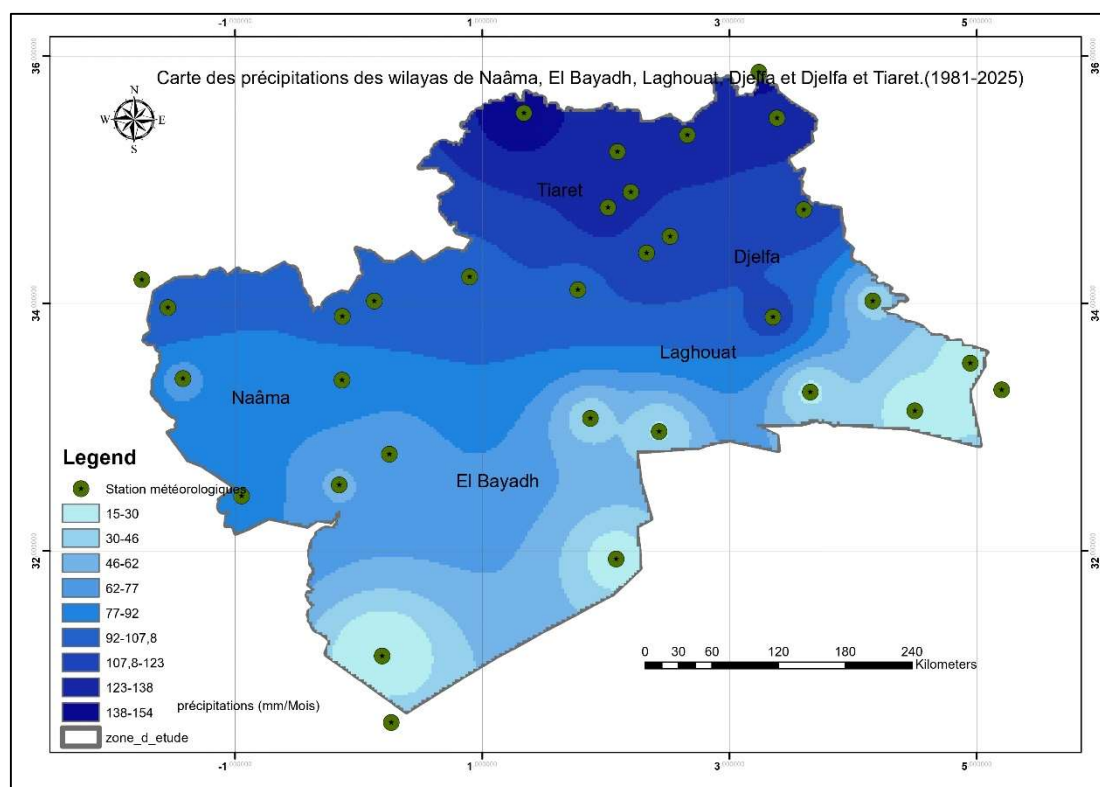


Figure 30: Carte de pluviométrie de la zone d'étude

### 7.3 Analyse

- Les précipitations augmentent nettement du sud vers le nord. Les zones nordiques (notamment Tiaret et le nord de Djelfa) reçoivent les précipitations les plus élevées, tandis que les régions sud (El Bayadh, sud de Laghouat et Naâma) sont plus arides.
- Les valeurs maximales de précipitations mensuelles (138-154 mm/mois, couleur bleu foncé) se concentrent au nord, alors que les valeurs minimales (15-30 mm/mois, bleu très clair) sont localisées au sud.
- Tiaret et le nord de Djelfa bénéficient d'un climat relativement plus humide, ce qui se traduit par des couleurs plus foncées.
- El Bayadh, Naâma et le sud de Laghouat montrent des précipitations nettement plus faibles, indiquant un climat semi-aride à aride.
- Les zones de transition (bleu moyen) marquent une progression graduelle des précipitations du sud vers le nord.
- La carte illustre le passage d'un climat saharien/aride au sud à un climat steppique ou subhumide au nord

### 7.4 Les précipitations mensuelles des wilayas de la zone d'étude

Les quantités de précipitation annuelles pour chaque wilaya ont été extraites à l'aide de la plateforme ClimateEngine.org. Ce traitement s'appuie sur les données du produit CHIRPS, reconnu pour sa fiabilité en zones semi-arides. Les résultats ont été représentés sous forme de schémas afin de comparer la variabilité spatiale des précipitations à l'échelle nationale.

#### 7.4.1 Source des données :

Les données de précipitations ont été obtenues via la plateforme ClimateEngine.org en utilisant les données climatiques satellitaires issues du jeu de données CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data). Ces données sont disponibles à une résolution spatio-temporelle fine et couvrent les précipitations journalières sur l'ensemble du territoire algérien. (Janvier 1981 à janvier 2025).

##### 7.4.1.1 Analyse de la précipitation dans la wilaya de Laghouat (1981-2025)

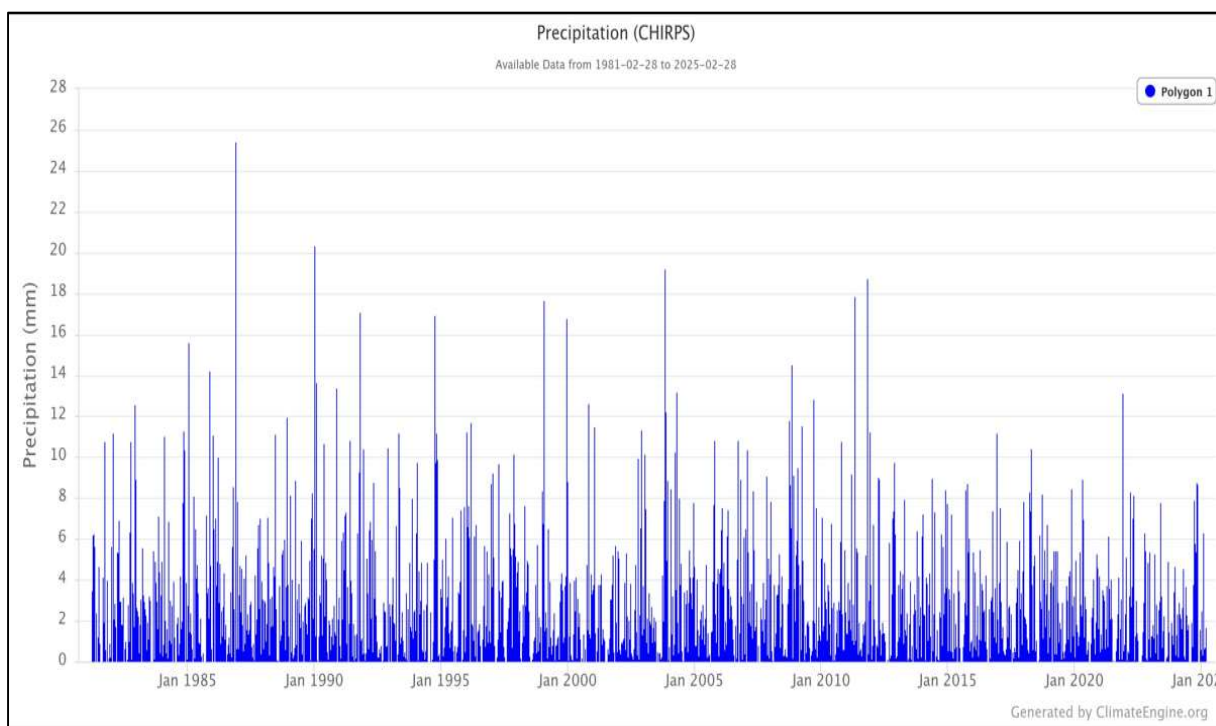


Figure 31: Analyse de la précipitation dans la wilaya de Laghouat (1981-2025)

Le graphique présenté ci-dessus illustre l'évolution des précipitations (données CHIRPS) enregistrées entre février 1981 et février 2025. Cette série chronologique permet d'identifier les tendances, les extrêmes pluviométriques ainsi que la fréquence des épisodes de précipitations significatives sur la période étudiée.

Les années 1980 et 1990 semblent marquées par plusieurs épisodes extrêmes, avec des valeurs maximales plus élevées qu'au cours des décennies récentes.

Les données permettent également d'identifier des périodes de sécheresse relative, où les précipitations sont faibles ou quasi absentes, alternant avec des phases de forte activité pluviométrique.

##### 7.4.1.2 Analyse de la précipitation dans la wilaya El Baydh (1981-2025)

Le graphique présenté illustre l'évolution des précipitations à El Bayadh sur une période de plus de 40 ans, de janvier 1981 à février 2025.

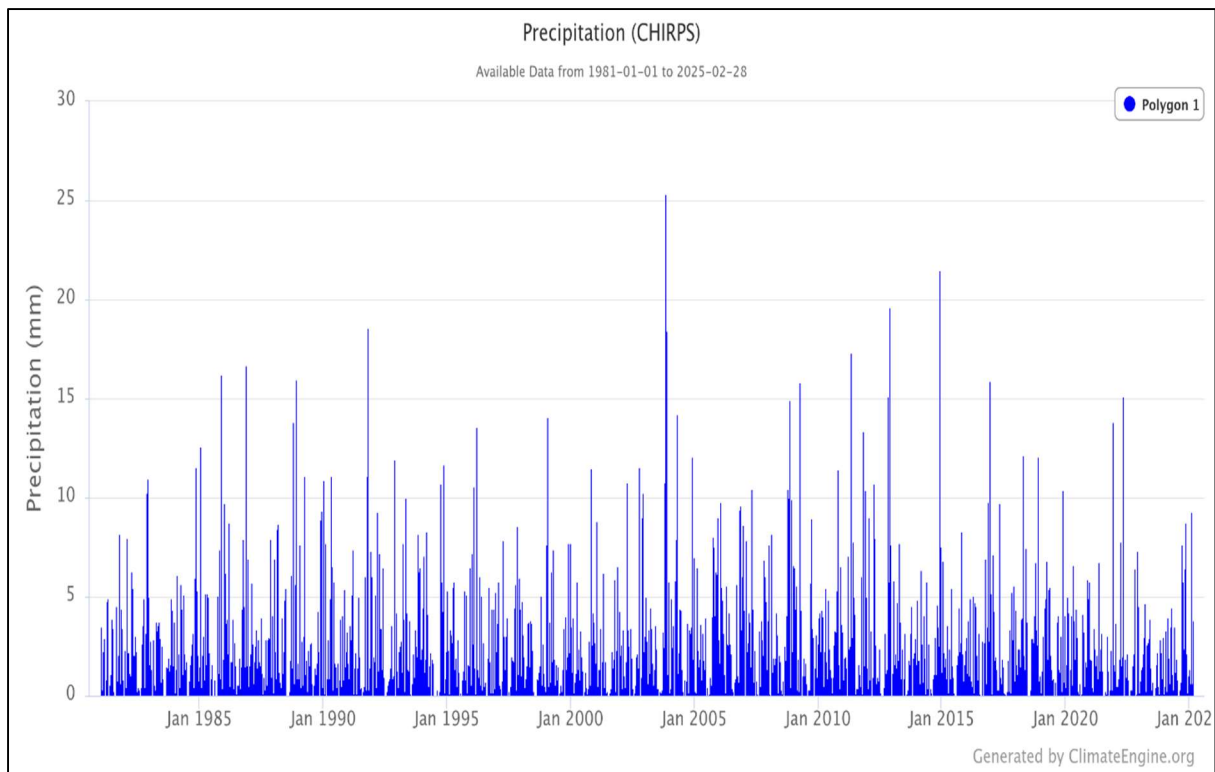


Figure 32: Analyse de la précipitation dans la wilaya El Bayedh (1981-2025)

- Les précipitations enregistrées sont généralement faibles, la majorité des valeurs étant inférieures à 10 mm par événement. Les pics dépassant 15 mm restent exceptionnels.
- Sur l'ensemble de la période, il n'apparaît pas de tendance nette à l'augmentation ou à la diminution des précipitations. Les années humides et sèches semblent se succéder sans régularité particulière.
- Les précipitations ne sont pas réparties uniformément tout au long de l'année. On observe des épisodes de précipitations soudains et courts, entrecoupés de longues périodes sèches.
- Le climat de la wilaya d'El Bayadh, tel que reflété par ce graphique, est caractérisé par une grande aridité, une forte variabilité des précipitations et la rareté des épisodes pluvieux significatifs. Cela impose une gestion adaptée et prudente de l'eau, tout en soulignant la nécessité de stratégies de résilience face aux aléas climatiques (sécheresses, inondations). Ce constat justifie pleinement l'importance des projets de mobilisation et d'optimisation des ressources hydriques dans la région.

#### 7.4.1.3 Analyse de la précipitation dans la wilaya de Naama (1981-2025)

L'analyse des précipitations est essentielle pour comprendre les variations climatiques, notamment dans des régions semi-arides comme la Wilaya de Naama en Algérie. Cette étude se base sur les données CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data), qui fournissent des estimations précises des précipitations à haute résolution spatiale et temporelle.

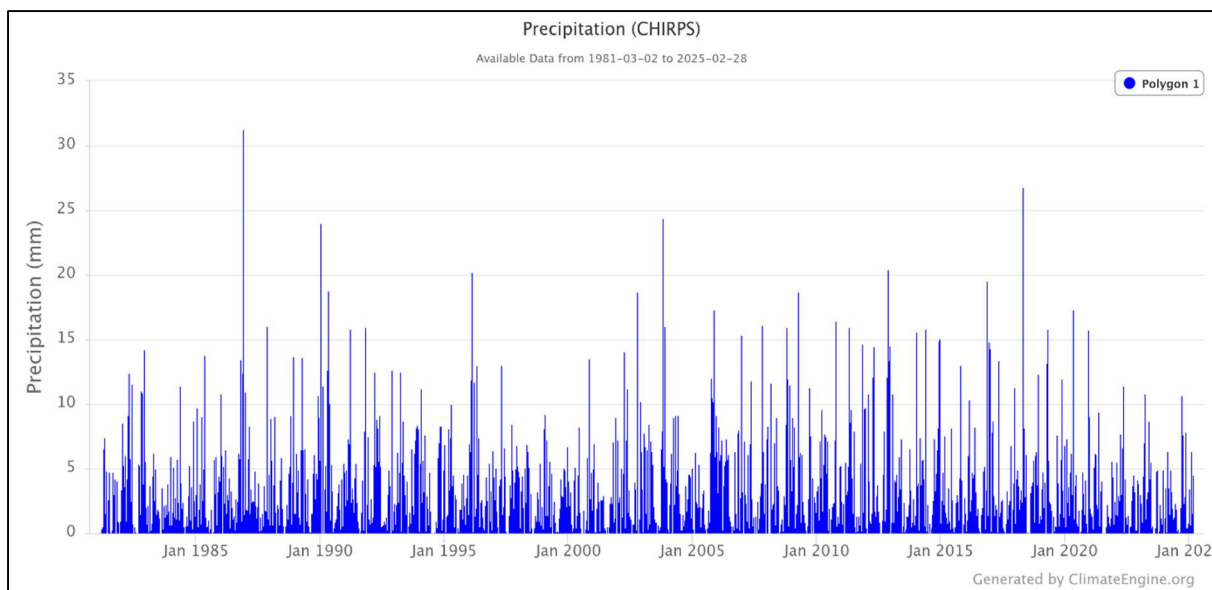


Figure 33: Analyse de la précipitation dans la wilaya de Naama (1981-2025)

- Les précipitations varient fortement, avec de nombreux pics au fil des années.
- Il n’y a pas de tendance évidente à la hausse ou à la baisse sur la période analysée. Les pics et les valeurs basses se répètent de façon relativement régulière.
- Certains événements extrêmes dépassent les 25 mm, avec un maximum autour de 31 mm (vers 1987-1988).

#### 7.4.1.4 Analyse de la précipitation dans la wilaya de Djelfa (1981-2025)

Le graphique présente l’évolution des précipitations mensuelles dans la wilaya de Djelfa de 1981 à début 2025.

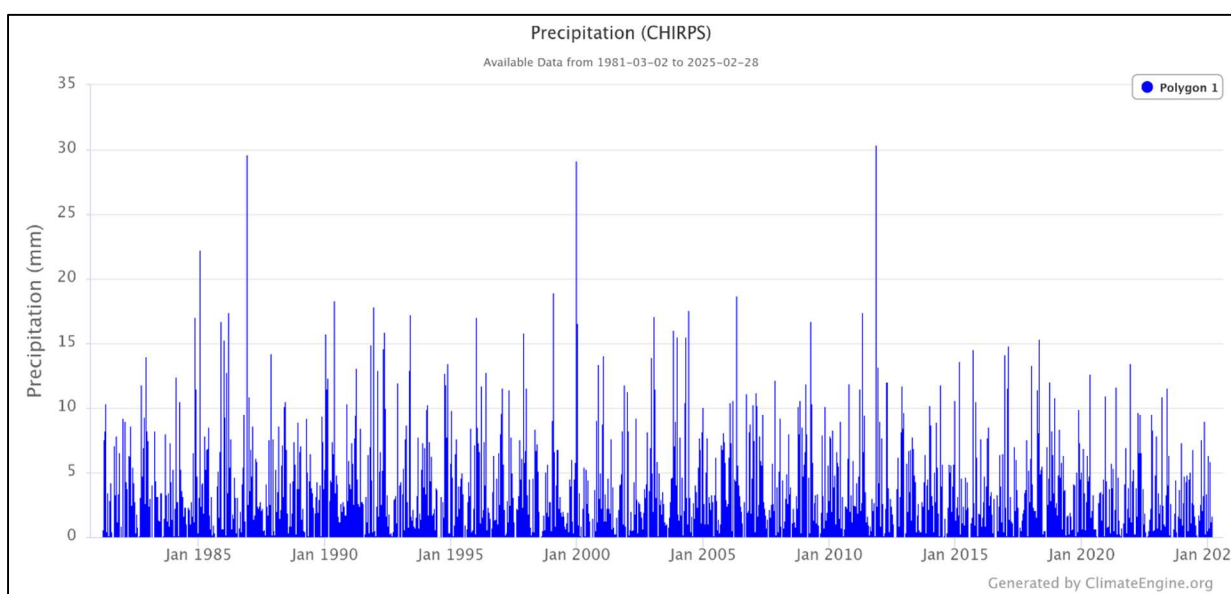


Figure 34: Analyse de la précipitation dans la wilaya de Djelfa (1981-2025)

-Une forte variabilité interannuelle et intra-annuelle des précipitations. Les pics mensuels peuvent dépasser 30 mm, mais la majorité des valeurs restent inférieures à 15 mm.

-Aucune tendance nette à l'augmentation ou à la diminution des précipitations sur la période ; la distribution reste irrégulière, avec des années particulièrement sèches et d'autres ponctuées d'épisodes pluvieux plus intenses.

#### 7.4.1.5 Analyse de la précipitation dans la wilaya de Tiaret (1981-2025)

Le graphique ci-dessus présente l'évolution des précipitations mensuelles dans la wilaya de Tiaret sur la période de mars 1981 à février 2025.

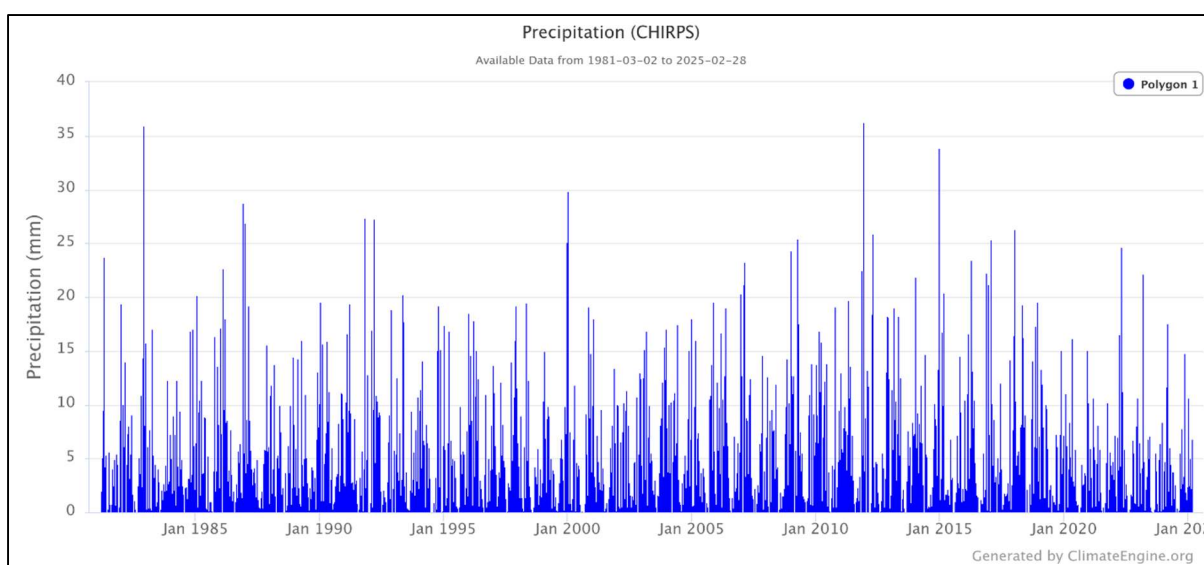


Figure 35: Analyse de la précipitation dans la wilaya de Tiaret (1981-2025)

- Les précipitations connaissent de fortes fluctuations d'une année à l'autre et d'un mois à l'autre. Certains mois enregistrent des pics supérieurs à 30 mm, tandis que la majorité des mois restent en dessous de 15 mm
- Sur plus de 40 ans, il n'apparaît pas de diminution ou d'augmentation nette des précipitations. Les épisodes pluvieux intenses sont irréguliers et parfois espacés de longues périodes sèches.
- Les précipitations sont principalement concentrées entre l'automne et le printemps, avec des étés très secs, ce qui limite la recharge des nappes phréatiques et la disponibilité en eau pour l'agriculture.

## 8 Température moyenne annuelle de l'air en surface dans la zone d'étude

L'objectif principal de cette analyse est de caractériser la dynamique spatiale et temporelle de la température de surface terrestre dans la zone d'étude afin d'évaluer son rôle dans le processus de désertification.

### 8.1 Données utilisées

Les données climatiques utilisées pour cette analyse proviennent du (earthmap.org)

- **Source:** ECMWF ERA5

- **Période couverte** : 1981 – 2023
- **Variable analysée** : Température moyenne annuelle (en °C)
- **Format des données** : CSV ou charts

### 8.1.1 Analyse de La température moyenne de l'air en surface (annuelle) dans la wilaya de Laghouat (1981-2023)

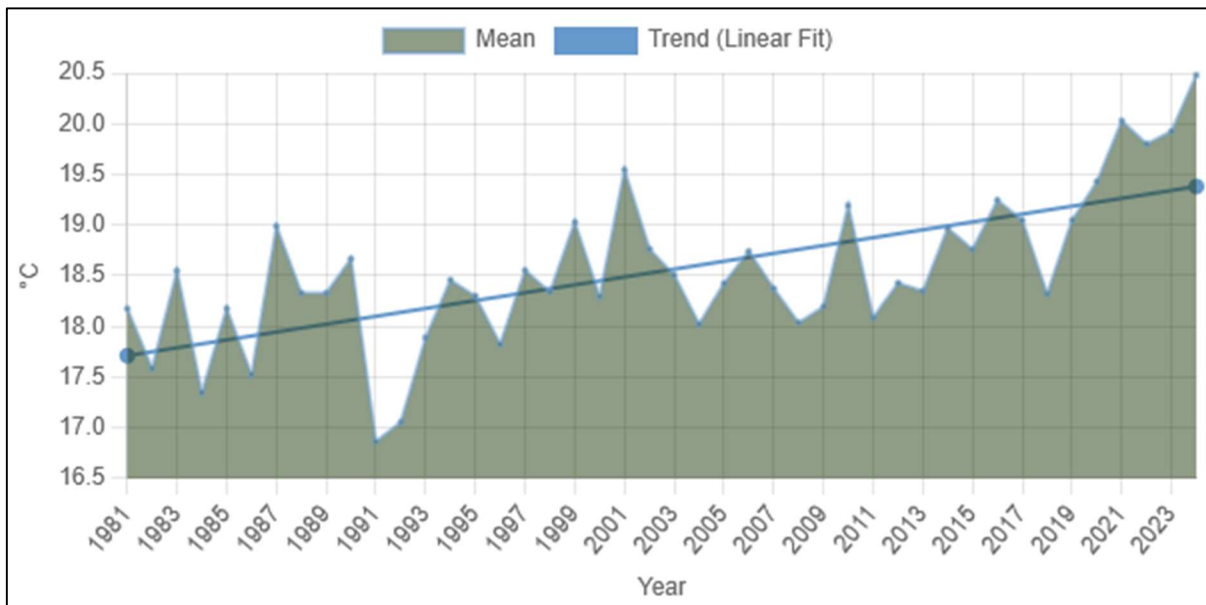


Figure 36: Analyse de la température moyenne de l'air en surface (annuelle) dans la wilaya de Laghouat (1981-2023)

#### 8.1.1.1 Analyse des températures wilaya de Laghouat (1981–2023)

##### 8.1.1.1.1 Tendence générale

- Le graphique révèle une hausse marquée et constante de la température moyenne annuelle.
- La droite de tendance linéaire confirme un réchauffement climatique évident.
- Température moyenne en 1981 : ~16,6 °C
- Température moyenne en 2023 : ~19,4 °C
- Augmentation totale : +2,8 °C sur 42 ans, soit environ +0,067 °C/an
- Laghouat rejoint Naâma et Djelfa dans le groupe des wilayas les plus affectées par l'élévation des températures dans la zone steppique.

##### 8.1.1.1.2 Variabilité interannuelle

- Des oscillations importantes entre années chaudes et années fraîches :  
Pics de chaleur : 1994, 2001, 2013, 2022, 2023  
Périodes fraîches : 1991, 1997, 2007, 2010
- Cela engendre :  
Une instabilité pour les cultures en zones marginales,  
Une pression accrue sur les nappes phréatiques,  
Des risques de sécheresse prolongée (surtout combinée à une baisse des précipitations).

### 8.1.2 Analyse de La température moyenne de l'air en surface (annuelle) dans la willaya El Baydh (1981-2023)

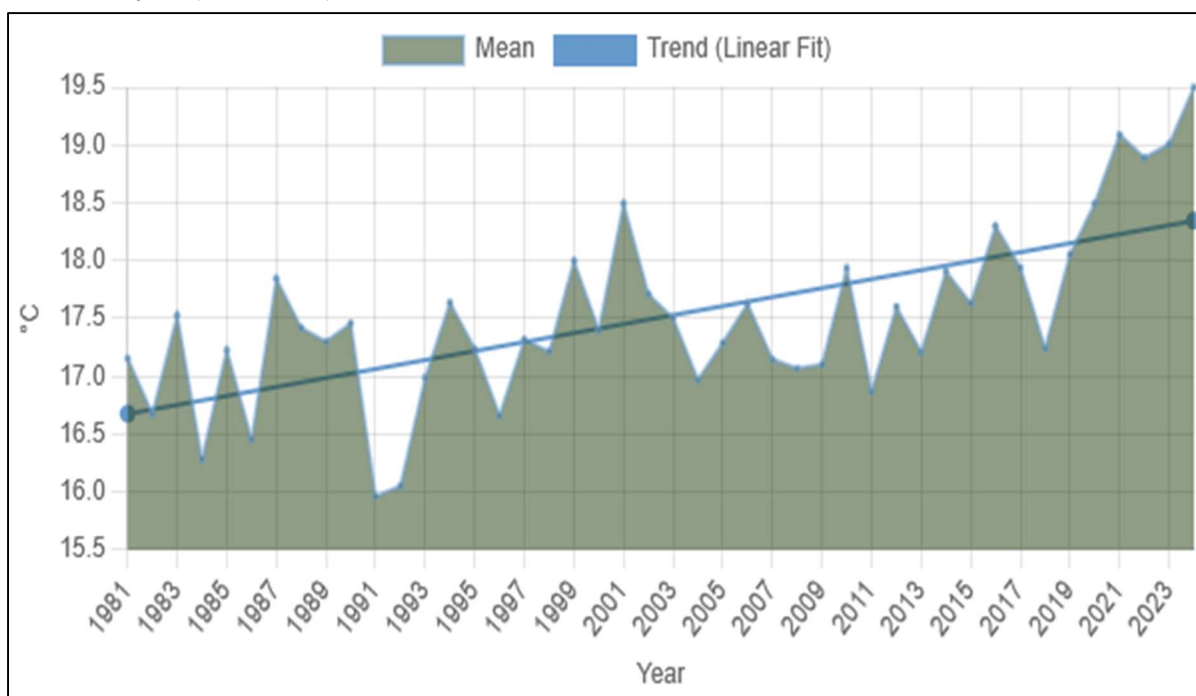


Figure 37: Analyse de la température moyenne de l'air en surface (annuelle) dans la wilaya El Baydh (1981-2023)

#### 8.1.2.1 Analyse des Températures (1981–2023)

##### 8.1.2.1.1 Tendence générale

- La courbe montre une augmentation nette des températures moyennes annuelles entre 1981 et 2023.
- La tendance linéaire (Trend Linear Fit) confirme un réchauffement climatique significatif sur la période.
- Température moyenne vers 1981 : environ 17,6 °C
- Température moyenne en 2023 : environ 20,3 °C
- +2,7 °C en 42 ans, soit environ +0,064 °C/an

##### 8.1.2.1.2 Variabilité interannuelle

- Des fluctuations importantes chaque année.
- Les années 1994, 2001, 2013 et 2022 affichent des pics de chaleur.
- 1990, 1991 et 2006 semblent être des années relativement fraîches.

### 8.1.3 Analyse de La température moyenne de l'air en surface (annuelle) dans la wilaya de Djelfa (1981-2023)

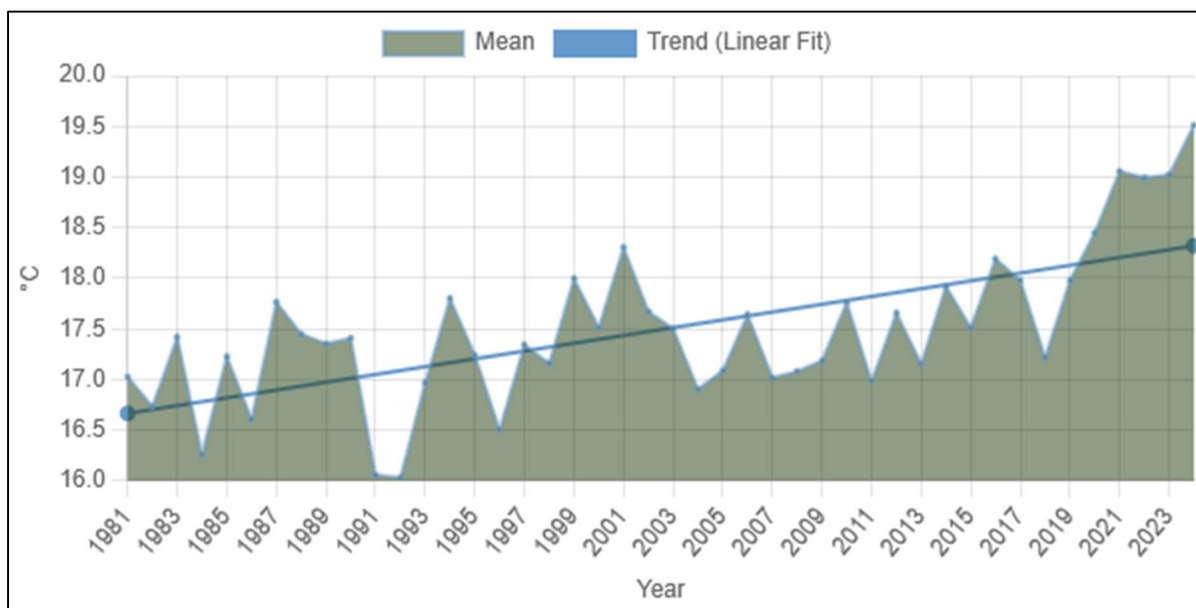


Figure 38: Analyse de la température moyenne de l'air en surface (annuelle) dans la wilaya de Djelfa (1981-2023)

#### 8.1.3.1 Analyse des Températures – Wilaya de Djelfa (1981–2023)

##### 8.1.3.1.1 Tendance générale

- La courbe montre une hausse continue et significative des températures annuelles moyennes.
- La droite de régression linéaire confirme une tendance au réchauffement climatique.
- Température moyenne en 1981 : ~16,5 °C
- Température moyenne en 2023 : ~19,5 °C
- Augmentation totale : environ +3,0 °C en 42 ans
- Tendance annuelle moyenne : +0,071 °C/an
- Cette hausse est encore plus marquée que celle observée à El Bayadh (+2,7 °C), ce qui est préoccupant pour une région déjà semi-aride.

##### 8.1.3.1.2 Variabilité interannuelle

- La courbe révèle des fluctuations annuelles importantes :  
Années chaudes : 1995, 2001, 2018, 2022, 2023  
Années fraîches : 1991, 1998, 2005, 2009
- Cette instabilité thermique peut provoquer :  
Des cycles de sécheresse récurrents,  
Des périodes de canicule plus intenses,  
Des anomalies froides nuisibles pour l'agriculture.

### 8.1.4 Analyse de La température moyenne de l'air en surface (annuelle) dans la wilaya de Naama (1981-2023)

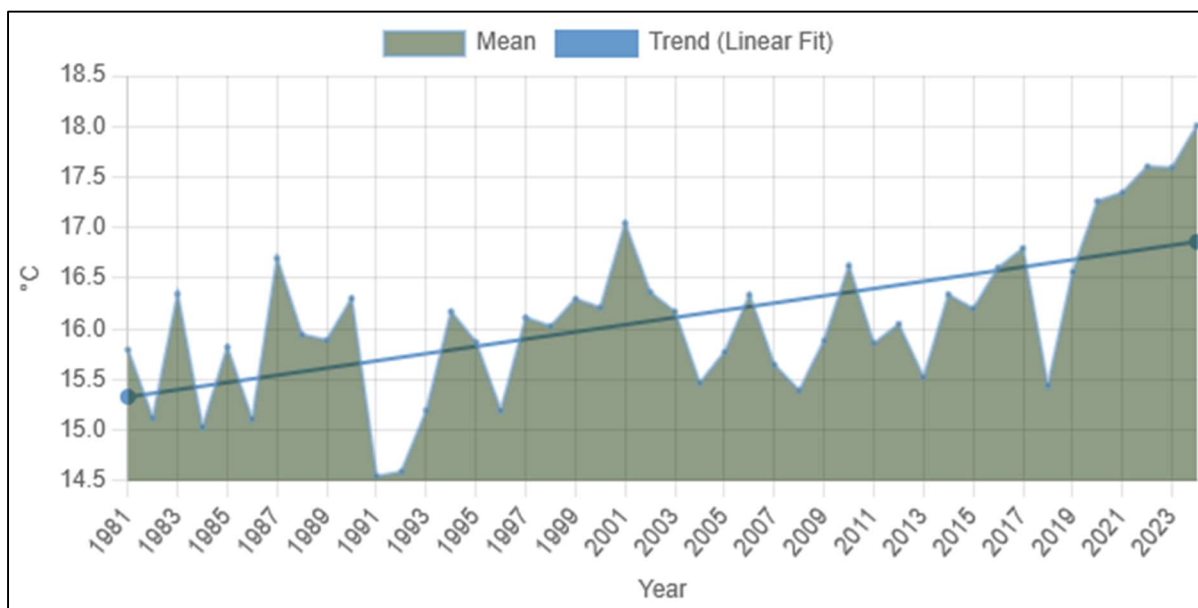


Figure 39: Analyse de la température moyenne de l'air en surface (annuelle) dans la wilaya de Naama (1981-2023)

#### 8.1.4.1 Analyse des Températures – Wilaya de Naâma (1981–2023)

##### 8.1.4.1.1 Tendances générales

- On observe une hausse progressive et continue des températures annuelles moyennes depuis 1981.
- La droite de tendance linéaire positive confirme un réchauffement climatique notable.
- Température moyenne en 1981 : ~15,4 °C
- Température moyenne en 2023 : ~18,2 °C
- Augmentation totale : +2,8 °C en 42 ans, soit environ +0,067 °C/an
- Cette tendance est cohérente avec les autres wilayas steppiques, bien que Naâma démarre avec un climat légèrement plus frais, du fait de son altitude et position.

##### 8.1.4.1.2 Variabilité interannuelle

- Des fluctuations annuelles marquées :  
Pics de chaleur : 1995, 2002, 2010, 2016, 2022, 2023  
Années fraîches : 1991, 2005, 2008, 2018
- Cette instabilité peut engendrer :  
Des périodes de stress thermique pour les plantes,  
Des hivers rigoureux menaçant les cultures sensibles,  
Une mauvaise synchronisation avec les précipitations → sécheresse aggravée.

### 8.1.5 Analyse de La température moyenne de l'air en surface (annuelle) dans la willaya de Tiaret (1981-2023)

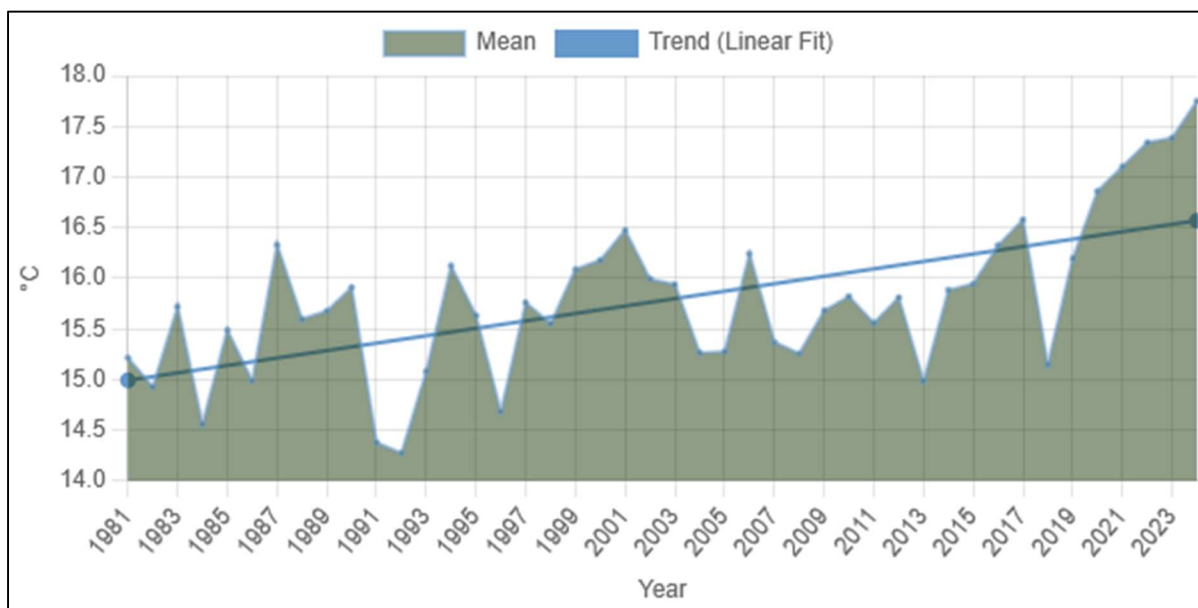


Figure 40: Analyse de la température moyenne de l'air en surface (annuelle) dans la wilaya de Tiaret (1981-2023)

#### 8.1.5.1 Analyse des Températures – Wilaya de Tiaret (1981–2023)

##### 8.1.5.1.1 Tendence générale

- La courbe illustre une progression régulière et marquée des températures annuelles moyennes.
- La tendance linéaire démontre une hausse climatique significative sur 42 ans.
- Température moyenne en 1981 : ~15,1 °C
- Température moyenne en 2023 : ~17,7 °C
- +2,6 °C en 42 ans, soit environ +0,062 °C/an
- Bien que Tiaret se situe au nord de la zone steppique, la tendance au réchauffement y est très claire.

##### 8.1.5.1.2 Variabilité interannuelle

- Une forte irrégularité climatique est observée :  
Pics de chaleur : 1989, 2002, 2016, 2022, 2023  
Années froides : 1992, 2005, 2009, 2018
- Cette variabilité provoque :  
Une instabilité pour les cultures céréalières (très fréquentes à Tiaret),  
Des cycles végétatifs raccourcis,  
Des risques accrus de stress thermique et de maladies agricoles.

## 9 L'humidité de surface du sol de la zone d'étude

Joue un rôle essentiel dans l'étude de la désertification, de plusieurs façons :

- Indicateur précoce de désertification : une baisse continue de l'humidité du sol peut signaler une dégradation des terres et le début d'un processus de désertification.

- Évaluation de la sécheresse : elle sert d'indicateur pour mesurer l'intensité de la sécheresse, un facteur clé dans la désertification.
- Nous avons utilisé des données climatiques issues de la plateforme NASA POWER pour extraire les valeurs annuelles de l'humidité r de surface du sol dans la zone d'étude.

Ces données, présentées sous forme graphique illustrant évolution de l'humidité au fil du temps, facilitant ainsi l'analyse des tendances climatique.

## **9.1 Source des données : GMAO MERRA -2 Data accessed from Nasa Power**

### **9.1.1 Méthodologies**

- Accéder à la plateforme : <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer>.

Définir la zone d'étude :

- Cliquez sur la carte ou entrez les coordonnées géographiques (latitude et longitude) de votre zone.
- Choisissez le type de point (ex. : single point).
- Dans la liste des paramètres, sélectionnez " L'humidité de surface du sol " ou "Humidity" selon ce que vous étudiez.
- Vous pouvez également ajouter d'autres variables si nécessaire.
- Choisissez la plage temporelle souhaitée (ex. : de janvier 1981 à décembre 2024).
- Cliquez sur submit.
- Visualiser et exporter le graphique :
- Une fois les données générées, un graphique interactif s'affiche automatiquement.
- Cliquer sur "Download Chart" pour télécharger le graphique au format image.

### **9.1.2 Résultat :**

Le graphique ci-dessus représente la série temporelle mensuelle de l'humidité de surface du sol (Surface Soil Wetness) sur la période allant de janvier 1981 à décembre 2024, pour un point situé aux coordonnées 33.31°N, -0.74°E.

Ce paramètre est crucial dans l'étude de la désertification, car l'humidité du sol reflète directement la disponibilité en eau pour la végétation et l'activité biologique.

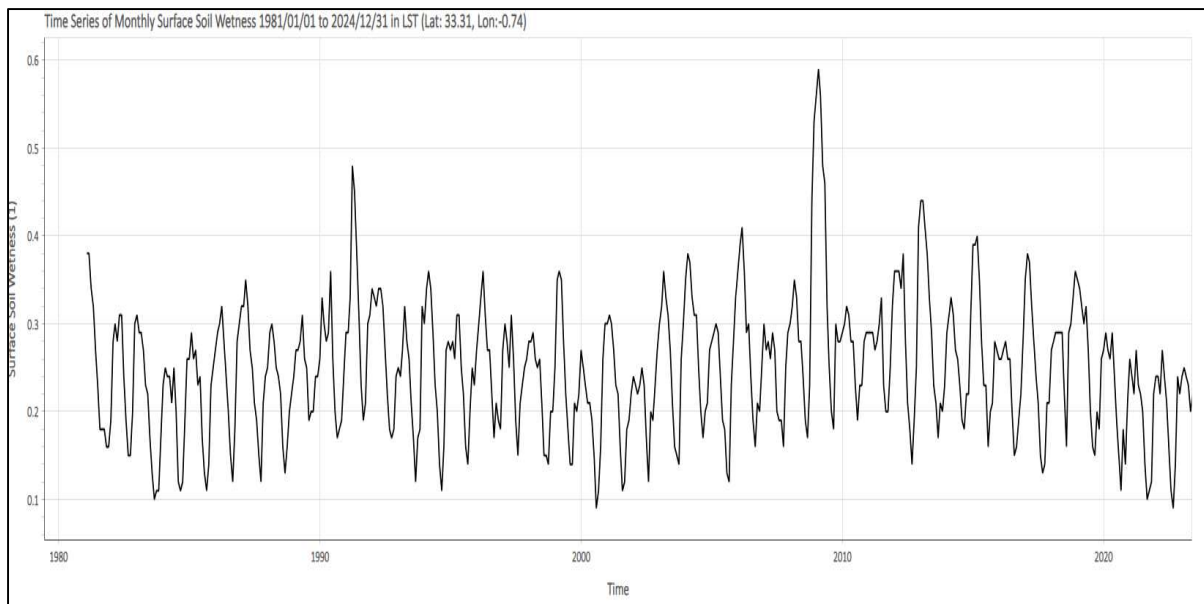


Figure 41: Humidité de surface du sol de la zone d'étude

### 9.1.3 3.Analyse

On observe une variabilité saisonnière marquée, avec des pics réguliers qui correspondent probablement aux saisons humides (automne et printemps), et des creux pendant les périodes sèches (été).

- Entre 1985 et 1995, on remarque une période avec des valeurs globalement plus élevées, indiquant peut-être une meilleure humidité du sol durant cette décennie.
- À partir de 2000, les fluctuations deviennent plus irrégulières, avec des pics très élevés autour de 2010, suivis d'une tendance globale à la baisse de l'humidité de surface vers la fin de la série (après 2020).
- Cette diminution pourrait être un indice de dégradation progressive du sol ou de changements climatiques affectant la rétention d'eau dans la zone.
- 

### 9.1.4 Interprétation environnementale :

Cette évolution temporelle de l'humidité du sol peut refléter des phénomènes tels que :

- Une augmentation de la fréquence des sécheresses.
- Une diminution des précipitations ou une mauvaise gestion des ressources hydriques.
- Un impact de l'activité humaine (déforestation, surpâturage...).
- Ce graphique met en évidence l'importance du suivi à long terme de l'humidité des sols dans le cadre de la lutte contre la désertification. Les données obtenues via la plateforme *NASA POWER* constituent une base fiable pour appuyer ce type d'analyse environnementale.

## **10 La relation entre la précipitation et la température de l'air en surface et l'humidité de surface du sol dans l'étude de la désertification (1981-2024)**

Nous avons comparé les trois graphes représentant les précipitations, la température et l'humidité de la surface terrestre dans une même région, sur la période allant de 1981 à 2023, afin d'évaluer l'importance de ces facteurs climatiques dans l'étude de la désertification et du changement climatique

### **10.1 Température**

- Période d'analyse : 1981–2023
- Tendance générale : Une légère tendance à la hausse des températures sur le long terme, avec des fluctuations saisonnières marquées.
- Pics et creux : Une augmentation de la fréquence et de l'intensité des pics de chaleur est observée ces dernières années, ce qui reflète probablement l'impact du changement climatique.

### **10.2 Précipitations**

- Tendance générale : Aucune tendance nette à la hausse ou à la baisse, mais une très grande variabilité et irrégularité dans les quantités de précipitations.
- Remarques : Certaines années présentent des pics marqués (notamment autour de 2008 et 2018), suggérant des épisodes pluvieux exceptionnels. Les autres années sont caractérisées par des valeurs faibles à modérées, indiquant une distribution inégale des pluies.

### **10.3 Humidité du sol en surface**

- Le graphique montre des variations cycliques, mais il est fortement influencé par les fluctuations des précipitations.
- Une baisse progressive de l'humidité est observée ces dernières années, probablement liée à l'augmentation des températures ou à une faible efficacité des précipitations à humidifier le sol (par exemple à cause de l'évaporation rapide).
- ❖ **Analyse générale :**
  - Il semble exister une relation positive entre les précipitations et l'humidité du sol : lorsque les précipitations augmentent, l'humidité du sol tend à augmenter également, mais pas toujours de façon proportionnelle, ce qui indique l'intervention d'autres facteurs tels que la température ou la nature du sol.
  - Des températures élevées peuvent contribuer à l'évaporation rapide de l'eau à la surface du sol, réduisant ainsi son humidité, même en présence de précipitations.
- ❖ **Importance des résultats dans l'étude de la désertification et du changement climatique :**
  - La hausse des températures combinée à l'irrégularité des précipitations crée un environnement propice à la désertification.
  - La baisse progressive de l'humidité du sol indique une capacité réduite du sol à retenir l'eau, ce qui affecte la végétation et l'agriculture.

## **11 Indice d'Aridité Global**

L'indice d'aridité global (ou Global Aridity Index, en anglais) est un indicateur climatique utilisé pour évaluer le niveau de sécheresse d'une région en fonction de la relation entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle.

Formule :

$$\text{Indice d'Aridité (IA)} = \frac{P}{ET_0}$$

- P : précipitations annuelles moyennes (en mm)
- $ET_0$  : évapotranspiration potentielle annuelle moyenne (en mm)

Plus l'indice est faible, plus le climat est aride :

| Valeur de l'indice | Classification du climat |
|--------------------|--------------------------|
| < 0.05             | Hyper-aride              |
| 0.05 – 0.20        | Aride                    |
| 0.20 – 0.50        | Semi-aride               |
| 0.50 – 0.65        | Sub-humide sec           |
| > 0.65             | Humide                   |

### 11.1 La carte de la zone aride

Une carte des zones arides est une représentation géographique qui montre les régions où le climat est sec ou très sec, sur la base de l'indice d'aridité.

Le but principal d'une carte des zones arides est de visualiser la répartition spatiale de la sécheresse climatique à l'échelle régionale ou mondiale, en se basant sur l'indice d'aridité.

#### 11.1.1 Données et Méthodologie

##### 11.1.1.1 Données :

Les données du Global Aridity Index and Potential Evapotranspiration ( $ET_0$ ) Database, version 3 (Global-AI\_PET\_v3) ; Cette base de données fournit des données climatiques mondiales à haute résolution (30 arc-secondes, soit environ 1 km à l'équateur) pour la période 1970-2000, en utilisant l'équation de référence d'évapotranspiration FAO-56 Penman-Monteith.

##### 11.1.1.2 Méthodologie

- Identifier la finalité de la carte, le type d'information à représenter, l'échelle et le public cible.
- Importer les données géographiques nécessaires (raster, vecteur, tables attributaires) dans ArcGIS. Cela peut inclure la numérisation, le géoréférencement, la conversion ou la collecte de données GPS.

- Structurer les données en couches distinctes selon les thèmes (ex : hydrographie, végétation, limites administratives), en précisant leur type (points, lignes, polygones, raster) et leurs attributs.
- Utiliser les outils de géotraitement d’ArcGIS (ArcToolbox) pour effectuer des analyses spatiales, calculs, requêtes, création de zones tampon, etc.
- Appliquer une symbologie adaptée à chaque couche selon les valeurs ou classes thématiques, pour une lecture claire et intuitive.
- Passer en mode « Mise en page » (Layout View) pour organiser la carte, ajouter les éléments cartographiques indispensables : titre, légende, échelle, flèche nord, sources, etc.
- Exporter la carte en formats image, PDF ou publier en ligne via ArcGIS Online ou autres plateformes web.

#### 11.1.1.3 Résultat

La carte intitulée « carte des zones arides » représente la répartition spatiale des différentes classes d’aridité dans une région d’étude (dont la limite est délimitée en noir).

Elle s’appuie sur l’indice d’aridité, classé selon trois catégories principales :

- **Arid (rouge)** : zones arides
- **Hyper-Aride (jaune)** : zones hyper-arides
- **Semi-Aride (vert)** : zones semi-arides

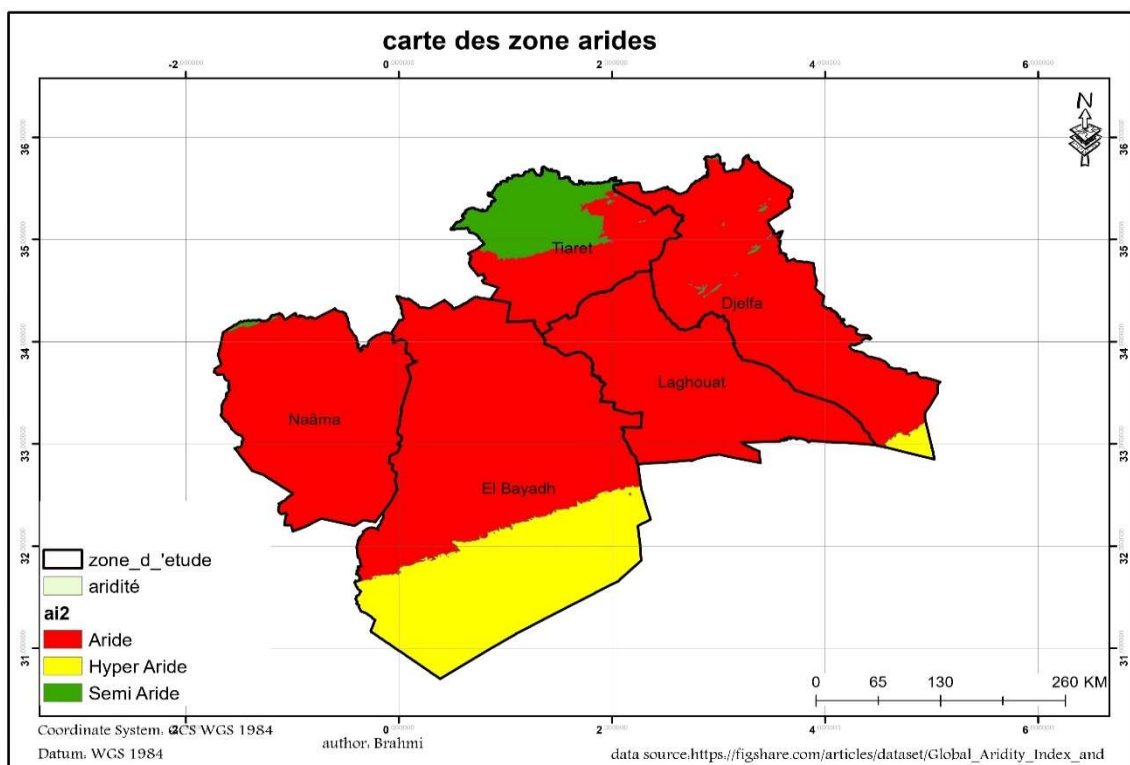


Figure 42: Carte des zones arides dans notre cas d'étude.

#### 11.1.1.4 Résultat d'Analyse de la carte

##### 11.1.1.4.1 Répartition des zones arides

- La majeure partie de la zone d'étude est classée comme aride (en rouge), ce qui indique des conditions climatiques caractérisées par une faible pluviométrie et une forte évapotranspiration.
- Cela suggère que la région est soumise à un stress hydrique important, avec des ressources en eau limitées.

##### 11.1.1.4.2 Présence de zones hyper-arides

- Les zones hyper-arides (jaune) sont localisées principalement au sud et au sud-est de la région.
- Ces zones sont encore plus défavorisées, avec des conditions extrêmes de sécheresse, rendant l'agriculture pluviale quasi impossible et la vie humaine très contrainte sans irrigation.

##### 11.1.1.4.3 Zones semi-arides

- Une petite portion du nord de la zone d'étude est classée semi-aride (vert).
- Ces zones bénéficient d'un climat un peu moins sec, ce qui peut permettre certaines activités agricoles ou pastorales, mais restent soumises à des aléas climatiques importants.

#### ❖ Implications

- Cette répartition montre que la gestion des ressources en eau, l'adaptation de l'agriculture, et la prévention de la désertification sont des enjeux majeurs pour la région.
- Les zones arides et hyper-arides nécessitent des stratégies spécifiques pour l'approvisionnement en eau et la lutte contre la dégradation des sols.
- La carte met en évidence la prédominance des zones arides et hyper-arides dans la région d'étude, ce qui pose des défis importants pour le développement durable, la sécurité alimentaire et la gestion des ressources naturelles. Les zones semi-arides, bien que minoritaires, représentent des espaces à potentiel relatif pour des activités agricoles adaptées. Cette analyse cartographique est un outil essentiel pour la planification territoriale et la prise de décision en matière d'aménagement et de gestion environnementale.

## 12 La vitesse et la direction des vents dans la zone d'étude

Dans le cadre de l'étude des caractéristiques climatiques de la zone d'étude, l'analyse de la distribution et de la direction des vents a été mise en avant en tant qu'élément essentiel pour comprendre les dynamiques atmosphériques locales.

### 12.1 Les données et la méthodologie utilisées

#### 12.1.1 Les données

Les données climatiques utilisées proviennent principalement de la base POWER Data de la NASA, et des stations d'observation virtuelles ont été créées pour définir les points de collecte d'informations dans la zone d'analyse. La méthode d'interpolation IDW (Inverse Distance Weighting) a été utilisée pour générer une carte précise de la direction et de la vitesse du vent, à l'aide des outils d'analyse spatiale dans un environnement SIG (Système d'Information Géographique). Cette étude vise à fournir une représentation spatiale claire du mouvement des vents, contribuant ainsi aux recherches environnementales et climatiques régionales.

### 12.1.2 La méthodologie

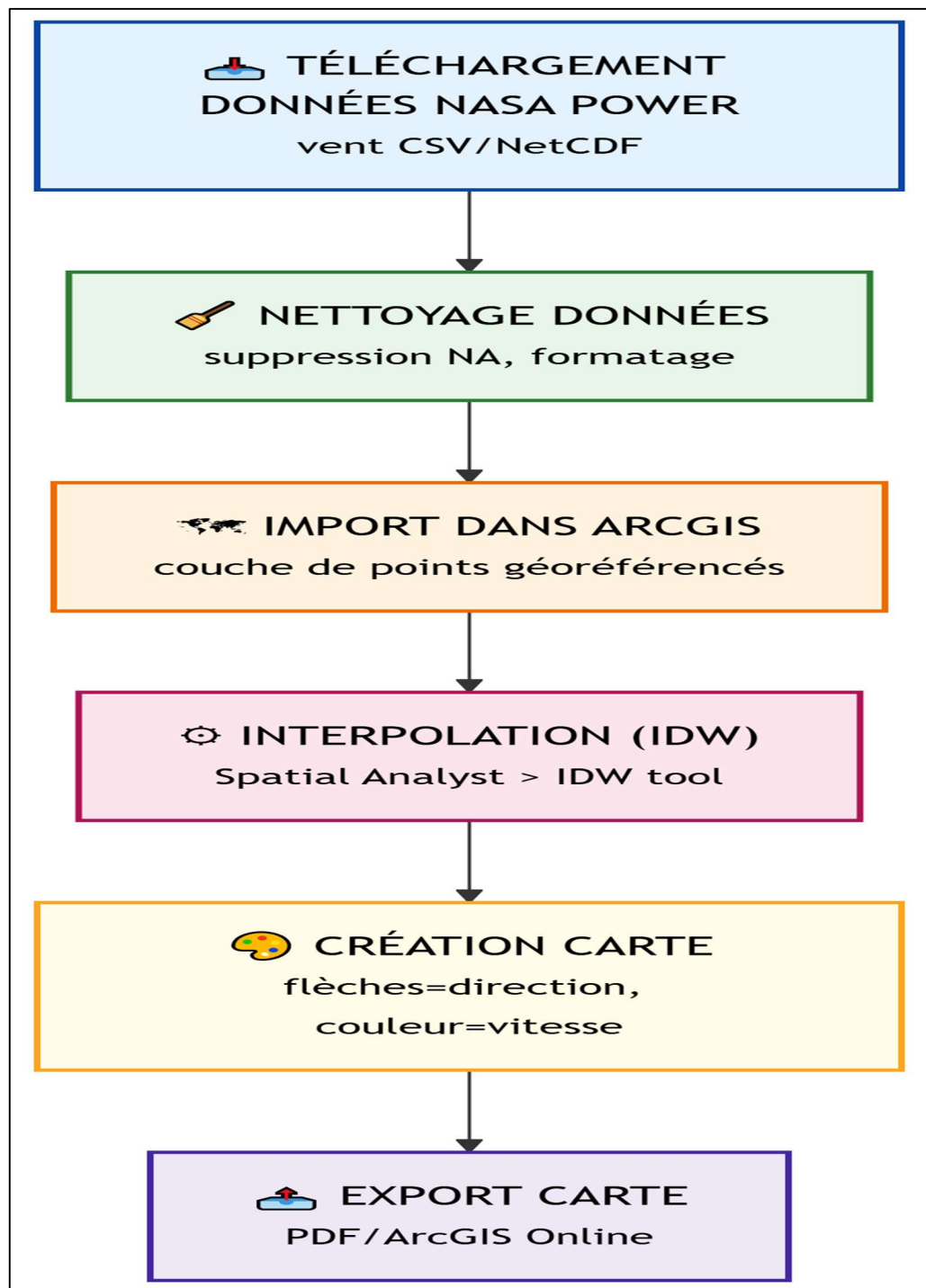


Figure 43: Méthodologie d'élaborer une carte des vents

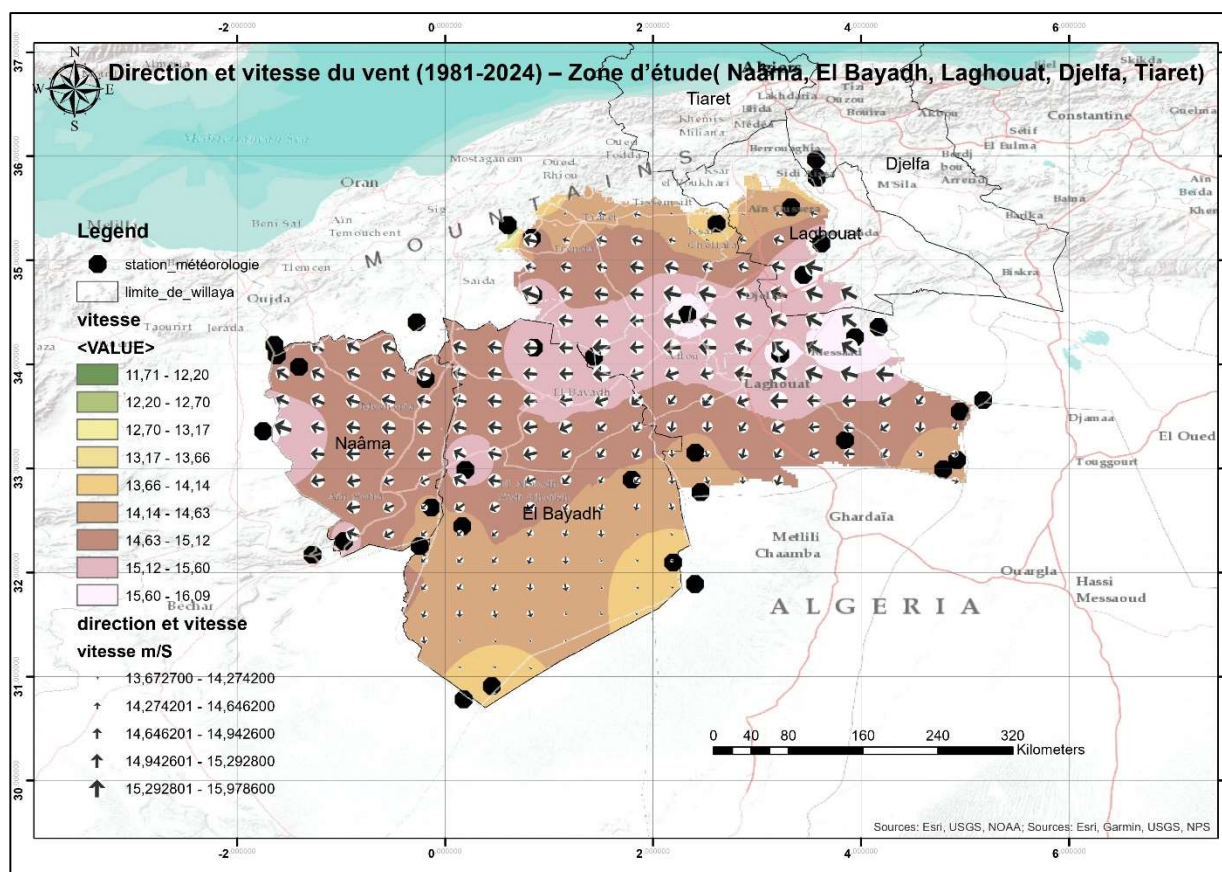


Figure 44: Carte des vents dans la zone d'étude

### 12.1.3 Résultat d'analyse spatiale et climatique :

#### 12.1.3.1.1 Répartition spatiale de la vitesse du vent

- La carte montre une interpolation spatiale des vitesses moyennes du vent sur les cinq wilayas concernées .
- Les zones les plus exposées (teintes rosées à violettes) se situent principalement au sud et au sud-est des wilayas, notamment dans le sud d'El Bayadh et Laghouat, où les vitesses dépassent 15 m/s.
- Les vitesses les plus faibles (zones vert-jaune) apparaissent en périphérie nord et nord-ouest, notamment autour de Naâma.
- Les vitesses élevées relevées (souvent > 14 m/s) indiquent un potentiel éolien très intéressant, notamment pour des applications énergétiques, car la plupart des éoliennes modernes nécessitent un vent moyen d'au moins 6 m/s pour fonctionner efficacement.

#### 12.1.3.1.2 Direction du vent

- Les flèches indiquent la direction dominante du vent sur chaque point d'interpolation.
- On observe une prédominance de vents d'ouest à nord-ouest sur la majorité du territoire, ce qui est cohérent avec la circulation atmosphérique régionale.
- Quelques zones montrent des variations locales, probablement dues à la topographie (reliefs, plateaux).
- Les wilayas de Naâma, El Bayadh, Laghouat, Djelfa et Tiaret présentent un gradient de vitesse du vent croissant du nord vers le sud.
- Le potentiel éolien est élevé, surtout dans le sud et le centre de la zone étudiée, ce qui ouvre des perspectives pour le développement de l'énergie éolienne.
- La densité des stations météorologiques est satisfaisante, mais des efforts d'instrumentation supplémentaires pourraient améliorer la précision des analyses dans les zones peu couvertes.

### **13 Conclusion :**

L'analyse climatique et topographique de la région d'étude a permis de mettre en évidence plusieurs facteurs naturels susceptibles d'influencer le processus de désertification. La baisse irrégulière des précipitations, les températures élevées, la faiblesse de l'humidité du sol, ainsi que la configuration du relief et l'effet des vents sont autant d'éléments qui contribuent à la vulnérabilité environnementale de cette zone. Ces résultats constituent une base essentielle pour les chapitres suivants, qui aborderont plus en détail l'évolution spatiale de la désertification et les méthodes d'évaluation à l'aide des outils géomatiques ;

# CHAPITRE VI : ANALYSE SPATIO-TEMPORELLE

## VENTS DE SABLE, TOPOGRAPHIE, COULOIRS

### 1 Introduction

Ce chapitre expose la méthodologie adoptée pour le traitement des données spatiales et l'analyse cartographique dans le cadre de l'étude de la désertification dans les Hauts Plateaux algériens. L'approche combine l'analyse spatio-temporelle des vents de sable à travers des indices atmosphériques (tels que l'Aerosol Optical Depth - AOD) et l'évaluation de la sensibilité à la désertification via le calcul de l'indice DSI (Desertification Sensitivity Index). Par ailleurs, une cartographie détaillée de la topographie, des reliefs et des chaînes montagneuses a été réalisée à l'aide du Modèle Numérique de Terrain (MNT), dans le but d'identifier les barrières naturelles influençant les mouvements des masses d'air chargées de poussières. L'objectif est de mettre en évidence les couloirs potentiels de transport éolien de sable et de mieux comprendre leur interaction avec la morphologie du territoire.

### 2 Méthodologie générale

La démarche méthodologique adoptée dans cette étude repose sur une combinaison d'analyses spatiales et temporelles appliquées à des données satellitaires et auxiliaires. L'objectif est de détecter les zones les plus sensibles à la désertification en lien avec les couloirs de vents de sable dans la région steppique de l'ouest algérien. Elle se décline en plusieurs étapes :

- Définition de la zone d'étude et découpage des données : Les limites administratives des wilayas étudiées sont utilisées comme masque spatial pour extraire les données pertinentes (NDVI, AOD, MNT) à l'aide de QGIS ou Google Earth Engine. Cette étape garantit que l'analyse se concentre exclusivement sur l'espace géographique cible.
- Prétraitement des images : Les données brutes sont corrigées avant l'analyse. Les images Sentinel-5P (Aerosol Index) sont filtrées pour exclure les valeurs anormales (zones nuageuses ou bruit de capteur). Les images NDVI issues de MODIS ou Sentinel-2 sont harmonisées et reprojetées si nécessaire. Le MNT SRTM est rééchantillonné pour assurer une résolution homogène (Lillesand, 2015).
- Analyse temporelle de l'indice d'aérosol (AOD) : L'indice d'aérosol est extrait pour la période de mars à mai (saisons favorables aux vents sahariens). Une moyenne multi-annuelle (2019–2024) est calculée par pixel, produisant une carte de concentration typique des poussières atmosphériques transportées (Chudnovsky, 2009).
- Extraction des directions dominantes du vent : Si les données climatiques sont disponibles (ex. ECMWF, MERRA-2), les vecteurs  $u10$  (composante est-ouest) et  $v10$  (composante nord-sud) sont exploités pour identifier les flux dominants de transport éolien. Un filtrage est appliqué pour isoler les vents orientés du sud vers le nord.
- Croisement avec le MNT pour identification des obstacles naturels : Le MNT est analysé pour localiser les chaînes montagneuses dépassant 1200 mètres. Ces reliefs peuvent faire obstacle ou canaliser les vents de sable. Une carte binaire (obstacle/non-obstacle) est générée et superposée aux flux d'aérosols.
- Analyse du NDVI et calcul d'un indice de sensibilité à la désertification (DSI) : Le NDVI est moyenné sur les mêmes mois (mars–mai) pour détecter la vigueur de la végétation. Il est intégré avec la pente issue du MNT et la texture du sol (clay, sand, silt – SoilGrids) pour produire un indice composite de sensibilité, inspiré du modèle MEDALUS.

- Production cartographique et synthèse des zones à risque : Toutes les couches (NDVI, AOD, relief, DSI, direction des vents) sont intégrées dans un SIG pour établir des cartes thématiques. Une classification multicritère permet de hiérarchiser les zones les plus sensibles, guidant ainsi les recommandations pour la lutte contre la désertification.

### 3 Travaux sur Aérosols

#### 3.1 Objectif A :

Analyser la fréquence annuelle des jours où l'épaisseur optique des aérosols (AOD) est supérieure à 0.5 en Algérie, sur la période 2018 à 2024, afin d'identifier :

- L'année la plus poussiéreuse,
- Visualiser la carte de cette année,

Pourquoi du 2018 Au 2024 ? parce que la collection MODIS/006/MCD19A2 n'a pas de données disponibles pour l'Algérie avant 2018.

Même si dans la description indique une disponibilité depuis 2000, en réalité, les données MAIAC (MCD19A2) Terra+Aqua ne sont globalement complètes que depuis 2018, surtout en Afrique du Nord.

##### 3.1.1 Résultats :

Année la plus active en vent de sable du 2018 au 2024 est l'année 2022.

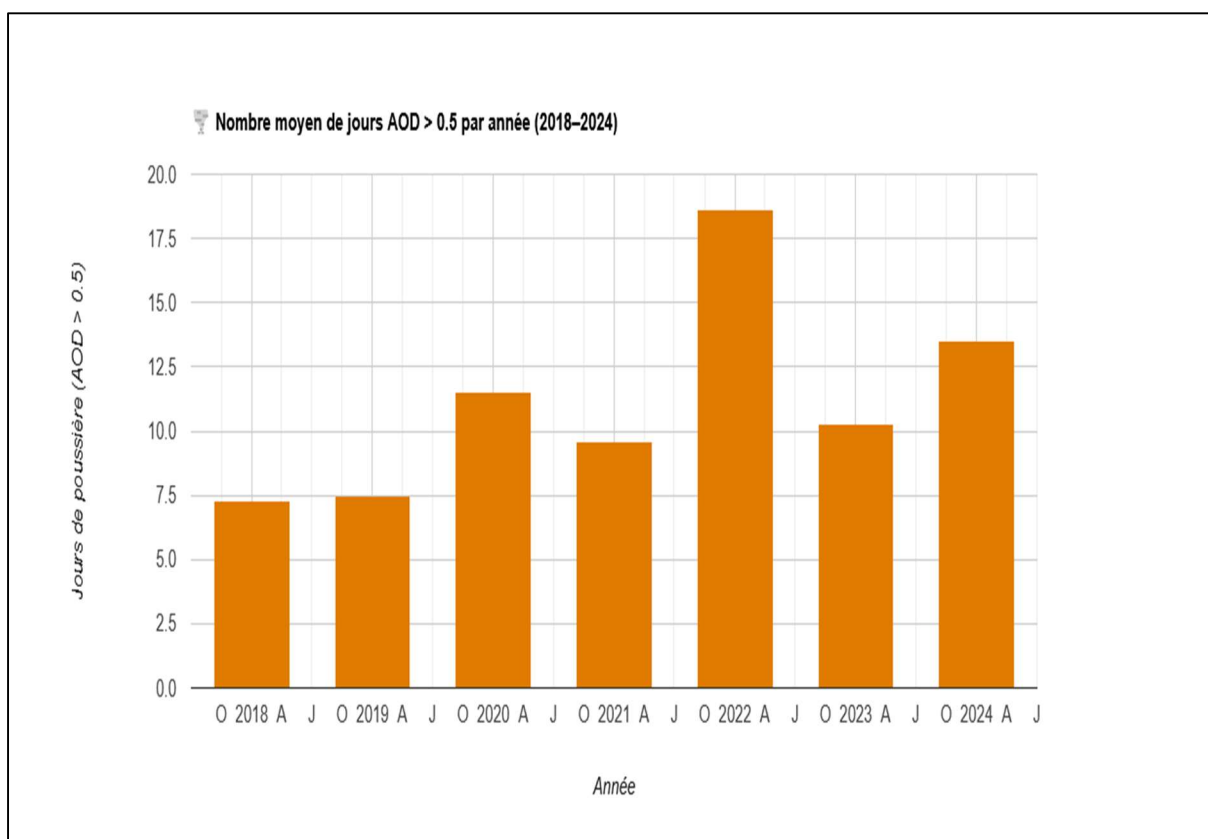


Figure 45: L'année la plus poussiéreuse dans la période du 2018 au 2024

#### 3.2 Objectif B :

Analyser l'activité mensuelle des tempêtes de sable en Algérie pour l'année 2022, à partir de l'indice d'aérosols MODIS AOD à 550 nm plus précisément :

- Calculer le nombre de jours par mois où l'AOD dépasse 0.5 (indicateur de poussière dense),
- Identifier le mois le plus poussiéreux,

### 3.2.1 Résultats :

Le Mois le plus poussiéreux en 2022 en Algérie est le mois de mars.

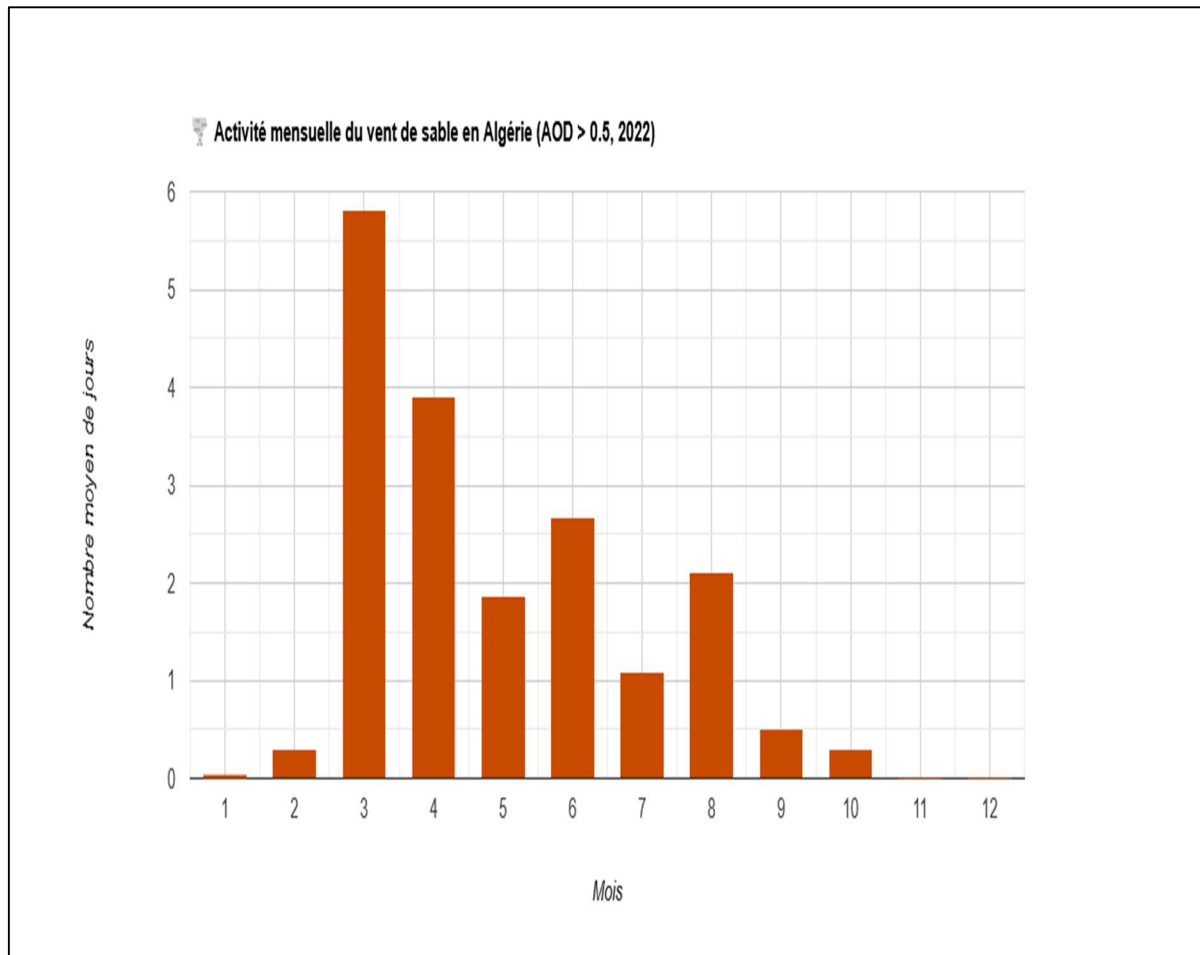


Figure 46: Le mois le plus poussiéreux en 2022

### 3.3 Objectif C :

- Détecter la wilaya algérienne la plus touchée par les vents de sable en 2022.
- Analyser la fréquence des jours poussiéreux (AOD > 0.5) sur l'année 2022 en Algérie à l'aide des données MODIS, en identifiant les wilayas les plus touchées
- Utiliser la fonction "reduceRegions" pour appliquer un calcul statistique sur chaque wilaya.
- Calculer la moyenne des jours AOD > 0.5 par wilaya.
- Afficher la carte des jours AOD > 0.5 avec une échelle colorée (de peu à très touché).

### 3.3.1 Résultats

- La wilaya la plus touchée en 2022 est adrar

Tableau 15: Pourcentage d'exposition à l'AOD en 2022 % Algérie

| <b>Wilaya</b>         | <b>Pourcentage d'exposition à l'AOD en 2022 %</b> |
|-----------------------|---------------------------------------------------|
| <b>Adrar</b>          | <b>100.000000</b>                                 |
| <b>Chlef</b>          | 10.358060                                         |
| <b>Laghouat</b>       | 32.157589                                         |
| <b>Oum El Bouaghi</b> | 21.612532                                         |
| <b>Batna</b>          | 18.599609                                         |
| <b>Bejaia</b>         | 27.468373                                         |
| <b>Biskra</b>         | 38.659279                                         |
| <b>Bechar</b>         | 44.566989                                         |
| <b>Blida</b>          | 23.253840                                         |
| <b>Bouira</b>         | 36.694941                                         |
| <b>Tamanrasset</b>    | <b>77.529220</b>                                  |
| <b>Tebessa</b>        | 29.372152                                         |
| <b>Tlemcen</b>        | 15.247556                                         |
| <b>Tiaret</b>         | 31.680455                                         |
| <b>Tizi Ouzou</b>     | 22.538077                                         |
| <b>Alger</b>          | 24.365760                                         |
| <b>Djelfa</b>         | 36.870290                                         |
| <b>Jijel</b>          | 9.758054                                          |
| <b>Setif</b>          | 36.141460                                         |
| <b>Saida</b>          | 31.736397                                         |
| <b>Skikda</b>         | 7.235601                                          |
| <b>Sidi Bel Abbes</b> | 30.776661                                         |
| <b>Annaba</b>         | 11.502622                                         |
| <b>Guelma</b>         | 10.843382                                         |
| <b>Constantine</b>    | 15.144628                                         |
| <b>Medea</b>          | 33.864383                                         |
| <b>Mostaganem</b>     | 8.450947                                          |
| <b>Mascara</b>        | 19.432938                                         |
| <b>Ouargla</b>        | <b>58.078941</b>                                  |
| <b>Oran</b>           | 8.490793                                          |
| <b>El Bayadh</b>      | 36.431821                                         |
| <b>Illizi</b>         | <b>63.516240</b>                                  |
| <b>Boumerdes</b>      | 13.581512                                         |
| <b>El Tarf</b>        | 14.340606                                         |
| <b>Tindouf</b>        | <b>72.326442</b>                                  |
| <b>Tissemsilt</b>     | 19.429590                                         |
| <b>El Oued</b>        | 31.597166                                         |
| <b>Khenchela</b>      | 29.096328                                         |
| <b>Tipaza</b>         | 14.390650                                         |
| <b>Mila</b>           | 16.637267                                         |
| <b>Ain Defla</b>      | 21.384803                                         |
| <b>Naama</b>          | 37.846054                                         |
| <b>Ain Temouchent</b> | 10.841906                                         |
| <b>Ghardaia</b>       | 49.690361                                         |

|                          |           |
|--------------------------|-----------|
| <b>Relizane</b>          | 14.513497 |
| <b>Bordj Bou Arrerij</b> | 37.592877 |
| <b>M'Sila</b>            | 37.656753 |
| <b>Souk Ahras</b>        | 17.186283 |

- Classement des wilayas de la zone d'étude selon le pourcentage d'exposition à l'AOD en 2022, par ordre décroissant :  
1- Naâma 2-Djelfa 3-El Bayadh 4-Laghouat 5-Tiaret

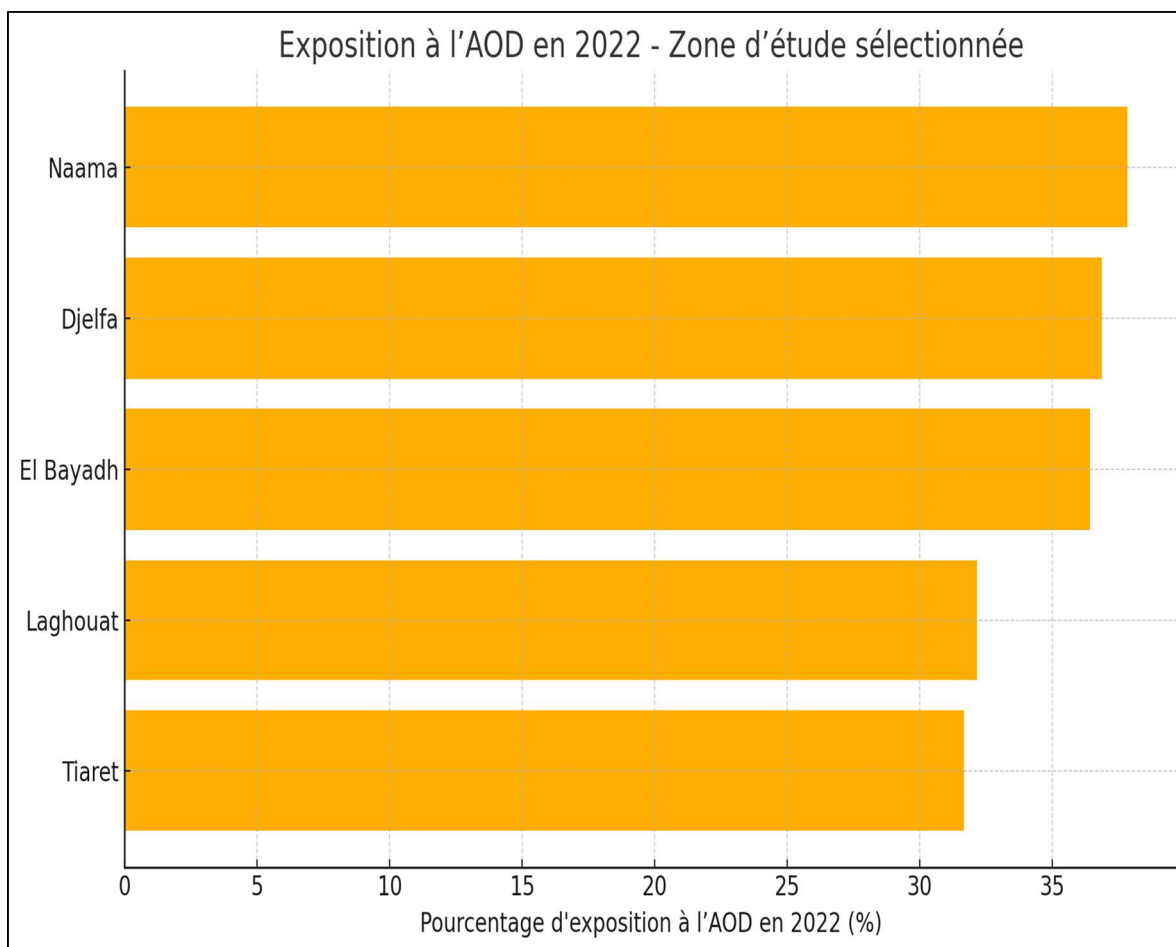


Figure 47: Classement des wilayas de votre zone d'étude selon le pourcentage d'exposition à l'AOD en 2022

### 3.4 Mode opératoire du calcul de l'indice de sensibilité à la désertification (DSI)

#### 3.4.1 Rappel : Le Desertification Sensitivity Index (DSI) :

C'est un indicateur composite permettant de mesurer la vulnérabilité d'un territoire face à la désertification. Il repose sur la combinaison de plusieurs variables environnementales représentant quatre dimensions majeures : la végétation, le climat, le sol et la pression anthropique. Le mode opératoire décrit ci-dessous détaille les étapes suivies pour le calcul et l'analyse du DSI dans la zone d'étude.

### 3.4.2 Sélection des indicateurs :

Les indicateurs utilisés sont choisis pour représenter les facteurs majeurs de la désertification. Les jeux de données sont préalablement téléchargés depuis Google Earth Engine, Copernicus ou d'autres sources ouvertes. Les variables sélectionnées sont les suivantes :

Tableau 16: Les indicateurs utilisés pour calcul DSI

| Domaine              | Indicateur                                                | Source                     | Année     |
|----------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------|-----------|
| Végétation           | NDVI moyen annuel                                         | Sentinel                   | 2022      |
| Climat               | Précipitations (mm), Evapotranspiration potentielle (PET) | CHIRPS, TerraClimate, ERA5 | 2022      |
| Sol                  | Pourcentage de sable en surface                           | ISRIC SoilGrids            | 2020      |
| Pression anthropique | Densité de population (hab/km <sup>2</sup> )              | WorldPop ou LandScan       | 2020–2022 |

### 3.4.3 Calcul de l'indice DSI :

Le Desertification Sensitivity Index (DSI) est un indice composite utilisé pour évaluer la vulnérabilité des terres à la désertification. Il est calculé en combinant quatre sous-indices :

VQI : Vegetation Quality Index

CQI : Climate Quality Index

SQI : Soil Quality Index

MQI : Management Quality Index (pression anthropique)

La formule du DSI est donnée par la moyenne géométrique des quatre sous-indices :

$$DSI = (VQI \times CQI \times SQI \times MQI)^{(1/4)}$$

## 3.5 Analyse des résultats par wilaya :

### 3.5.1 Wilaya Djelfa :

S'étend sur une superficie totale de 32 256,35 km<sup>2</sup> représentant 1,36% de la superficie totale du pays.

#### 3.5.1.1 Résumé des indicateurs environnementaux Wilaya de Djelfa :

Tableau 17: Résumé des indicateurs environnementaux Wilaya de Djelfa

|   | Indicateur                             | Moyenne | Médiane | Total estimé | Unité     | Note                                             |
|---|----------------------------------------|---------|---------|--------------|-----------|--------------------------------------------------|
| 1 | Population totale estimée              | 0.13    | 0.00    | 2 004 000    | Habitants | Valeur réelle selon l'estimation officielle 2022 |
| 2 | Précipitations annuelles moyennes      | 81.44   | 0.00    | 746.27       | mm/an     | Typique des zones arides à semi-arides           |
| 3 | Évapotranspiration potentielle moyenne | 546.21  | 0.00    | 5004.98      | mm/an     | Indique une forte demande hydrique               |

|   |                                  |       |       |   |            |                                            |
|---|----------------------------------|-------|-------|---|------------|--------------------------------------------|
| 4 | Teneur en sable moyenne (0–5 cm) | 15.89 | 0.00  | — | %          | Sol sablonneux, sensible à l'érosion       |
| 5 | NDVI moyen (2022)                | 0.091 | 0.080 | — | Sans unité | Indice de végétation faible → zones arides |

### 3.5.1.2 Calcul du DSI à partir des indicateurs environnementaux de Djelfa :

#### • Données environnementales moyennes

Les indicateurs utilisés pour le calcul du Desertification Sensitivity Index (DSI) sont :

- NDVI moyen (2022) : 0.091
- Précipitations annuelles moyennes : 81.44 mm/an
- Évapotranspiration potentielle moyenne : 546.21 mm/an
- Teneur en sable moyenne (0–5 cm) : 15.89 %
- Population totale estimée : 2 004 000 habitants (densité  $\approx 13$  hab/km<sup>2</sup>)

### 3.5.1.3 Reclassification des indicateurs

| Indicateur          | Valeur observée        | Classe DSI |
|---------------------|------------------------|------------|
| VQI (NDVI)          | 0.091                  | 3          |
| CQI (précip. + PET) | 81.44 mm + 546.21 mm   | 2          |
| SQI (sable)         | 15.89 %                | 1          |
| MQI (densité pop.)  | 13 hab/km <sup>2</sup> | 1          |

### 3.5.1.4 Calcul du DSI

Formule utilisée :  $DSI = (VQI \times CQI \times SQI \times MQI)^{(1/4)}$

Substitution :  $DSI = (3 \times 2 \times 1 \times 1)^{(1/4)} = (6)^{(1/4)} \approx 1.57$

### 3.5.1.5 Interprétation

Selon la classification du DSI :

| Intervalle du DSI | Niveau de sensibilité |
|-------------------|-----------------------|
| 1.0 – 1.2         | Faible                |
| 1.2 – 1.4         | Moyenne               |
| > 1.4             | Forte                 |

Le DSI obtenu est de 1.57, ce qui correspond à une « sensibilité Forte à la désertification ».

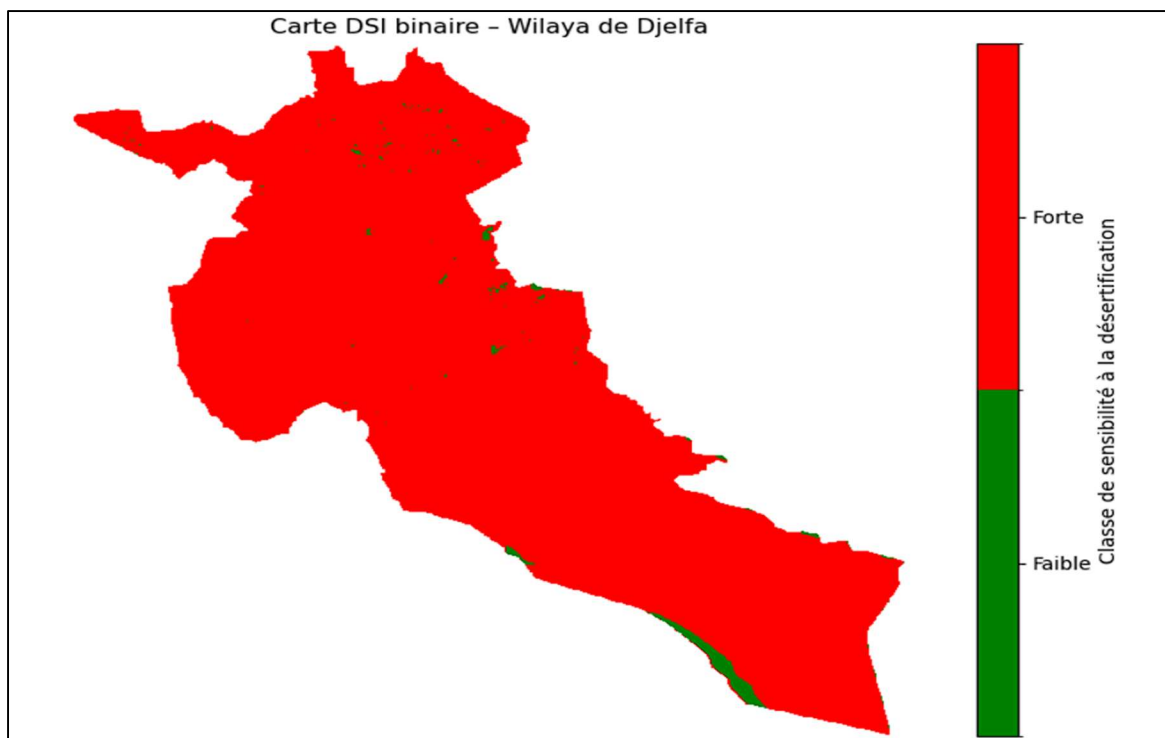


Figure 48: Carte DSI Wilaya Djelfa

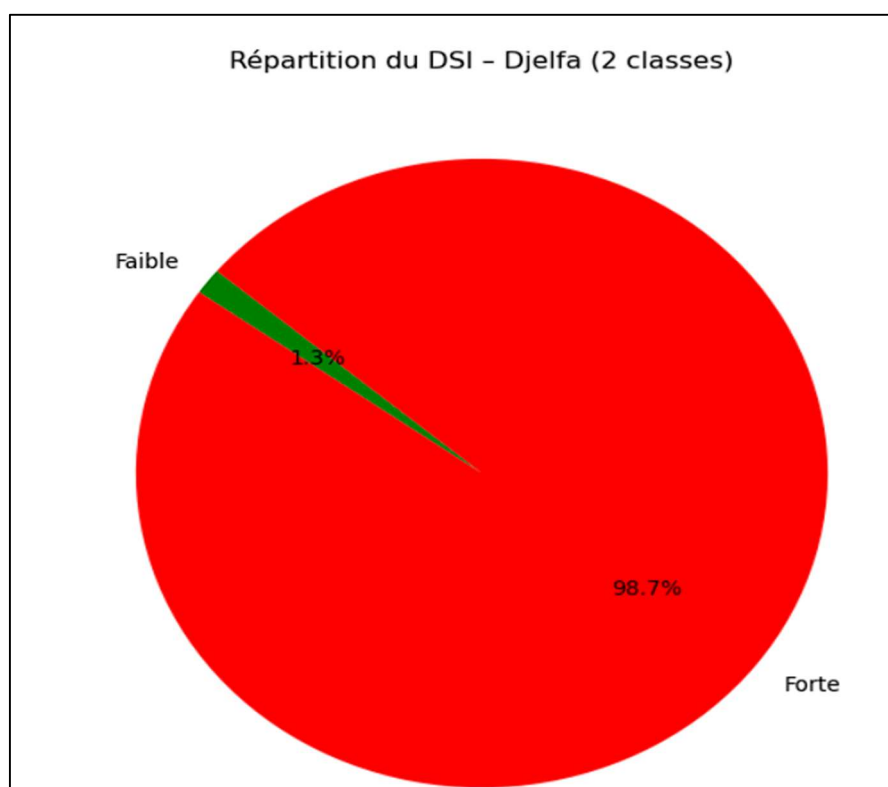


Figure 49: Répartition du DSI pie chart Djelfa

### 3.5.2 Wilaya d'Elbayadh :

Elle s'étend sur une *superficie* de 71.697 Km<sup>2</sup>

### 3.5.2.1 Résumé des indicateurs environnementaux et calcul du Desertification Sensitivity Index (DSI) Wilaya d'El Bayadh :

Tableau 18: Résumé des indicateurs environnementaux et calcul (DSI) Wilaya d'El Bayadh

|   | Indicateur                             | Moyenne | Médiane | Total estimé | Unité      | Note                                               |
|---|----------------------------------------|---------|---------|--------------|------------|----------------------------------------------------|
| 1 | Population totale estimée              | 0.02    | 0.00    | 310 000      | Habitants  | Valeur réelle selon l'estimation officielle 2022   |
| 2 | Précipitations annuelles moyennes      | 85.56   | 94.04   | 894.64       | mm/an      | Climat aride à semi-aride                          |
| 3 | Évapotranspiration potentielle moyenne | 1144.57 | 1538.33 | 11968.45     | mm/an      | Forte perte en eau → stress hydrique               |
| 4 | Teneur en sable moyenne (0–5 cm)       | 30.64   | 41.90   | —            | %          | Sols sensibles à l'érosion et à la désertification |
| 5 | NDVI moyen (2022)                      | 0.093   | 0.081   | —            | Sans unité | Indice de végétation faible → zones arides         |

### 3.5.2.2 Reclassification des indicateurs en scores DSI

| Composante       | Valeur observée                        | Seuils de sensibilité                        | Score attribué |
|------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------|----------------|
| Végétation (VQI) | NDVI = 0.093                           | < 0.1 → Végétation très faible               | 2.0            |
| Climat (CQI)     | P = 85.56 mm/an<br>PET = 1144.57 mm/an | P < 100 mm + PET > 1000 mm → Stress hydrique | 1.75           |
| Sol (SQI)        | Sable = 30.64 %                        | 30–50 % sable → forte sensibilité            | 1.5            |
| Population (MQI) | 310 000 hab                            | 300 000–600 000 → pression modérée à élevée  | 1.5            |

### 3.5.2.3 Formule du DSI

$$DSI = \sqrt[4]{(VQI \times CQI \times SQI \times MQI)}$$

$$DSI = \sqrt[4]{(2.0 \times 1.75 \times 1.5 \times 1.5)} = \sqrt[4]{(7.875)} \approx 1.58$$

### 3.5.2.4 Interprétation du résultat

| Intervalle du DSI | Niveau de sensibilité |
|-------------------|-----------------------|
| 1.0 – 1.2         | Faible                |
| 1.2 – 1.4         | Moyenne               |
| > 1.4             | Forte                 |

La wilaya d'El Bayadh présente une sensibilité Forte à la désertification selon l'indice DSI ( $\approx 1.58$ ).

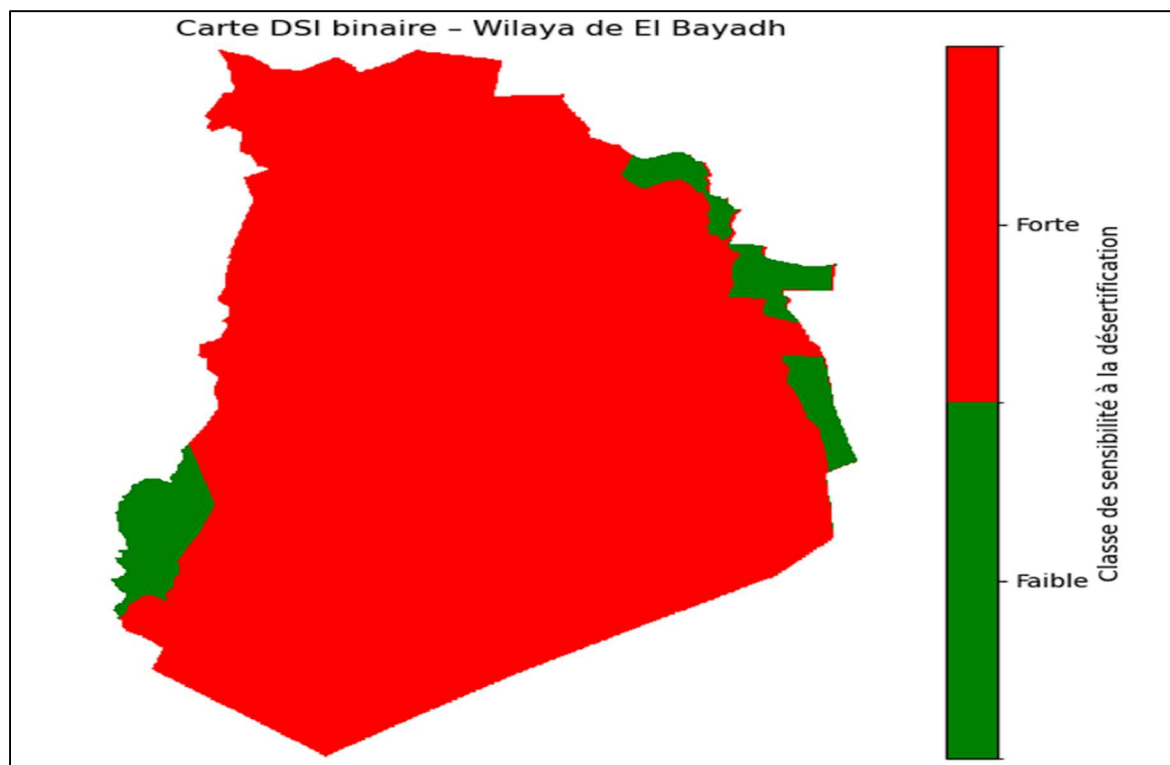


Figure 50: Carte DSI Wilaya Elbayadh

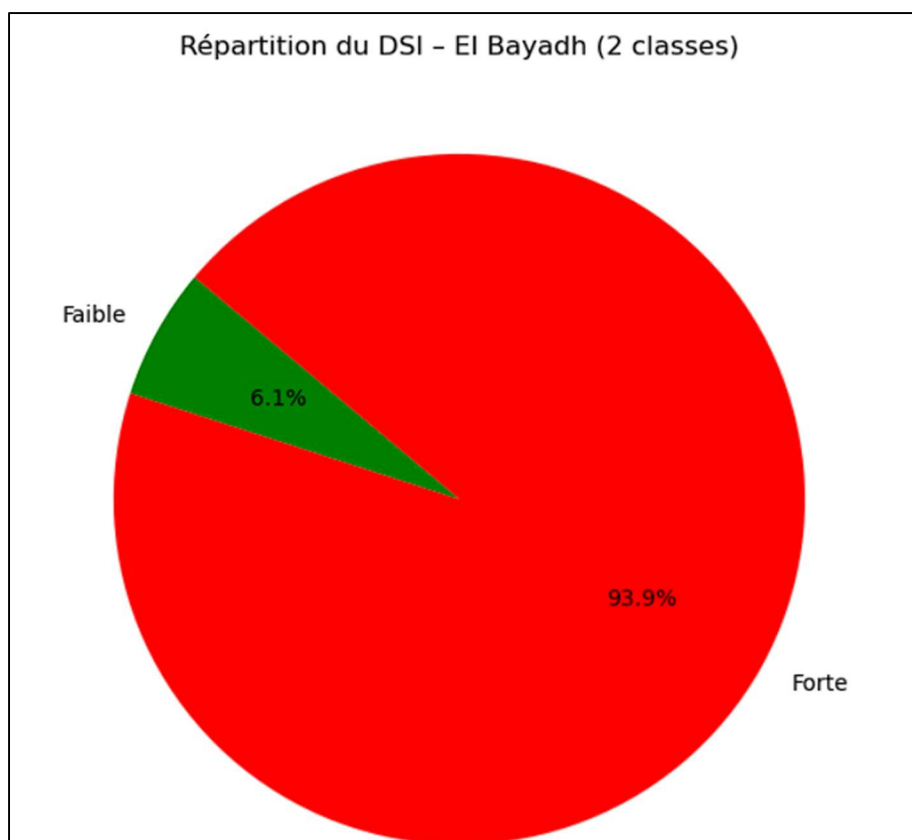


Figure 51: Répartition du DSI pie chart Elbayadh

### 3.5.3 Wilaya de Laghouat :

S'étend sur 25 052 km<sup>2</sup>

#### 3.5.3.1 Résumé des indicateurs environnementaux et calcul du Desertification Sensitivity Index (DSI) Wilaya de Laghouat :

Tableau 19: Résumé des indicateurs environnementaux et calcul (DSI) Wilaya de Laghouat

|   | Indicateur                             | Moyenne    | Médiane | Total estimé | Unité      | Note                                     |
|---|----------------------------------------|------------|---------|--------------|------------|------------------------------------------|
| 1 | NDVI moyen (2022)                      | 0.077      | 0.076   | —            | Sans unité | Indice de végétation modéré à faible     |
| 2 | Précipitations annuelles moyennes      | 72.879997  | 0.0     | 434.350006   | mm/an      | Régime semi-aride                        |
| 3 | Évapotranspiration potentielle moyenne | 737.929993 | 0.0     | 4397.660156  | mm/an      | Demande hydrique élevée                  |
| 4 | Teneur en sable moyenne (0–5 cm)       | 22.99      | 0.0     | —            | %          | Sol sablonneux → sensibilité à l'érosion |
| 5 | Population totale estimée              | 0.09       | 0.00    | 621 000      | Habitants  | Valeur officielle 2022                   |

### 3.5.3.2 Reclassification des indicateurs en scores DSI

| Composante              | Valeur observée                       | Seuils de sensibilité                       | Score attribué |
|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------|----------------|
| <b>Végétation (VQI)</b> | NDVI = 0.077                          | < 0.1 → Très faible végétation              | 2.0            |
| <b>Climat (CQI)</b>     | P = 72.88 mm/an<br>PET = 737.93 mm/an | P < 100 mm + PET > 600 mm → Stress hydrique | 1.75           |
| <b>Sol (SQI)</b>        | Sable = 22.99 %                       | 20–30 % sable → Moyenne sensibilité         | 1.25           |
| <b>Population (MQI)</b> | 621 000 hab                           | > 600 000 habitants → forte pression        | 2.0            |

### 3.5.3.3 Formule du DSI

$$DSI = \sqrt[4]{(VQI \times CQI \times SQI \times MQI)}$$

$$DSI = \sqrt[4]{(2.0 \times 1.75 \times 1.25 \times 2.0)} = \sqrt[4]{(8.75)} \approx 1.67$$

### 3.5.3.4 Interprétation du résultat

| Intervalle du DSI | Niveau de sensibilité |
|-------------------|-----------------------|
| 1.0 – 1.2         | Faible                |
| 1.2 – 1.4         | Moyenne               |
| > 1.4             | Forte                 |

Conclusion : La wilaya de Laghouat présente une sensibilité forte à la désertification selon l'indice DSI.

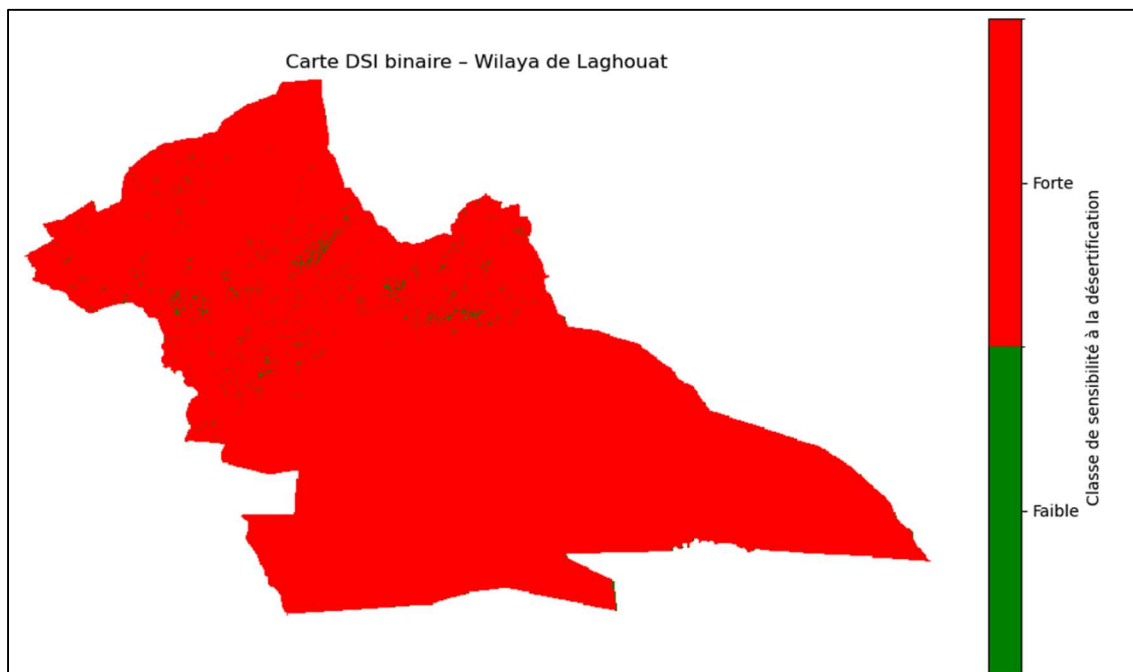


Figure 52: Carte DSI Wilaya Laghouat

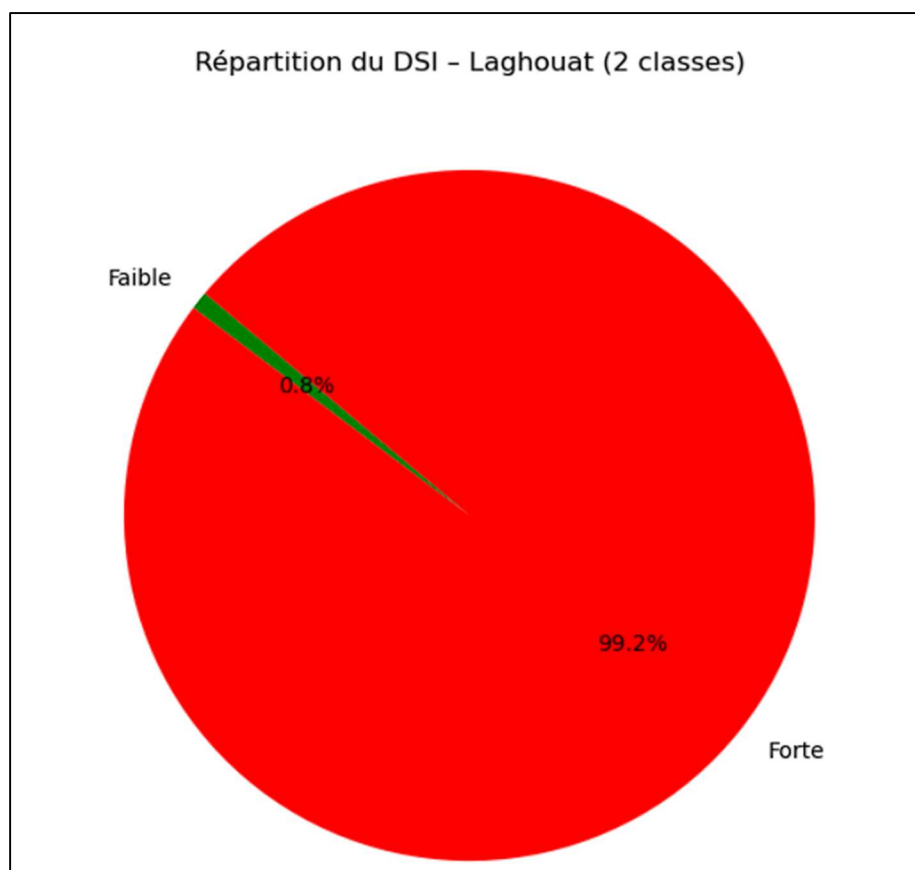


Figure 53: Répartition du DSI Pie chart Laghouat

### 3.5.4 Wilaya de Naama :

S'étend sur une *superficie* de 29 819,30 Km<sup>2</sup>

#### 3.5.4.1 Résumé des indicateurs environnementaux Wilaya de Naâma :

Tableau 20: Résumé des indicateurs environnementaux calcul (DSI) Wilaya de Naâma

|   | Indicateur                             | Moyenne | Médiane | Total estimé | Unité      | Note                                             |
|---|----------------------------------------|---------|---------|--------------|------------|--------------------------------------------------|
| 1 | NDVI moyen (2022)                      | 0.073   | 0.073   | —            | Sans unité | Indice de végétation faible (zones arides)       |
| 2 | Précipitations annuelles moyennes      | 114.50  | 138.11  | 475.98       | mm/an      | Climat aride typique du sud-ouest                |
| 3 | Évapotranspiration potentielle moyenne | 1078.64 | 1526.08 | 4484.10      | mm/an      | Forte perte en eau (déficit hydrique)            |
| 4 | Teneur en sable moyenne (0–5 cm)       | 33.32   | 43.90   | —            | %          | Sol sablonneux – sensible à la désertification   |
| 5 | Population totale estimée              | 0.06    | 0.01    | 234 000      | Habitants  | Valeur réelle selon l'estimation officielle 2022 |

### 3.5.4.2 Reclassification des indicateurs en scores DSI

| Composante       | Valeur observée                         | Seuils de sensibilité                        | Score attribué |
|------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------|----------------|
| Végétation (VQI) | NDVI = 0.073                            | < 0.1 → Végétation très faible               | 2.0            |
| Climat (CQI)     | P = 114.50 mm/an<br>PET = 1078.64 mm/an | P < 150 mm + PET > 1000 mm → Stress hydrique | 1.5            |
| Sol (SQI)        | Sable = 33.32 %                         | 30–50 % sable → forte sensibilité            | 1.5            |
| Population (MQI) | 234 000 hab                             | 100 000–300 000 → pression modérée           | 1.25           |

### 3.5.4.3 Formule du DSI

$$DSI = \sqrt[4]{(VQI \times CQI \times SQI \times MQI)}$$

$$DSI = \sqrt[4]{(2.0 \times 1.5 \times 1.5 \times 1.25)} = \sqrt[4]{(5.625)} \approx 1.50$$

### 3.5.4.4 Interprétation du résultat

| Intervalle du DSI | Niveau de sensibilité |
|-------------------|-----------------------|
| 1.0 – 1.2         | Faible                |
| 1.2 – 1.4         | Moyenne               |
| > 1.4             | Forte                 |

Conclusion : La wilaya de Naâma présente une sensibilité forte à la désertification selon l'indice DSI ( $\approx$

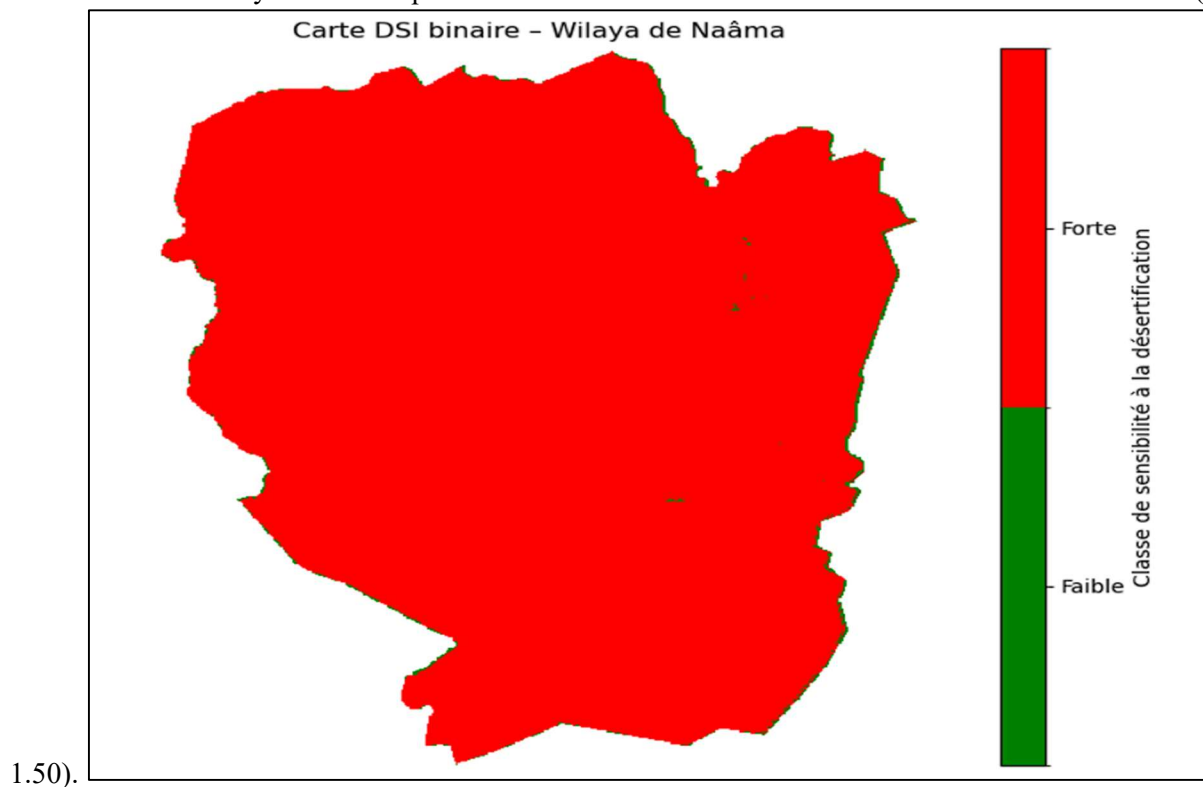


Figure 54: Carte DSI Wilaya Naama

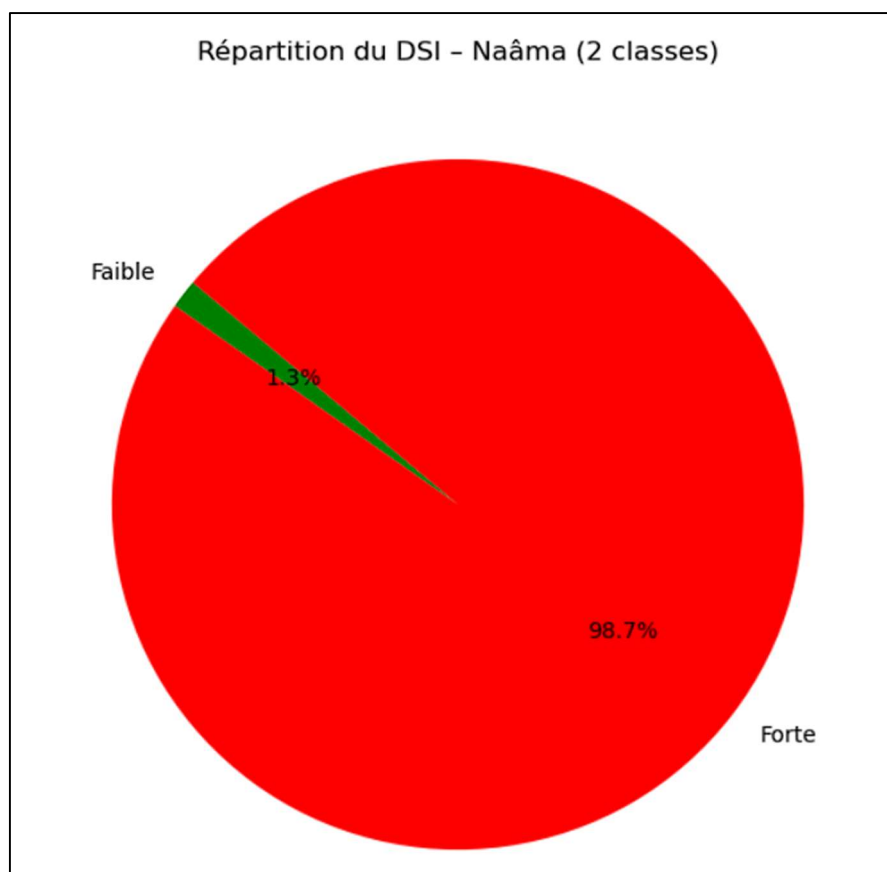


Figure 55: Répartition du DSI Pie chart Naama

### 3.5.5 Wilaya de Tiaret

S'étend sur 23452 Km<sup>2</sup>

#### 3.5.5.1 Résumé des indicateurs environnementaux et calcul du Desertification Sensitivity Index (DSI) Wilaya de Tiaret :

Tableau 21: Résumé des indicateurs environnementaux calcul (DSI) Wilaya de Tiaret

|   | Indicateur                             | Moyenne | Médiane | Total estimé | Unité     | Note                                                        |
|---|----------------------------------------|---------|---------|--------------|-----------|-------------------------------------------------------------|
| 1 | Population totale estimée              | 0.22    | 0.01    | 1 005 000    | Habitants | Valeur réelle selon l'estimation officielle 2022            |
| 2 | Précipitations annuelles moyennes      | 161.55  | 223.35  | 582.09       | mm/an     | Climat semi-aride typique                                   |
| 3 | Évapotranspiration potentielle moyenne | 735.87  | 1254.75 | 2651.54      | mm/an     | Indique un fort déficit hydrique                            |
| 4 | Teneur en sable moyenne (0–5 cm)       | 22.41   | 35.50   | —            | %         | Sol sableux influençant la sensibilité à la désertification |

|   |                   |       |       |   |            |                                            |
|---|-------------------|-------|-------|---|------------|--------------------------------------------|
| 5 | NDVI moyen (2022) | 0.118 | 0.103 | — | Sans unité | Indice de végétation faible (zones arides) |
|---|-------------------|-------|-------|---|------------|--------------------------------------------|

### 3.5.5.2 Reclassification des indicateurs en scores DSI

| Composante       | Valeur observée                        | Seuils de sensibilité                        | Score attribué |
|------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------|----------------|
| Végétation (VQI) | NDVI = 0.118                           | 0.1–0.2 → Faible végétation                  | 1.5            |
| Climat (CQI)     | P = 161.55 mm/an<br>PET = 735.87 mm/an | P < 200 mm + PET > 600 mm → Déficit hydrique | 1.5            |
| Sol (SQI)        | Sable = 22.41 %                        | 20–30 % sable → Moyenne sensibilité          | 1.25           |
| Population (MQI) | 1 005 000 hab                          | 1 000 000–1 500 000 → forte pression         | 2.0            |

### 3.5.5.3 Formule du DSI

$$DSI = \sqrt[4]{(VQI \times CQI \times SQI \times MQI)}$$

$$DSI = \sqrt[4]{(1.5 \times 1.5 \times 1.25 \times 2.0)} = \sqrt[4]{5.625} \approx 1.50$$

### 3.5.5.4 Interprétation du résultat

| Intervalle du DSI | Niveau de sensibilité |
|-------------------|-----------------------|
| 1.0 – 1.2         | Faible                |
| 1.2 – 1.4         | Moyenne               |
| > 1.4             | Forte                 |

Conclusion : La wilaya de Tiaret présente une sensibilité forte à la désertification selon l'indice DSI ( $\approx 1.50$ ).

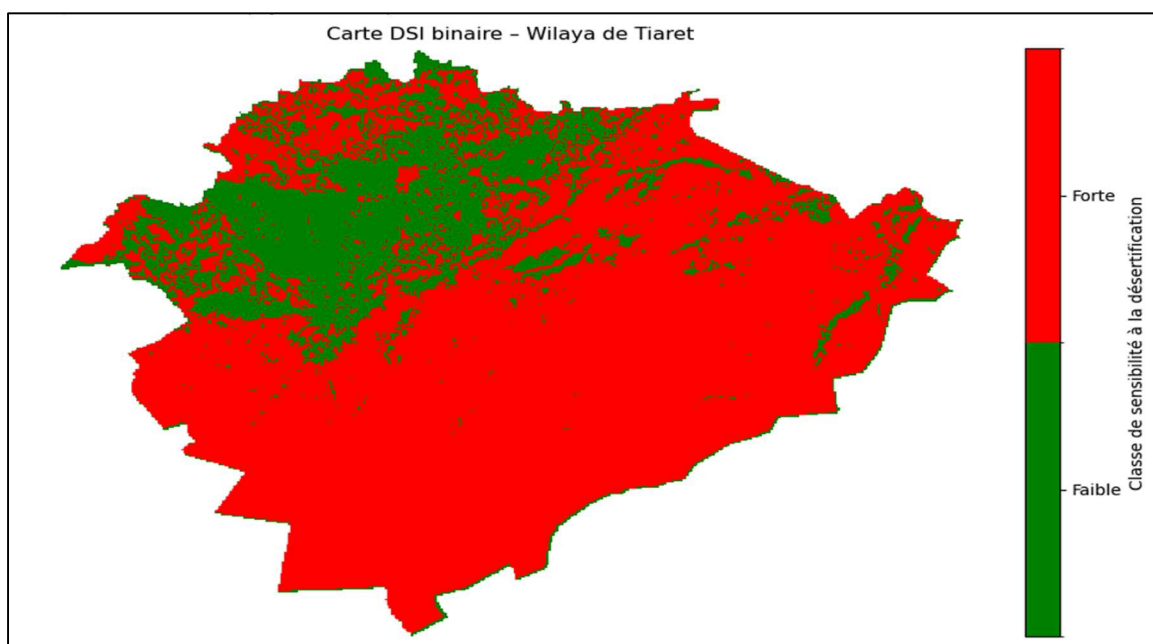
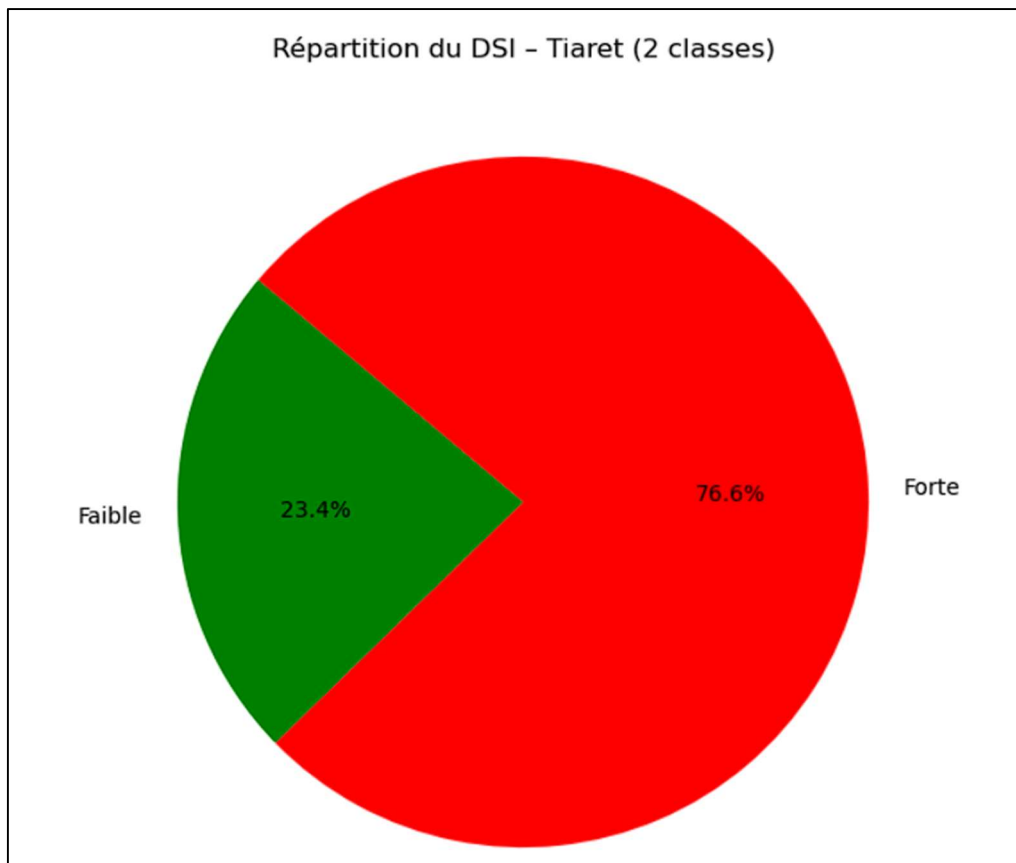


Figure 56: Carte DSI Wilaya Tiaret



*Figure 57: Répartition du DSI Pie chart Tiaret*

## **4 Procédure de détection des couloirs de vent de sable**

### **4.1 Outils nécessaires :**

- Google Earth Engine (données Sentinel-5P, MODIS AI)
- SRTM (ou ASTER GDEM) → pour relief / pente
- SIG (QGIS, ArcGIS Pro)

### **4.2 Étapes de la procédure complète :**

#### **4.2.1 Analyse des vents sableux (aérosols)**

- Télécharger ou extraire les images Sentinel-5P (COPERNICUS/S5P/OFFL/L3\_AER\_AI) entre mars et mai, sur plusieurs années
- Créer une moyenne interannuelle de l'Aerosol Index (AI) pour visualiser les zones traversées
- Dans le cadre de cette étude, l'épaisseur optique des aérosols (Aerosol Optical Depth, AOD) a été utilisée comme indicateur de la charge atmosphérique en particules. Plus précisément, un seuil de AOD > 0.5 a été retenu pour identifier les journées présentant une concentration significative d'aérosols, notamment les poussières minérales sahariennes.

**NB :** Ce choix repose sur plusieurs études scientifiques qui démontrent que ce seuil permet de filtrer les conditions atmosphériques normales ou légèrement chargées en aérosols, et de mettre en évidence les

événements poussiéreux intenses (dust storms, sand transport events), qui ont un impact majeur sur l'environnement, la santé humaine et la dynamique de la désertification.

Selon Ginoux et al. (2001) et Prospero et al. (2002), une valeur de AOD supérieure à 0.5 est typiquement associée à des panaches de poussière d'origine saharienne, transportés sur de longues distances.

Pourquoi  $AOD > 0.5$  ?

Selon l'étude de (Prospero, 2002) (Ginoux, 2012)  $AOD > 0.5$  utilisé pour détecter des panaches de poussière saharienne sur l'Atlantique.

Ginoux et al. (2012) – *Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources*.

- Utilise  $AOD > 0.5$  pour séparer poussière naturelle vs anthropique.

Ce seuil est un compromis reconnu dans de nombreuses études scientifiques pour :

- Écarter le bruit de fond des aérosols naturels ou urbains modérés.
- Détecter les événements météorologiques marqués : tempêtes de sable, éruptions volcaniques, feux de forêts.
- Spécifiquement, les poussières minérales du Sahara atteignent souvent des  $AOD > 0.5$  lors de leur transport vers le nord (Maghreb, Méditerranée, Europe).

#### **4.2.2 Analyse topographique et pente**

- Télécharger le MNT (SRTM 30 m) de l'Algérie
- Calculer : La pente et les reliefs
- Identifier les chaînes de montagnes qui forment des barrières naturelles

#### **4.2.3 Dédution des couloirs**

- Superposer : Carte des AI (vent de sable) + Relief/pente
- Identifier les zones de passage récurrent entre les chaînes de montagnes (vallées, passes)

#### **4.2.4 Carte finale :**

- Zones en marron foncé = haute densité d'aérosols (fort passage de vent)
- Zones marron clair = abritées (protection par montagne)

#### **4.2.5 Interprétation des résultats :**

- Pour l'indice de l'aérosols  $AOD > 0.5$  : présence élevée d'aérosols absorbants (poussière saharienne)

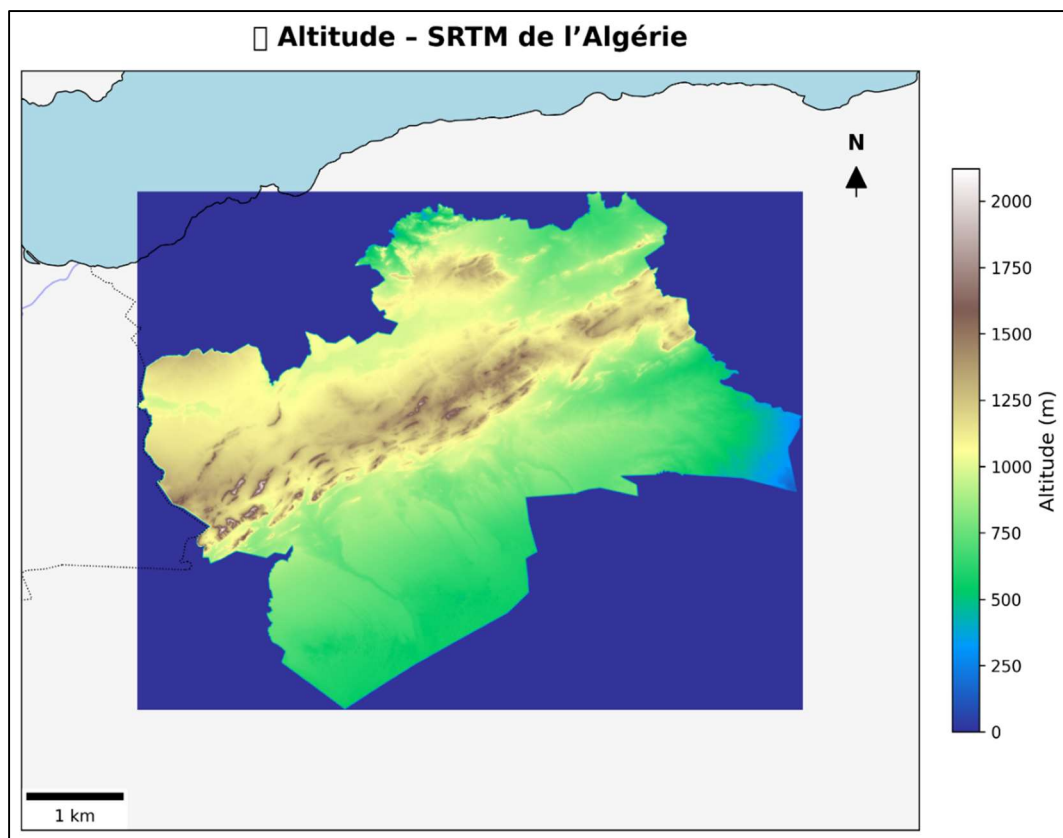


Figure 58: Topographie des Wilayas de la zone d'étude de gauche à droite Naama Elbayadh Lghouate Tiaret et Djelfa

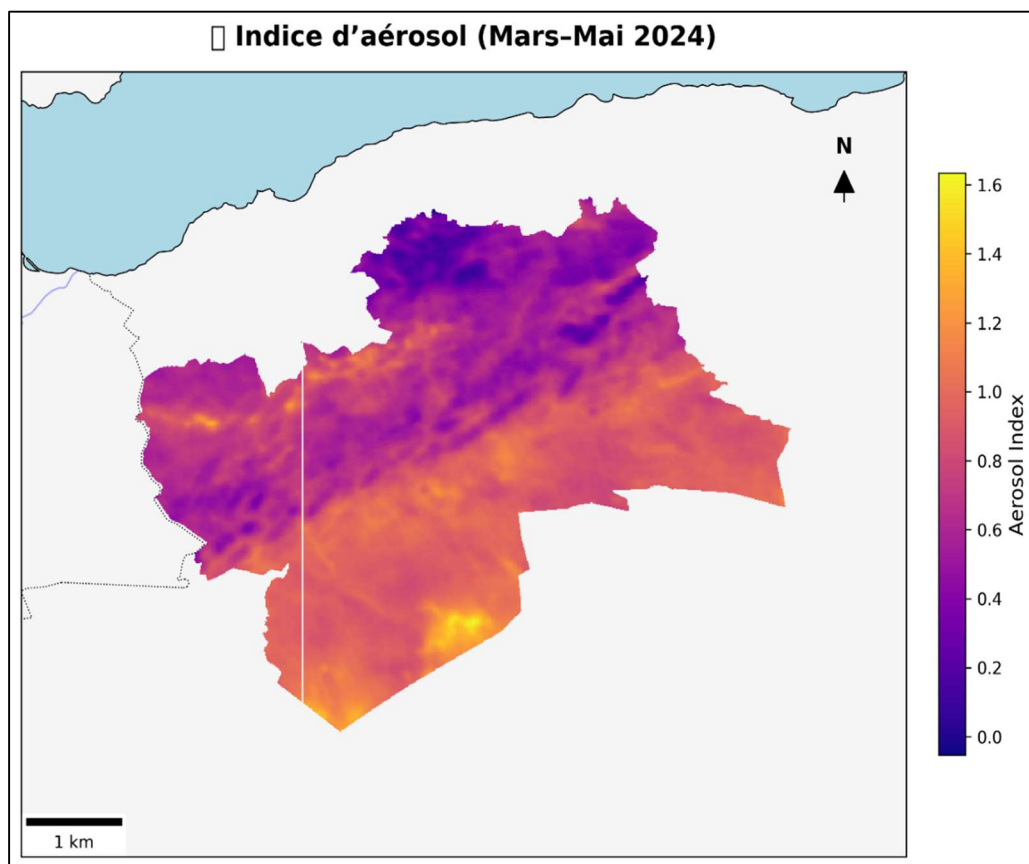


Figure 59: Aérosol des Wilayas de la zone d'étude de gauche à droite Naama Elbayadh Lghouate Tiaret et Djelfa

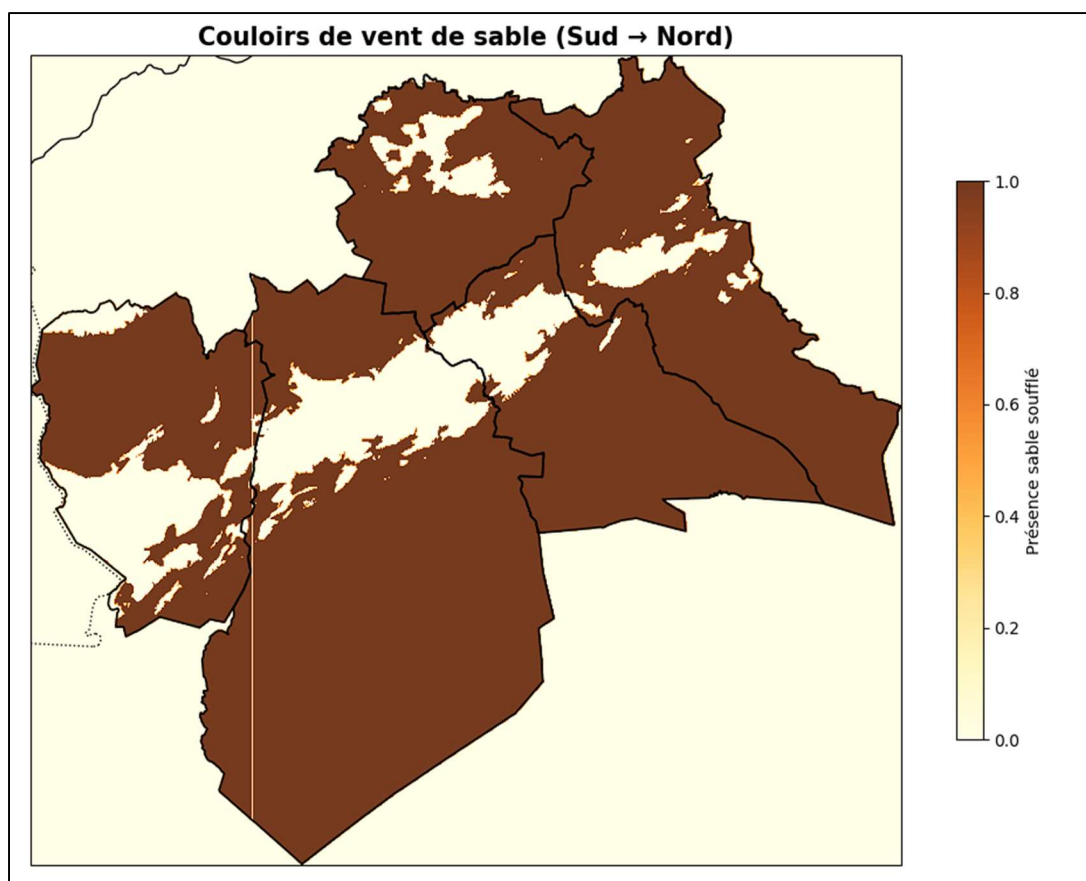


Figure 60: Couloire de vent de sable dans les Wilayas de la zone d'étude de gauche à droite Naama El-Bayadh Laghouat Tiaret et Djelfa

### 4.3 Analyse :

Pour les couloirs de vents de sable la carte montre la présence dominante de couloirs de sable dans plusieurs zones. Ces couloirs suivent une trajectoire du Sud vers le Nord, ce qui correspond aux dynamiques climatiques régionales (vents sahariens).

Selon ta carte, les zones il y a deux couloirs principaux :

- Entre les deux wilaya Djelfa et Laghouat exactement les communes Tadmit, Douis, El-Idrissia de Djelfa et Beida de Laghouat.
- Entre les deux wilayas de Naama et d'El Bayadh exactement les communes Boussemmghoun, Chellala, Bougtoub de Elbayadh et Assela, Elbioud de Naama.

**NB :** L'analyse climatique a mis en évidence une baisse progressive des précipitations annuelles dans les wilayas de Djelfa, Naâma et El Bayadh, couplée à une augmentation des températures estivales. L'interpolation des données a permis de localiser des zones où la pression climatique sur les écosystèmes est particulièrement élevée, en cohérence avec les zones détectées à risque par l'indice DSI.

## 5 Sortie de terrain reconnaissance sur l'axe Sougueur – Aflou

Dans le cadre de notre projet de fin d'études consacré à l'analyse de la désertification dans les zones steppiques de l'ouest de l'Algérie, une sortie de terrain a été effectuée entre la commune de d'Aflou (wilaya de Laghouat) et la commune Sougueur (wilaya de Tiaret).

L'objectif principal de cette reconnaissance était de confronter nos analyses spatiales issues des données satellitaires (NDVI, AOD, DSI, etc.) avec la réalité du terrain. Ce parcours, d'une centaine de kilomètres,

traverse plusieurs zones caractéristiques de la steppe algérienne, connues pour leur vulnérabilité accrue à la désertification.

### **5.1 Méthodologie de la reconnaissance**

Tout au long de l'itinéraire, des arrêts ont été planifiés tous les 5 à 10 km afin de photographier et documenter visuellement la nature du terrain. Pour chaque arrêt, nous avons pris en compte :

- La nature du sol (sableux, rocheux, dénudé, etc.)
- La couverture végétale apparente (présence ou absence de steppe, arbustes, plantations)
- Les signes visibles de dégradation des terres (érosion, ravinement, sols nus, etc.)

### **5.2 Observation marquante sur le terrain**

De manière fortuite, nous avons croisé une équipe de la Direction Générale des Forêts (DGF) en pleine action de plantation d'arbres dans une zone particulièrement dégradée. Cette initiative s'inscrit dans le cadre de la lutte contre la désertification et de la restauration des écosystèmes steppiques, objectif partagé par notre propre démarche scientifique.

Cet exemple concret de reboisement montre l'importance de croiser les données scientifiques avec les actions concrètes sur le terrain. Il renforce également la pertinence de notre étude, qui vise à identifier les zones prioritaires nécessitant une intervention écologique. Voir annexe

## **6 Conclusion**

Cette étude a mis en évidence la complexité des mécanismes de désertification dans les régions steppiques algériennes. Grâce à une approche intégrée combinant télédétection, SIG et analyse spatiale multicritère (DSI), il a été possible d'identifier les zones les plus sensibles. Les résultats obtenus confirment l'importance du climat et de la végétation dans la dynamique de dégradation des terres, tout en soulignant le rôle protecteur de certains reliefs.

Face à l'urgence environnementale, il est impératif de passer à l'action, en mettant en œuvre des programmes de gestion durable fondés sur des données fiables, une connaissance fine du territoire et une implication forte des acteurs locaux.

# V.CONCLUSION, RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

## 1 Conclusion générale :

La désertification constitue aujourd'hui l'un des défis environnementaux les plus préoccupants à l'échelle mondiale. Ce processus complexe, souvent silencieux mais aux effets dévastateurs, affecte profondément les écosystèmes, les ressources en eau, les terres agricoles et les conditions de vie des populations, notamment dans les régions arides et semi-arides comme les Hauts Plateaux algériens.

Dans ce mémoire, nous avons mobilisé les outils de la géomatique, en particulier la télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG), afin de cartographier, analyser et mieux comprendre les dynamiques de la désertification dans plusieurs wilayas du centre-ouest de l'Algérie (Djelfa, Laghouat, Tiaret, El Bayadh et Naâma). L'approche a permis de combiner divers indicateurs environnementaux (NDVI, précipitations, évapotranspiration, texture du sol, population, etc.) pour produire des cartes de sensibilité à la désertification (DSI), des couloirs de vents de sable et des zones à risque.

Parallèlement, une étude climatologique approfondie a permis de contextualiser les pressions atmosphériques et météorologiques agissant sur la dynamique du couvert végétal, la mobilité des aérosols, ainsi que la fréquence des tempêtes de sable. Ces éléments sont cruciaux, car ils montrent que la désertification n'est pas uniquement un phénomène local, mais un problème transfrontalier et transcontinental. Les particules désertiques, transportées par les vents (notamment sahariens), peuvent traverser des milliers de kilomètres, affectant des régions éloignées, jusqu'en Europe, en Amérique latine ou en Asie.

Face à ces constats, la lutte contre la désertification ne peut reposer uniquement sur des actions nationales. Elle nécessite une coopération internationale renforcée, notamment dans les domaines du transfert de technologie, du partage d'expertise et de la surveillance environnementale par satellite. La Chine, par exemple, a développé des stratégies avancées de reboisement, de stabilisation des dunes et de gestion durable des terres qui pourraient être une source d'inspiration majeure pour les pays du Maghreb, y compris l'Algérie. Il est essentiel de favoriser des partenariats techniques et scientifiques avec des pays ayant une expérience réussie dans la lutte contre la désertification, afin d'enrichir les approches locales et de mutualiser les efforts.

L'étude a permis de dresser un diagnostic spatial de la sensibilité à la désertification dans les wilayas steppiques algériennes, notamment Djelfa, Laghouat, El Bayadh, Naâma et Tiaret. En combinant plusieurs indicateurs environnementaux (NDVI, précipitations, évapotranspiration, texture du sol et densité de population), nous avons pu générer le Désertification Sensitivity Index (DSI) et identifier les zones les plus exposées.

### Niveau de sensibilité par wilaya :

- Djelfa : forte vulnérabilité dans le centre et le sud de la wilaya, dominée par des sols sableux et une couverture végétale très faible.
- Laghouat : sensibilité modérée dans les hautes plaines, mais zones critiques au sud de Hassi Delaâ et au nord de Aflou.
- El Bayadh : zones montagneuses relativement protégées (>1200 m), mais grande partie orientale très exposée au vent de sable.
- Naâma : vulnérabilité concentrée dans les couloirs de vent, surtout vers l'est et le nord.
- Tiaret : nord plus humide avec végétation modérée, mais le sud montre une tendance croissante à la désertification.

Les précipitations faibles combinées à une forte évapotranspiration expliquent une grande partie de la vulnérabilité. Les sols sableux aggravent cette situation, car ils retiennent mal l'eau et ne favorisent pas l'enracinement végétal.

### **Influence de la topographie :**

Les zones montagneuses (>1200 m), notamment dans les wilayas d'El Bayadh et de Laghouat, agissent comme obstacles naturels limitant l'avancée des vents de sable. Cependant, les hautes plaines ouvertes sont particulièrement sensibles au transport éolien de particules désertiques.

## **2 Recommandations spéciales pour la zone d'étude :**

- Implantation de ceintures vertes en bordure des zones agricoles exposées, comme l'intervention de BNEDER notamment autour de Tadmit et Beida, pour freiner l'avancée du sable.
- Promotion de techniques agricoles adaptées : culture en bandes, haies brise-vent, jachère contrôlée.
- Installation de filets anti-sable et barrières mécaniques dans les zones de couloir identifié (surtout à El Idrissia).
- Mise en place d'un système local de surveillance par drones ou stations météo automatiques pour mesurer la fréquence des vents de sable.
- Sensibilisation des agriculteurs locaux à l'entretien des sols et à la végétalisation (utilisation de plantes résistantes à la sécheresse, comme Elhalfa surtout après l'expérience réussie de culture de l'alfa par semis de graines dans la commune de Aïn Sekhouna wilaya de Saida.
- Surveillance du surpâturage : Lors de notre passage dans la région désertique de Brézina, située dans la wilaya d'El Bayadh, nous avons constaté une présence massive de populations nomades, accompagnées de milliers de têtes de bétail. Ces troupeaux exploitent intensivement les ressources végétales de la zone, contribuant ainsi à une pression excessive sur le couvert végétal. Celui-ci est pourtant constitué d'espèces végétales essentielles à la lutte contre la désertification, telles que *Aristida pungens* (appelée localement "Dherine") et l'alfa (*Stipa tenacissima*), deux graminées steppiques reconnues pour leur rôle dans la stabilisation des sols et la résilience des écosystèmes arides.

Nb : En Algérie exactement Il n'y a pas mieux de prendre l'exemple chinoise il faut en urgence l'établissement d'un Réseau Triangulé de Stations Météorologiques Équipées de Capteurs de Poussières Désertiques Fines pour pouvoir analyser les zones de crise qui nécessite une intervention rapide.

## **3 Perspectives :**

Ce travail, bien qu'exhaustif sur le plan de l'analyse spatiale de la désertification dans les wilayas steppiques de l'ouest algérien, constitue une base que des recherches futures pourraient consolider et enrichir. Plusieurs pistes peuvent ainsi être proposées pour prolonger et approfondir cette étude :

### **3.1 Amélioration temporelle des séries de données :**

Une des limites rencontrées concerne la disponibilité temporelle et la résolution de certaines données (NDVI, AOD, précipitations). Une future étude pourrait intégrer des séries temporelles plus longues (ex. 2000–2024), permettant une analyse de tendance plus robuste et la détection d'anomalies climatiques (sécheresses prolongées, pics de poussière, etc.).

### **3.2 Modélisation prédictive de la désertification :**

L'intégration de modèles d'apprentissage automatique (Machine Learning) avec les modèles climatiques pourrait permettre de prédire l'évolution de la sensibilité à la désertification en fonction des paramètres climatiques futurs ou des scénarios de gestion des terres.

### **3.3 Intégration de la composante socio-économique :**

Il serait pertinent d'élargir l'analyse en intégrant des données socio-économiques fines (densité de population, activités pastorales, pression foncière, infrastructures) pour croiser les vulnérabilités écologiques et humaines, et identifier les zones les plus critiques en termes d'impacts sur les populations locales.

### **3.4 Mise en œuvre d'un système d'alerte précoce :**

En exploitant les données satellitaires en quasi temps réel (MODIS, Sentinel-5P, CAMS), il serait possible de développer un système d'alerte précoce pour les tempêtes de sable ou les événements de sécheresse, à destination des agriculteurs et institutions locales. Ce système pourrait être piloté par une interface web interactive et alimenté automatiquement par Google Earth Engine et des capteurs météo locaux.

### **3.5 Analyse comparative avec d'autres régions arides du monde :**

Une perspective enrichissante serait de comparer les dynamiques de désertification observées dans le sud de l'Algérie avec d'autres zones arides comme le Sahel, le sud de la Chine ou le sud-ouest des États-Unis, afin d'identifier des modèles communs ou des solutions innovantes à adapter localement.

### **3.6 Création d'un observatoire national de la désertification :**

À long terme, les institutions algériennes pourraient mettre en place un observatoire de suivi spatio-temporel de la désertification, en collaboration avec les universités, centres de recherche et institutions internationales (FAO, UN, etc.). Ce centre pourrait centraliser les données, valider les indices, fournir des alertes, et orienter les politiques publiques.

## Références et Bibliographie

- [Online]. - <https://briques-de-geomatique.readthedocs.io/fr/latest/outils-teledetection.html#indices-monteverdi>.
- [Online]. - <https://www.quizlet.com>.
- [Online]. - <https://www.futura-sciences.com>.
- [Online]. - <https://briques-de-geomatique.readthedocs.io/fr/latest/outils-teledetection.html#indices-monteverdi>.
- Agency. European Space ESA Sentinel-5 Precursor/TROPOMI Level 2 Product User Manual – Nitrogen Dioxide. [Journal]. - 2020.
- al. Kaufman et MODIS Aerosol Algorithm [Journal]. - 2002.
- Barry R.G., & Chorley, R.J. Atmosphere, Weather and Climate. Routledge. [Journal]. - 2009.
- Basso F. et al. . Desertification Risk Assessment using High Resolution Data: A Case Study in Basilicata, Italy. Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere. [Journal]. - 2000.
- BRAHIM NEDJIMI BOUZID et GUIT Les steppes algériennes : causes de déséquilibre [Journal]. - [s.l.] : Algerian journal of aride environnement , 2012.
- Burrough P. A., & McDonnell, R. A. Principles of Geographical Information Systems. [Journal]. - [s.l.] : Oxford University Press, 1998.
- Change IPCC Climate The Physical Science Basis. [Article]. - 2021.
- Chiapello I. et al. Origins and pathways of mineral dust in the Mediterranean. Journal of Geophysical Research. [Journal]. - 2005 .
- Chudnovsky A. A., Kostinski, A., Koutrakis, P., & Kloog, I. Spatial and temporal variability in PM2.5 using satellite AOD and ground measurements [Journal]. - 2009.
- Chuvieco Emilio Fundamentals of Satellite Remote Sensing: An Environmental Approach, second edition [Journal]. - [s.l.] : International Journal of applied Earth Observation and Geoinformation, 2016.
- Farr T. G., et al. [Journal]. - 2007.
- Fensholt R., Rasmussen, K., Kaspersen, P. S., Huber, S., Horion, S., & Swinnen, E. Assessing land degradation/recovery in the African Sahel from long-term earth observation based primary productivity and precipitation relationships. Remote Sensing, 5(2), 664–686 [Journal]. - 2013. - <https://doi.org/10.3390/rs5020664>.
- Ginoux P., Prospero, J.M., Gill, T.E., Hsu, N.C., & Zhao, M. Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol data. Geophysical Research Letters, 28(6), 1043–1046 [Journal]. - 2012.
- Gorelick N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, 202, 18–27. [Journal]. - 2017. - <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.
- Goudie A. . Great Warm Deserts of the World: Landscapes and Evolution. [Journal]. - [s.l.] : Oxford University Press, 2002.

Hadley G. [Journal].

Informations météorologiques en temps réel [Online]. - <https://fr.allmetsat.com>.

Kosmas C., Kirkby, M., & Geeson, N. The Medalus Project: Mediterranean Desertification and Land Use. European Commission, DG XII. [Journal]. - 1999.

Kouba Ahmed Alliouche et Yacine Modelling the spatiotemporal dynamics of land susceptibility to desertification in Algeria [Report]. - 2023.

Kröpelin S. et al. Climate-driven ecosystem succession in the Sahara. [Journal]. - 2008.

Lancaster N. Geomorphology of Desert Dunes. Routledge.. - 1995.

Lillesand T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. Remote Sensing and Image Interpretation (7th ed.). Wiley. [Journal]. - 2015.

Longley P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. Geographic Information Systems and Science (3rd ed.). Wiley. [Book]. - 2011.

McKinney W. Data Structures for Statistical Computing in Python. Proceedings of the 9th Python in Science Conference, 51–56 [Journal]. - 2010. - <https://doi.org/10.25080/Majora-92bf1922-00a>.

Middleton N. J. & Goudie, A. S. Dust Storms in the Sahara: Frequency and trends from satellite data [Journal]. - 2001.

ONU [Online]. - <https://www.unep.org/fr/actualites-et-recits/recit/sept-facons-de-restaurer-les-terres-denrayer-la-desertification-et-de>.

OSS UNCCD / Cartographie de la dynamique éolienne et de la désertification dans le Maghreb. [Journal]. - 2016.

Pr Mederbal K. et al. Mapping Desertification in Algerian Steppes Using NDVI and Rainfall Data [Journal]. - [s.l.] : Journal of Arid Environments, 2017.

Prospero J.M. Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust. Journal of Geophysical Research. [Journal]. - 2002.

Prospero J.M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S.E., & Gill, T.E. Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. Reviews of Geophysics, 40(1), 1-31 [Journal]. - 2002.

Pye K., & Tsoar, H. Aeolian Sand and Sand Dunes. Springer.. - 2009.

Sabins F.F Remote Sensing: Principles and Interpretation. 3rd Edition, W. H. Freeman and Company, New York, 494 p. [Journal]. - 1996.

Seinfeld J. H., & Pandis, S. N. Atmospheric Chemistry and Physics. Wiley. [Journal]. - 2016.

Seznec A. Climats et vents en Afrique du Nord : étude géographique. Étude classique des vents régionaux nord-africains : Chergui, Khamsin, Ghibli. [Journal]. - 1991.

Shear Organisation Météorologique Mondiale Manual on Low-Level Wind Classifie les vents régionaux pour les pilotes, inclut les vents de type Sirocco et Khamsin. [Journal]. - 2010.

Slimane Nedjraoui Dalila et Bédrani La désertification dans les steppes algériennes : causes, impacts et actions de lutte [Journal]. - [s.l.] : <https://doi.org/10.4000/vertigo.5375>, 2008.

WHO Global Air Quality Guidelines [Journal]. - 2021.

**Annexes :**

**A. Photos de sortie de terrain le 26/10/2025 : du Aflou Vers Sougueur :**



Image 1



Image 2



Image 3



Image 4



Image 5

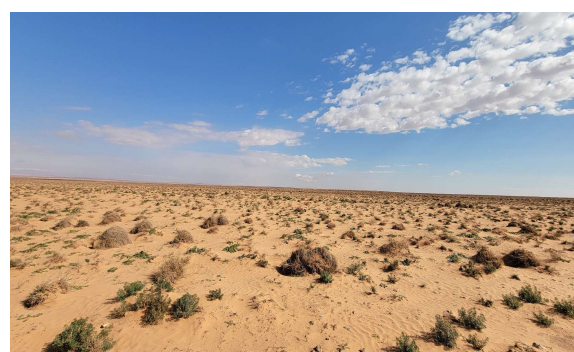


Image 6



Image 7



Image 8



Image 9



Image 10



Image 11



Image 12



Image 13

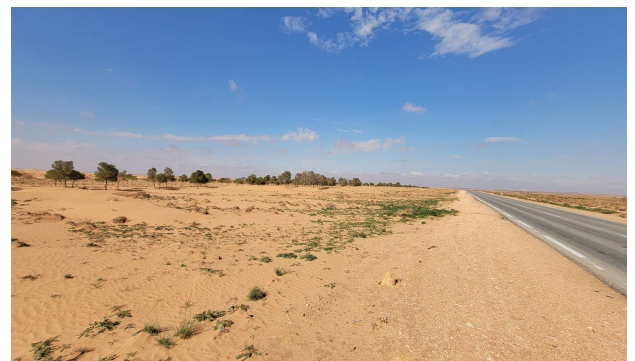


Image 14



Image 15



Image 16



Image 17



Image 18



Image 19



Image 20



Image 21



Image 22



Image 23



Image 24



Image 25



Image 26



Image 27



Image 28



Image 29



Image 30



Image 31



Image 32



Image 33



Image 35



Image 34

## **B. Recommandations générales contre désertification par l'ONU :**

Selon l'United Nations Environment Programme : il y a six façons de restaurer les terres, d'enrayer la désertification et de lutter contre la sécheresse (ONU)

### **➤ Rendre l'agriculture durable :**

À travers le monde, au moins 2 milliards de personnes, en particulier dans les zones rurales et les régions les plus pauvres, dépendent de l'agriculture pour leur subsistance. Cependant, nos systèmes alimentaires actuels ne sont pas viables et constituent l'un des principaux moteurs de la dégradation des sols. Nous pouvons faire beaucoup pour y remédier. Les gouvernements et le secteur financier peuvent promouvoir une agriculture régénératrice afin d'augmenter la production alimentaire tout en préservant les écosystèmes.

À l'heure actuelle, les producteurs agricoles reçoivent chaque année 540 milliards de dollars d'aides financières de la part des pays. Environ 87 % de ces subventions faussent les prix ou nuisent à la nature et à la santé humaine. Dans cette optique, les gouvernements pourraient réorienter les subventions agricoles vers des pratiques durables et les petits exploitants.

Les entreprises agricoles peuvent développer des cultures résistantes au climat, exploiter les connaissances autochtones pour mettre au point des méthodes agricoles durables et mieux gérer l'utilisation des pesticides et des engrais afin d'éviter de nuire à la santé des sols. Les consommateurs peuvent adopter des régimes alimentaires régionaux, saisonniers et riches en plantes, et inclure dans leurs repas davantage d'aliments respectueux des sols, tels que les haricots, les lentilles, les pois chiches et les pois.

### **➤ Sauver les sols :**

Les sols sont bien plus que la terre sous nos pieds. C'est l'habitat le plus riche en biodiversité de la planète. Près de 60 % de toutes les espèces vivent dans le sol et 95 % des aliments que nous consommons sont produits à partir du sol. Un sol sain agit comme un puits de carbone, retenant les gaz à effet de serre qui, autrement, entreraient dans l'atmosphère, jouant ainsi un rôle essentiel dans l'atténuation du changement climatique.

Pour que les sols restent sains et productifs, les gouvernements et le secteur financier peuvent soutenir l'agriculture biologique et l'agriculture respectueuse des sols. Les entreprises agricoles peuvent pratiquer le zéro labour, une technique qui consiste à cultiver sans perturber le sol par le labourage afin de maintenir une couverture organique du sol. Du compost et des matières organiques peuvent être ajoutés au sol pour en améliorer la fertilité. Des techniques d'irrigation, telles que l'irrigation au goutte-à-goutte ou le paillage, peuvent être utilisées pour maintenir le niveau d'humidité du sol et prévenir le stress dû à la sécheresse. Les particuliers peuvent fabriquer du compost à partir des restes de fruits et de légumes et l'utiliser dans leurs jardins et dans les pots de fleurs des balcons.

### **➤ Protéger les pollinisateurs :**

Trois cultures sur quatre produisant des fruits et des graines dépendent des pollinisateurs. Les abeilles sont les pollinisateurs les plus prolifiques, mais elles sont très aidées par les chauves-souris, les insectes, les papillons, les oiseaux et les coléoptères. En fait, sans les chauves-souris, nous pouvons dire adieu aux bananes, aux avocats et aux mangues. Malgré leur importance, tous les pollinisateurs sont en grave déclin, en particulier les abeilles.

Trois cultures sur quatre produisant des fruits et des graines dépendent des pollinisateurs. Les abeilles sont les pollinisateurs les plus prolifiques, mais elles sont très aidées par les chauves-souris, les insectes, les papillons, les oiseaux et les coléoptères. En fait, sans les chauves-souris, nous pouvons dire adieu

aux bananes, aux avocats et aux mangues. Malgré leur importance, tous les pollinisateurs sont en grave déclin, en particulier les abeilles.

➤ **Restaurer les écosystèmes d'eau douce :**

Les écosystèmes d'eau douce entretiennent les cycles de l'eau qui assurent la fertilité des terres. Ils fournissent de la nourriture et de l'eau à des milliards de personnes, nous protègent des sécheresses et des inondations et constituent un habitat pour d'innombrables plantes et animaux. Pourtant, ils disparaissent à un rythme alarmant en raison de la pollution, du changement climatique, de la surpêche et de la surexploitation.

Les citoyens peuvent mettre un terme à cette situation en améliorant la qualité de l'eau, en identifiant les sources de pollution et en surveillant la santé des écosystèmes d'eau douce. Les pays peuvent relever le défi de l'eau douce pour accélérer la restauration des rivières et des zones humides dégradées d'ici à 2030. Les espèces envahissantes pourraient être éliminées des habitats d'eau douce dégradés et la végétation indigène pourrait être replantée. Les villes pourraient se faire les championnes de l'innovation en matière d'eaux usées, en s'attaquant à la gestion des eaux usées, au ruissellement des eaux pluviales et aux inondations urbaines.

➤ **Réintroduire la nature dans les villes :**

Plus de la moitié de la population mondiale vit dans des villes. D'ici 2050, on prévoit que deux personnes sur trois vivront dans un centre urbain. Les villes consomment 75 % des ressources de la planète, produisent plus de la moitié des déchets et génèrent au moins 60 % des émissions de gaz à effet de serre. Lorsqu'elles s'étendent, les villes transforment le monde naturel qui les entoure, ce qui peut entraîner des sécheresses et la dégradation des sols.

Mais les villes ne sont pas nécessairement être des jungles de béton. Les forêts urbaines peuvent améliorer la qualité de l'air, fournir plus d'ombre et réduire le besoin de refroidissement mécanique. La préservation des canaux, étangs et autres plans d'eau des villes peut atténuer les vagues de chaleur et accroître la biodiversité. L'installation d'un plus grand nombre de toits et de jardins verticaux dans nos bâtiments peut constituer un habitat pour les oiseaux, les insectes et les plantes.

➤ **Générer des financements pour la restauration :**

Les investissements dans les solutions fondées sur la nature doivent plus que doubler pour atteindre 542 milliards de dollars d'ici à 2030 afin de réaliser les objectifs mondiaux en matière de climat, de biodiversité et de restauration des écosystèmes.

Pour combler le déficit de financement existant, les gouvernements pourraient investir dans des systèmes d'alerte précoce afin de prévenir les pires conséquences de la sécheresse, et financer des activités de restauration des terres et des solutions basées sur la nature. Le secteur privé pourrait intégrer la restauration des écosystèmes dans ses modèles d'entreprise, mettre en œuvre des pratiques efficaces de gestion des déchets et investir dans des entreprises sociales axées sur l'agriculture durable, l'écotourisme et les technologies vertes.

Les particuliers peuvent transférer leurs comptes bancaires vers des instituts de financement qui investissent dans des entreprises durables, faire des dons pour la restauration ou faire du crowd-funding pour des innovations qui peuvent aider à sauver la planète.

## TABLE DES MATIERES :

|                                                                                                      |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| REMERCIEMENTS .....                                                                                  | 1         |
| DEDICACES.....                                                                                       | 2         |
| Résumé .....                                                                                         | 4         |
| ملخص .....                                                                                           | 5         |
| <b>Abstract</b> .....                                                                                | 6         |
| Sommaire .....                                                                                       | 7         |
| Table des illustrations .....                                                                        | 9         |
| Liste des figures.....                                                                               | 9         |
| Liste des tableaux. ....                                                                             | 10        |
| Liste des Acronymes .....                                                                            | 12        |
| Introduction générale :.....                                                                         | 13        |
| <b>CHAPITRE I : SIG, TELEDETECTION ET INDICES ENVIRONNEMENTAUX.....</b>                              | <b>15</b> |
| 1    Introduction : .....                                                                            | 15        |
| 2    Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) : .....                                           | 15        |
| 2.1    Définition et origine des SIG .....                                                           | 15        |
| 2.2    Composantes d'un SIG .....                                                                    | 16        |
| 2.3    Fonctionnalités principales des SIG.....                                                      | 16        |
| 2.4    Types de données utilisées dans les SIG : .....                                               | 17        |
| 2.5    SIG et prise de décision environnementale : .....                                             | 17        |
| 2.6    Avantages et limites des SIG.....                                                             | 17        |
| 2.6.1    Avantages : .....                                                                           | 17        |
| 2.6.2    Limites : .....                                                                             | 17        |
| 2.7    Les données thématiques nécessaires pour une étude et analyse SIG : .....                     | 18        |
| 3    La Télédétection .....                                                                          | 18        |
| 3.1    Définition et principes.....                                                                  | 18        |
| 3.2    Types de capteurs et plateformes .....                                                        | 19        |
| 3.3    Produits et applications .....                                                                | 19        |
| 3.4    Limites et complémentarité avec les SIG.....                                                  | 20        |
| 3.5    Sources de données satellitaires et atmosphériques : .....                                    | 20        |
| 3.6    Différence entre les satellites d'observation et les modèles de réanalyse : .....             | 20        |
| 3.7    Tableau global des satellites et modèles utilisés en télédétection multidisciplinaire : ..... | 21        |
| 3.8    Modèles et réanalyses .....                                                                   | 23        |
| 3.9    Indices en télédétection : .....                                                              | 23        |
| 3.9.1    NDVI (Normalized Difference Vegetation Index):.....                                         | 23        |
| 3.9.2    NDWI (Normalized Difference Water Index): .....                                             | 24        |
| 3.9.3    NDBI (Normalized Difference Built-up Index):.....                                           | 24        |

|       |                                                                                                                                    |           |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.9.4 | AOD (Aerosol Optical Depth) :.....                                                                                                 | 24        |
| 3.10  | Les principaux indices en télédétection .....                                                                                      | 24        |
| 4     | Utilisation des outils numériques pour l'analyse géospatiale :.....                                                                | 26        |
| 4.1   | Google Earth Engine (GEE) .....                                                                                                    | 26        |
| 4.1.1 | Présentation générale.....                                                                                                         | 26        |
| 4.1.2 | Utilité dans ce PFE .....                                                                                                          | 27        |
| 4.2   | Jupyter Notebook .....                                                                                                             | 27        |
| 4.2.1 | Présentation .....                                                                                                                 | 27        |
| 4.2.2 | Utilité dans ce PFE .....                                                                                                          | 27        |
| 4.3   | Python et ses bibliothèques géospatiales .....                                                                                     | 28        |
| 4.4   | Perplexity AI : .....                                                                                                              | 28        |
| 4.5   | ArcGIS et QGIS : .....                                                                                                             | 28        |
| 5     | Conclusion : .....                                                                                                                 | 29        |
|       | <b>CHAPITRE II : DESERTIFICATION, VENTS DE SABLE, AEROSOLS .....</b>                                                               | <b>30</b> |
| 1     | Introduction .....                                                                                                                 | 30        |
| 2     | La désertification.....                                                                                                            | 30        |
| 2.1   | Définition du désert.....                                                                                                          | 30        |
| 2.2   | La désertification en Algérie .....                                                                                                | 30        |
| 2.3   | Comment les scientifiques expliquent la formation des déserts ?.....                                                               | 31        |
| 2.3.1 | Facteurs naturels (modèles climatiques et géographiques).....                                                                      | 31        |
| 2.3.2 | Facteurs anthropiques (modèles de dégradation des terres) (Basso, 2000) .....                                                      | 32        |
| 2.4   | Les grands types de déserts : .....                                                                                                | 33        |
| 2.4.1 | Selon leur origine climatique : .....                                                                                              | 33        |
| 2.4.2 | Selon la température .....                                                                                                         | 34        |
| 2.4.3 | Types de déserts selon la couverture du sol (formes morphologiques) : .....                                                        | 35        |
| 2.5   | Types de dunes (formes principales) : .....                                                                                        | 36        |
| 2.6   | Formation des dunes (processus éolien) .....                                                                                       | 37        |
| 2.7   | La désertification en Algérie .....                                                                                                | 38        |
| 2.8   | La zone steppique .....                                                                                                            | 38        |
| 2.8.1 | Présentation des régions steppiques.....                                                                                           | 38        |
| 3     | Les vents : .....                                                                                                                  | 39        |
| 3.1   | Les principaux types de vents en Afrique du Nord : Références (Shear, 2010) (Middleton, 2001) (Kröpelin, 2008) (Seznec, 1991)..... | 39        |
| 4     | Les Aérosols Atmosphériques et leur Impact sur la Désertification en Algérie .....                                                 | 41        |
| 4.1   | Définition des aérosols.....                                                                                                       | 41        |
| 4.2   | Impact climatique et environnemental .....                                                                                         | 41        |
| 4.3   | Types de particules « PM10 et PM2.5 » .....                                                                                        | 42        |
| 4.4   | Observation des aérosols par télédétection .....                                                                                   | 42        |

|                                                                            |                                                                                                             |    |
|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.5                                                                        | Différentes longueurs d'onde (AOD) et comparaison avec PM .....                                             | 42 |
| 4.6                                                                        | Couloirs de vent de sable : .....                                                                           | 43 |
| 5                                                                          | Modélisation SRTM .....                                                                                     | 44 |
| 5.1                                                                        | Définition : .....                                                                                          | 44 |
| 5.2                                                                        | Caractéristiques des données SRTM.....                                                                      | 44 |
| 5.3                                                                        | Types de cartes obtenues à partir du SRTM :.....                                                            | 44 |
| 5.4                                                                        | Rôle des montagnes dans le blocage des vents .....                                                          | 44 |
| 6                                                                          | Conclusion.....                                                                                             | 45 |
| <b>CHAPITRE III : METHODOLOGIE ET ETUDE CLIMATIQUE SUR LA ZONE D'ETUDE</b> |                                                                                                             |    |
| .....                                                                      |                                                                                                             | 46 |
| 1                                                                          | Introduction .....                                                                                          | 46 |
| 2                                                                          | Présentation la zone d'étude.....                                                                           | 46 |
| 2.1                                                                        | Climat.....                                                                                                 | 47 |
| 2.2                                                                        | Population et activités économiques .....                                                                   | 47 |
| 3                                                                          | L'évolution de la couverture végétale dans la zone d'étude à l'aide des données Satellitaires Landsat ..... | 48 |
| 3.1                                                                        | Données et méthodologie.....                                                                                | 48 |
| 3.2                                                                        | Résultats .....                                                                                             | 48 |
| 3.2.1                                                                      | Végétation et couverture du sol (zones rouges).....                                                         | 48 |
| 4                                                                          | Changements dans l'occupation des sols .....                                                                | 49 |
| 4.1                                                                        | La carte d'occupation de sol .....                                                                          | 49 |
| 4.1.1                                                                      | Données et méthodologie .....                                                                               | 49 |
| 5                                                                          | Facteurs physiques et climatiques de la désertification :.....                                              | 53 |
| 5.1                                                                        | Altitude (La carte hypsométrique) : .....                                                                   | 53 |
| 5.1.1                                                                      | Données et méthodologie : .....                                                                             | 53 |
| 5.1.2                                                                      | Résultats.....                                                                                              | 54 |
| 5.1.3                                                                      | Analyse .....                                                                                               | 54 |
| 6                                                                          | La pente (carte de pente) .....                                                                             | 55 |
| 6.1                                                                        | Données et méthodologie.....                                                                                | 55 |
| 6.2                                                                        | Résultats .....                                                                                             | 55 |
| 6.3                                                                        | Analyse .....                                                                                               | 56 |
| 7                                                                          | Les précipitations .....                                                                                    | 56 |
| 7.1                                                                        | Donné et méthodologie : .....                                                                               | 57 |
| 7.2                                                                        | le résultat.....                                                                                            | 57 |
| 7.3                                                                        | Analyse .....                                                                                               | 58 |
| 7.4                                                                        | Les précipitations mensuelles des willayas de la zone d'étude.....                                          | 58 |
| 7.4.1                                                                      | Source des données : .....                                                                                  | 59 |
| 8                                                                          | Température moyenne annuelle de l'air en surface dans la zone d'étude .....                                 | 62 |

|                                                                                           |                                                                                                                                                              |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 8.1                                                                                       | Données utilisées .....                                                                                                                                      | 62        |
| 8.1.1                                                                                     | Analyse de La température moyenne de l'air en surface (annuelle) dans la willaya de Laghouat (1981-2023).....                                                | 63        |
| 8.1.2                                                                                     | Analyse de La température moyenne de l'air en surface (annuelle) dans la willaya El Baydh (1981-2023).....                                                   | 64        |
| 8.1.3                                                                                     | Analyse de La température moyenne de l'air en surface (annuelle) dans la willaya de Djelfa (1981-2023).....                                                  | 65        |
| 8.1.4                                                                                     | Analyse de La température moyenne de l'air en surface (annuelle) dans la willaya de Naama (1981-2023).....                                                   | 66        |
| 8.1.5                                                                                     | Analyse de La température moyenne de l'air en surface (annuelle) dans la willaya de Tiaret (1981-2023).....                                                  | 67        |
| 9                                                                                         | L'humidité de surface du sol de la zone d'étude .....                                                                                                        | 67        |
| 9.1                                                                                       | Source des données : GMAO MERRA -2 Data accessed from Nasa Power .....                                                                                       | 68        |
| 9.1.1                                                                                     | Méthodologies .....                                                                                                                                          | 68        |
| 9.1.2                                                                                     | Résultat :.....                                                                                                                                              | 68        |
| 9.1.3                                                                                     | 3.Analyse .....                                                                                                                                              | 69        |
| 9.1.4                                                                                     | Interprétation environnementale :.....                                                                                                                       | 69        |
| 10                                                                                        | La relation entre la précipitation et la température de l'air en surface et l'humidité de surface du sol dans l'étude de la désertification (1981-2024)..... | 70        |
| 10.1                                                                                      | Température .....                                                                                                                                            | 70        |
| 10.2                                                                                      | Précipitations.....                                                                                                                                          | 70        |
| 10.3                                                                                      | Humidité du sol en surface.....                                                                                                                              | 70        |
| 11                                                                                        | Indice d'Aridité Global .....                                                                                                                                | 70        |
| 11.1                                                                                      | La carte de la zone aride .....                                                                                                                              | 71        |
| 11.1.1                                                                                    | Données et Méthodologie.....                                                                                                                                 | 71        |
| 12                                                                                        | La vitesse et la direction des vents dans la zone d'étude.....                                                                                               | 73        |
| 12.1                                                                                      | Les données et la méthodologie utilisées .....                                                                                                               | 73        |
| 12.1.1                                                                                    | Les données .....                                                                                                                                            | 73        |
| 12.1.2                                                                                    | La méthodologie.....                                                                                                                                         | 74        |
| 12.1.3                                                                                    | Résultat d'analyse spatiale et climatique :.....                                                                                                             | 75        |
| 13                                                                                        | Conclusion :.....                                                                                                                                            | 76        |
| <b>CHAPITRE VI : ANALYSE SPATIO-TEMPORELLE VENTS DE SABLE, TOPOGRAPHIE, COULOIRS.....</b> |                                                                                                                                                              | <b>77</b> |
| 1                                                                                         | Introduction .....                                                                                                                                           | 77        |
| 2                                                                                         | Méthodologie générale .....                                                                                                                                  | 77        |
| 3                                                                                         | Travaux sur Aérosols.....                                                                                                                                    | 78        |
| 3.1                                                                                       | Objectif A :.....                                                                                                                                            | 78        |
| 3.1.1                                                                                     | Résultats : .....                                                                                                                                            | 78        |
| 3.2                                                                                       | Objectif B :.....                                                                                                                                            | 78        |

|       |                                                                                       |           |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.1 | Résultats :                                                                           | 79        |
| 3.3   | Objectif C :                                                                          | 79        |
| 3.3.1 | Résultats.....                                                                        | 79        |
| 3.4   | Mode opératoire du calcul de l'indice de sensibilité à la désertification (DSI) ..... | 81        |
| 3.4.1 | Rappel : Le Desertification Sensitivity Index (DSI) :.....                            | 81        |
| 3.4.2 | Sélection des indicateurs : .....                                                     | 82        |
| 3.4.3 | Calcul de l'indice DSI : .....                                                        | 82        |
| 3.5   | Analyse des résultats par wilaya : .....                                              | 82        |
| 3.5.1 | Wilaya Djelfa : .....                                                                 | 82        |
| 3.5.2 | Wilaya d'Elbayadh : .....                                                             | 84        |
| 3.5.3 | Wilaya de Laghouat : .....                                                            | 87        |
| 3.5.4 | Wilaya de Naama : .....                                                               | 89        |
| 3.5.5 | Wilaya de Tiaret.....                                                                 | 91        |
| 4     | Procédure de détection des couloirs de vent de sable.....                             | 93        |
| 4.1   | Outils nécessaires : .....                                                            | 93        |
| 4.2   | Étapes de la procédure complète : .....                                               | 93        |
| 4.2.1 | Analyse des vents sableux (aérosols) .....                                            | 93        |
| 4.2.2 | Analyse topographique et pente.....                                                   | 94        |
| 4.2.3 | Déduction des couloirs .....                                                          | 94        |
| 4.2.4 | Carte finale : .....                                                                  | 94        |
| 4.2.5 | Interprétation des résultats : .....                                                  | 94        |
| 4.3   | Analyse : .....                                                                       | 96        |
| 5     | Sortie de terrain reconnaissance sur l'axe Sougueur – Aflou .....                     | 96        |
| 5.1   | Méthodologie de la reconnaissance .....                                               | 97        |
| 5.2   | Observation marquante sur le terrain .....                                            | 97        |
| 6     | Conclusion.....                                                                       | 97        |
|       | <b>V. CONCLUSION, RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES .....</b>                           | <b>98</b> |
| 1     | Conclusion générale : .....                                                           | 98        |
|       | Niveau de sensibilité par wilaya : .....                                              | 98        |
|       | Influence de la topographie : .....                                                   | 99        |
| 2     | Recommandations spéciales pour la zone d'étude : .....                                | 99        |
| 3     | Perspectives : .....                                                                  | 99        |
| 3.1   | Amélioration temporelle des séries de données : .....                                 | 99        |
| 3.2   | Modélisation prédictive de la désertification : .....                                 | 99        |
| 3.3   | Intégration de la composante socio-économique : .....                                 | 100       |
| 3.4   | Mise en œuvre d'un système d'alerte précoce : .....                                   | 100       |
| 3.5   | Analyse comparative avec d'autres régions arides du monde : .....                     | 100       |

|     |                                                                   |     |
|-----|-------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.6 | Création d'un observatoire national de la désertification : ..... | 100 |
|     | Références et Bibliographie .....                                 | 101 |
|     | Annexes :.....                                                    | 103 |
|     | Photos de sortie de terrain : du Aflou Vers Sougueur : .....      | 103 |
|     | Recommandations générales contre désertification par l'ONU :..... | 108 |