

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد بوضياف - المسيلة

Université Mohamed Boudiaf - M'Sila

FACULTE SCIENCES

DEPARTEMENT DES SCIENCES
AGRONOMIQUES

N° :10 / DSA/VCDPGR/2025



DOMAINE : SCIENCES DE LA NATURE
ET DE LA VIE

FILIERE : SCIENCES AGRONOMIQUES

OPTION : PRODUCTION VEGETALE

Mémoire présenté pour l'obtention
du diplôme de Master Académique

Par : **MAYOUF Mohamed Ridha**

Intitulé

**Apport du SIG et de la télédétection dans le suivi de
l'évolution des zones de production agricole dans la
wilaya de M'Sila**

Soutenu devant le jury composé de:

Mme HOCEINI Faiza	MCA	Université Med BOUDIAF- M'SILA	Présidente
M. ABDELKEBIR Brahim	MCB	Université de Ghardaia	Promoteur
Mme. BEDDAL Dalila	MCB	Université Med BOUDIAF - M'SILA	Co-Promotrice
Melle MADANI Djamilia	MCB	Université Med BOUDIAF- M'SILA	Examinatrice

Année universitaire : 2024 /2025

Remerciements

Je souhaite tout d'abord exprimer ma profonde gratitude à Dieu Tout-Puissant, qui m'a accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail modeste.

Je tiens également à remercier chaleureusement Dr Abdelkebir Ibrahim, mon encadrant, pour son accompagnement bienveillant, ses explications claires et sa grande disponibilité. Il a été pour moi un véritable grand frère, dont le soutien m'a été précieux tout au long de ce travail.

J'adresse mes remerciements les plus sincères à mon co encadrant de mémoire, Dr BEDDAL Dalila, pour ses conseils judicieux, sa patience constante, son encadrement rigoureux et sa confiance inébranlable. Sa présence et ses conseils ont marqué mon parcours universitaire et personnel. Aucun mot ne saurait rendre justice à son dévouement et à sa générosité.

Mes remerciements vont également aux membres du jury Dr HOCEINI Faiza, présidente, et Dr MADANI Djamilia rapporteure, pour avoir accepté de consacrer leur temps précieux à l'évaluation de ce mémoire, et pour leurs remarques constructives.

Je ne saurais oublier les agents de la Direction des ressources en eau, du l'Office national de l'irrigation et du drainage, ainsi que ceux de la Direction des services agricoles de la wilaya de M'Sila, pour leur accueil, leur disponibilité et les informations essentielles qu'ils ont mises à notre disposition.

Enfin, je remercie du fond du cœur tous les enseignants qui ont contribué à ma formation, en particulier Melle MADANI, Melle TIR, Monsieur Chérif, Monsieur Hamdani, Monsieur Zeddami, et Monsieur Tallah , ainsi que l'ensemble du personnel administratif de la faculté des sciences agronomiques pour leur soutien et leur gentillesse.

À tous ceux qui m'ont soutenu par une parole, un geste, un conseil, ou une simple présence : merci infiniment.

Dédicace

À mes chers parents, qui ont toujours été à mes côtés, me soutenant inlassablement tout au long de ces longues années d'études. Leur présence, leurs sacrifices et leur amour inconditionnel ont été les piliers de ma réussite.

Ce travail n'est qu'un humble témoignage face à tout ce qu'ils m'ont offert durant ma vie. Merci du fond du cœur, et j'espère que cette réalisation saura exprimer, ne serait-ce qu'en partie, ma profonde gratitude.

À mon frère bien-aimé, véritable pilier de ma vie, un roc solide dans mon dos, dont la force et le soutien n'ont jamais failli. Je te remercie infiniment pour ta présence constante et ton amour fraternel.

À ma sœur chérie, l'étoile qui illumine mes jours, douce et rayonnante, source de réconfort et de joie. Merci d'être toujours là.

À mes deux petits trésors, les enfants de mon frère : **Raid et Mohamed Racim**, que Dieu vous protège et vous garde. Vous êtes la plus belle chose dans cette vie, des soleils qui réchauffent le cœur.

À ma chère grand-mère, dont les prières sincères ont toujours accompagné mes pas. Ta tendresse et ta sagesse sont des bénédictions inestimables.

Et à mes amis qui ont marqué mon parcours universitaire d'une empreinte inoubliable, À mon cher ami **Ben Aïssa Islam**, toujours présent avec sa gentillesse et sa noblesse, À mon compagnon de route pendant cinq ans, plus qu'un ami, un frère : **Mohoun Abderraouf Amine**, et **Loubi Ahmed À Yahiaoui Kamal** et **Anis**, lumières de l'âme durant nos années d'étude, Et à mes compagnons de la bibliothèque, **Omar** et **Amar**, avec qui j'ai partagé tant d'heures de travail et de persévérance, Recevez toute ma gratitude et mon affection pour chaque instant, chaque mot, chaque soutien sincère.

À toute ma famille, aux familles **MAYOUF** et **Ben Chouikh**, À mes amis fidèles, À tous ceux que je connais et qui me connaissent, À tous ceux qui ont été source de joie ou de soutien, par un mot, un geste, un sourire ou une prière... Merci infiniment.

Je n'oublie pas de rendre hommage, avec tout le respect et la piété, à mes grands-parents disparus : **Khaled, Mohamed et Fatima**, Que Dieu leur accorde Sa miséricorde et les accueille dans Son vaste paradis.

Et enfin, à tous ceux qui aiment le bien, À ceux qui affrontent les épreuves de la vie avec dignité, sans jamais perdre espoir... Je vous dédie ce travail avec tout mon respect et mon amour

Apport du SIG et de la télédétection dans le suivi de l'évolution des zones de production agricole dans la wilaya de M'Sila

Résumé

Cette étude vise à évaluer la dynamique spatio-temporelle de la sécheresse dans la wilaya de M'Sila à travers l'exploitation conjointe des données satellitaires (Landsat) et des outils SIG. L'analyse s'est appuyée sur des indices biophysiques tels que le NDVI, LST, VCI, TCI et VHI pour détecter l'évolution de la végétation et le stress hydrique entre 2000, 2010 et 2020. Les résultats ont montré une dégradation progressive de la couverture végétale et une élévation notable des températures de surface, notamment dans les zones steppiques et arides. La carte du VHI de l'année 2020 révèle une expansion du stress hydrique sévère couvrant près de la moitié de la superficie de la wilaya, ce qui indique une avancée significative du phénomène de désertification avec un taux estimé à environ 50 % de la zone étudiée. Cette tendance reflète l'effet conjugué du changement climatique et des pressions anthropiques (surpâturage, urbanisation).

Toutefois, l'application des SIG et de la télédétection en Algérie se heurte à plusieurs défis : résolution spatiale limitée des images pour les études locales, besoin crucial de données de terrain pour la validation, coûts élevés des données haute résolution et compétences techniques encore peu généralisées. Malgré ces contraintes, l'étude confirme l'efficacité de l'approche intégrée pour localiser les zones à restaurer en priorité et propose des pistes pour une gestion plus durable des ressources naturelles.

Mots clés : sécheresse, NDVI, télédétection, SIG, VHI, M'Sila, dégradation de la végétation, climat-semi-aride.

دور نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد في متابعة تطور المناطق الزراعية الإنتاجية في ولاية المسيلة

الملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم الديناميكية الزمانية والمكانية للجفاف في ولاية المسيلة من خلال الاستغلال المشترك لبيانات الأقمار الصناعية (Landsat) وأدوات نظم المعلومات الجغرافية (SIG) وقد استند التحليل إلى مؤشرات بيوفيزيائية مثل NDVI ، LST ، VCI ، TCI و VHI لرصد تطور الغطاء النباتي والإجهاد المائي خلال سنوات 2000، 2010، و2020. أظهرت النتائج وجود تدهور تدريجي في الغطاء النباتي وارتفاع ملحوظ في درجات حرارة سطح الأرض، خصوصاً في المناطق السهبية والجافة. كما كشفت خريطة مؤشر VHI لسنة 2020 عن توسع كبير في الإجهاد المائي الشديد، حيث شمل نحو نصف مساحة الولاية، مما يدل على تقدم واضح لظاهرة التصحر بنسبة تُقدَّر بحوالي 50٪ من المنطقة المدروسة. وتعكس هذه النتائج التأثير المشترك للتغير المناخي والضغوط البشرية (مثل الرعي الجائر والتوسع العمراني).

ومع ذلك، تواجه تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد في الجزائر عدة تحديات، من بينها محدودية الدقة المكانية للصور بالنسبة للدراسات المحلية، والحاجة الضرورية إلى بيانات ميدانية للتحقق من النتائج، وارتفاع تكلفة البيانات عالية الدقة، إضافة إلى قلة الكفاءات التقنية المتخصصة. وعلى الرغم من هذه القيود، تؤكد الدراسة فعالية النهج المتكامل في تحديد المناطق ذات الأولوية للترميم، وتقترح مسارات نحو إدارة أكثر استدامة للموارد الطبيعية.

الكلمات المفتاحية: الجفاف، NDVI، الاستشعار عن بعد، نظم المعلومات الجغرافية، VHI، المسيلة، تدهور الغطاء

النباتي، مناخ شبه جاف.

The contribution of GIS and remote sensing in monitoring the evolution of agricultural production areas in the wilaya of M'Sila

Abstract

This study aims to assess the spatio-temporal dynamics of drought in the M'Sila province through the combined use of satellite data (Landsat) and GIS tools. The analysis relied on biophysical indices such as NDVI, LST, VCI, TCI, and VHI to track vegetation changes and water stress during the years 2000, 2010, and 2020. The results revealed a gradual degradation of vegetation cover and a significant rise in surface temperatures, particularly in steppe and arid areas. The VHI map of 2020 highlights the expansion of severe water stress covering nearly half of the wilaya's area, indicating a substantial advancement of desertification, with an estimated rate of around 50% of the studied zone. This trend reflects the combined effect of climate change and anthropogenic pressures (overgrazing, urban expansion).

However, the application of GIS and remote sensing in Algeria faces several challenges, including limited spatial resolution of satellite images for detailed local analysis, the essential need for field data validation, high costs of high-resolution data, and a lack of widespread technical expertise. Despite these constraints, the study confirms the effectiveness of the integrated approach in identifying priority areas for restoration and offers pathways for more sustainable natural resource management.

Keywords: drought, NDVI, remote sensing, GIS, VHI, M'Sila, vegetation degradation, semi- arid climate.

Table des matières

Remerciements

Résumé

ملخص

Abstract

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Abréviations

Introduction générale

Chapitre I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Système d'information géographique.....	3
I.1.1 Définition.....	3
I.1.2 Historique du S.I.G.....	3
I.1.3 Composantes d'un SIG.....	3
I.1.4 Fonctions du SIG.....	4
I.1.5 Domaines d'application.....	5
I.1.6 Apport spécifique du SIG dans le domaine agricole.....	5
I.2 Télédétection.....	6
I.2.1 Définition.....	6
I.2.2 Éléments de la télédétection.....	6
I.2.3 Rayonnement électromagnétique.....	6
I.2.3.1 Définition.....	6
I.2.3.2 Caractéristiques.....	7
I.2.3.3 Spectre électromagnétique.....	7
I.2.4 Étapes de la télédétection.....	8
I.2.5 Applications de la télédétection.....	10
I.2.5.1 Apport spécifique de la télédétection dans le domaine agricole.....	10
I.2.6 Types de la télédétection.....	11
I.3 Apport combiné de la télédétection et du SIG.....	12
I.4 Indices dérivés de la télédétection à usage agricole.....	12
I.4.1 NDVI (normalized difference vegetation index).....	12
I.4.1.1 Définition et objectif.....	12

I.4.1.2 Calcul de l'indice NDVI.....	12
I.4.2 LST (Land surface temperature).....	13
I.4.2.1 Définition.....	13
I.4.2.2 Méthode de calcul.....	13
I.4.3 VCI (Vegetation Condition Index).....	14
I.4.3.1 Définition du VCI.....	14
I.4.4 TCI (Temperature Condition Index).....	14
I.4.4.1 Définition.....	14
I.4.5 VHI (Vegetation Health Index).....	15
I.4.5.1 Définition.....	15
I.4.5.2 Calcul.....	15
I.5 La sécheresse.....	16
I.5.1 Définition.....	16
I.5.2 Types de sécheresse.....	16
I.5.2.1 Sécheresse météorologique.....	16
I.5.2.2 Sécheresse agricole.....	16
I.5.2.3 Sécheresse hydrologique.....	16

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

II.1. Localisation géographique et population.....	17
II.2 Relief.....	18
II.3 Etude climatique.....	19
II.3.1 Données climatiques.....	19
II.3.2 Précipitations.....	19
II.3.3 Température.....	20
II.3.4 Climatogramme d'EMMBERGER (Q2).....	22
II.3.5 Diagramme ombrothermique de Gaussen et Bagnouls.....	24
II.4 Morphologie des sols.....	25
II.5 Occupation du sol.....	28
II.6 Ressources en eau.....	32
II.7 Agriculture.....	33

Chapitre III : Modélisation et régionalisation des indices de sécheresse

III.1. Choix de la zone d'étude.....	37
--------------------------------------	----

III.2	Méthodologie	37
III.3	Données et outils utilisés	37
III.3.1	Images satellitaires	37
III.3.2	Logiciels	38
III.4	Les indices utilisés pour l'évaluation.....	41
III.4.1	NDVI (Indice de Végétation par Différence Normalisée).....	41
III.4.2	LST (Température de Surface du Sol).....	42
III.4.3	VCI (Végétation Condition Index)(Indice de l'état de la végétation).....	46
III.4.4	TCI (Indice de l'État Thermique – Temperature Condition Index).....	46
III.4.5	VHI (Indice de Santé de la Végétation – Vegetation Health Index).....	47
III.5.	Résultats et discussion.....	48
III.5.1.	NDVI.....	49
III.5.1.2	Discussion.....	50
III.5.2.	LST.....	50
III.5.2.1	Discussion.....	51
III.5.3.	VCI.....	52
III.5.3.1	Discussion.....	53
III.5.4.	TCI.....	54
III.5.4.1	Discussion.....	55
III.5.5.	VHI.....	56
III.5.5.1	Discussion.....	57
III.6.	Comparaison	59
III.6.1	État de la Sécheresse en 2000 (VHI 2000).....	59
III.6.2	État de la Sécheresse en 2010 (VHI 2010).....	60
III.6.3	État de la Sécheresse en 2020 (VHI 2020).....	61

Conclusion générale

Liste des figures

- **Figure I.1:** Composantes du système d'information géographique 4
- **Figure I.2:** Processus de conversion de données dans le SIG 5
- **Figure I.3 :** Onde électromagnétique monochromatique 6
- **Figure I.4:** Spectre du rayonnement électromagnétique solaire 7
- **Figure I.5 :** Propriétés spectrales de quelques surfaces terrestres 8
- **Figure I.6 :** Source d'énergie utilisée dans la télédétection..... 9
- **Figure I.7 :** Étapes de la télédétection spatiale..... 9
- **Figure I.8 :** Télédétection passive 11
- **Figure II.1 :** Localisation géographique de la wilaya de M'sila 17
- **Figure II.2 :** Modèle numérique du terrain de la wilaya de M'Sila..... 18
- **Figure II.3 :** Températures mensuelles moyennes, minimales et maximales des points satellitaires choisis dans la wilaya de M'sila..... 21
- **Figure II.4 :** Quotient pluviométrique des stations climatologiques utilisées sur le climatogramme d'EMBERGER 23
- **Figure II.5 :** Courbes ombrothermiques des stations climatiques étudiées. 25
- **Figure II.6 :** Carte des types de sols de la wilaya de M'Sila..... 26
- **Figure II.7 :** Carte d'occupation du sol de la wilaya de M'sila..... 29
- **Figure II.8 :** Répartition des superficies irriguées selon le système d'irrigation et les types de cultures dans la wilaya de M'Sila..... 34
- **Figure III.1 :** Diagramme de flux du calcul du VHI et de la classification de la sécheresse..... 40
- **Figure III.2 :** Application de la formule NDVI dans le logiciel ArcGIS..... 41
- **Figure III.3 :** Calcul de la Radiance spectrale TOA 43
- **Figure III.4 :** Calcul de la température TOA en luminosité(BT)..... 44
- **Figure III.5 :** Calculez la proportion de végétation Pv 44
- **Figure III.6 :** Calculer l'émissivité ϵ 45
- **Figure III.7 :** Calculer la température de surface terrestre (LST)..... 45

• Figure III.8 : Calcul de l'indice de l'état de la végétation.....	46
• Figure III.9 : Calcul TCI (Indice de l'État Thermique – Temperature Condition Index)	47
• Figure III.10 : Calcul VHI (Indice de Santé de la Végétation – Vegetation Health Index).....	48
• Figure III.11 : Évolution spatio-temporelle de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) dans la wilaya de M'Sila (2000, 2010, 2020).....	49
• Figure III.12 : Évolution spatio-temporelle de la Température de Surface (LST) dans la wilaya de M'Sila (2000, 2010, 2020)	51
• Figure III.13 : Évolution spatio-temporelle de l'Indice de Condition de la Végétation (VCI) dans la wilaya de M'Sila (2000, 2010, 2020)	53
• Figure III.14 : Évolution spatio-temporelle de l'Indice de Condition Thermique (TCI) dans la wilaya de M'Sila (2000, 2010, 2020).....	55
• Figure III.15 : Évolution spatio-temporelle de l'Indice de Santé de la Végétation (VHI) dans la wilaya de M'Sila (2000, 2010, 2020)	57
• Figure III.16 : barres représentant le pourcentage de désertification VHI en 2000	59
• Figure III.17 : barres représentant le pourcentage de désertification VHI en 2010	60
• Figure III.17 : barres représentant le pourcentage de désertification VHI en 2020	61

Liste des Tableaux

- **Tableau I.1:** Applications de la télédétection 10
- **Tableau 2:** Le système de classification pour la cartographie de la sécheresse . 15
- **Tableau II 1 :** Caractéristiques des points satellitaires choisis..... 19
- **Tableau II.2:** Précipitations moyennes annuelles et mensuelles des points satellitaires. 19
- **Tableau II.3:** Valeurs du quotient pluviométrique Q2 des six (06) points satellitaires. 22
- **Tableau II.4:** Répartition des Pacages et Forêts par Commune dans la Wilaya de M'Sila 31
- **Tableau II.5:** Surfaces agricoles irrigués à partir des ressources en eau de surface dans le wilaya de M'Sila 33
- **Tableau II.6 :** Répartition des superficies irriguées selon le système d'irrigation et les types de cultures dans la wilaya de M'Sila 33
- **Tableau II.7 :** Répartition des superficies agricoles par type de production et commune dans la wilaya de M'Sila 35
- **Tableau III.1 :** Caractéristiques techniques du capteur ETM+ (Landsat 7) 38
- **Tableau III.2 :** caractéristiques d'ArcGIS 10.3 39
- **Tableau III.3 :** Évolution des niveaux de sécheresse (VHI) et de leurs superficies dans la wilaya de M'Sila (2000, 2010, 2020) 62

Liste des abréviations

- DAS** : Direction des Services Agricoles
- ETM+**: Enhanced Thematic Mapper Plus (Landsat 7)
- FAO** : Food and Agriculture Organization of the United Nations
- IR**: Infrarouge
- LST**: Land Surface Temperature
- NASA**: National Aeronautics and Space Administration
- NDVI**: Normalized Difference Vegetation Index
- PAHE / PHAE** : Régimes Pluviométriques saisonniers
- RGB**: Red-Green-Blue (composition des bandes)
- SIG**: Système d'Information Géographique
- SLC-off**: Scan Line Corrector Off (défaut Landsat 7 depuis 2003)
- SWIR**: Short-Wave Infrared
- TCI** : Temperature Condition Index
- USGS**:United States Geological Survey
- UTM** : Universal Transverse Mercator
- VCI** : Vegetation Condition Index
- VHI**:Vegetation Health Index
- WGS84**: World Geodetic System 1984

Introduction générale

Introduction générale

Actuellement, le monde est marqué par des bouleversements climatiques croissants. L'agriculture devient l'un des secteurs les plus vulnérables face aux aléas naturels, notamment la sécheresse qui figure parmi les catastrophes climatiques les plus dévastatrices, provoquant la dégradation de millions d'hectares, des pertes massives en production agricoles dû à un stress hydrique croissant (FAO, 2021).

L'Algérie, pays à dominance climatique aride, n'échappe pas de cette dynamique. Depuis plusieurs décennies, une baisse significative des précipitations est observée (Bakreti et *al.*, 2013 ; El Mahi et *al.*, 2014 ; Baahmed et *al.*, 2015; Achite et *al.*, 2017; Zamoum et Souag-Gamane, 2019; Lakache et *al.*, 2019; Hallouz et *al.*, 2019; Berhail et *al.*, 2021). Cette situation engendrait une pression sévère sur les ressources hydriques (avec des taux de remplissage de barrage souvent inférieurs à 30 %) notamment avec l'accroissement démographique et la demande progressive en eau du secteur de l'agriculture. Ce qui a été répercuté sur le stress hydrique et la chute des rendements agricoles, notamment en céréaliculture.

La wilaya de M'sila reconnue par son paysage steppique et soumise à un climat aride est confronté aux problèmes des variations climatiques, la disponibilité en eau et la qualité des sols. Ainsi, le problème de pression foncière croissante et la transformation rapide de ses zones agricoles met en déficit la région de M'sila pour assurer sa sécurité alimentaire et soutenir son développement agricole.

Les Systèmes d'Information Géographique et la télédétection se présentent aujourd'hui comme des outils incontournables pour caractériser l'espace agricole, analyser ses dynamiques et faciliter une gestion territoriale durable. Ces deux (02) approches permettent non seulement de mesurer les transformations, mais aussi d'en diagnostiquer les causes et d'orienter les politiques agricoles vers une exploitation plus durable et résiliente face aux changements climatiques.

L'approche méthodologique combinant SIG et télédétection repose sur plusieurs étapes essentielles : la collecte et le traitement des images satellitaires (avec corrections radiométriques et géométriques), la classification des types d'occupation du sol, et l'intégration des résultats dans un SIG pour produire des analyses précises de l'évolution des zones cultivées (Zerrouki, 2018 ; Bouziane, 2021).

la présent travail vise à analyser l'évolution des surfaces agricoles dans la wilaya de M'Sila à l'aide du SIG et de la télédétection durant les années 2000, 2010 et 2020. Cette démarche a permis d'identifier les transformations spatio-temporelles des zones cultivées, en lien direct les conditions climatiques .

Ce mémoire est structuré en trois(03) chapitres :

- La premier chapitre constitue une synthèse bibliographique sur les SIG, la télédétection et les indices environnementaux appliqués à l'agriculture.
- Le deuxième chapitre est consacré à la présentation détaillée de la zone d'étude : situation géographique, caractéristiques climatiques, pédologiques et agricoles.
- La troisième chapitre porte sur la modélisation et la régionalisation de la dynamique végétale de la wilaya de M'Sila à l'échelle spatio-temporelles via des indices drivés de la télédétection climatiques et culturelles tels que NDVI, le LST et le VHI.

À l'issue de ce travail, des recommandations seront formulées pour améliorer la gestion des ressources agricoles, anticiper les crises liées à la sécheresse et soutenir la prise de décision territoriale par des approches spatialisées.

Chapitre I :

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction

Ce chapitre rassemble tous les termes utilisés dans ce travail. Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) et la télédétection offrent des outils puissants pour observer, analyser et prédire les dynamiques agricoles à différentes échelles temporelles et spatiales. Le suivi de l'évolution des zones agricoles est essentiel pour une gestion durable des ressources naturelles et la sécurité alimentaire et l'aménagement du territoire.

I.1 Système d'information géographique

I.1.1 Définition

Le système d'information géographique (SIG) est un outil essentiel pour l'acquisition, la gestion et l'analyse des données à l'échelle spatiale. Grâce aux coordonnées géographiques, le SIG extrait des informations environnementales utiles à divers utilisateurs.

Le SIG regroupe le matériel, logiciels, données géographiques et personnel pour manipuler et présenter ces informations et contribue aussi à la prise de décision (**Ider, 2004**)

I.1.2 Historique du S.I.G

Les SIG ont connu plusieurs phases clés :

1. **Années 1960** : Recherches fondamentales dans les laboratoires américains avec applications statistiques et militaires (**Da Cunha, 2005**).
2. **Années 1970** : Émergence des premières plateformes logicielles (ESRI 1969, Intergraph)
3. **Années 1980** : Lancement de systèmes opérationnels (ArcInfo en 1982) et création des cadres académiques.
4. **Années 1990** : Généralisation des systèmes desktop et migration vers le web.
5. **Années 2000** : Révolution des systèmes mobiles et services intelligents basés sur la localisation, avec accent sur l'interopérabilité (**Beltran et Griset, 2007**).

I.1.3 Composantes d'un SIG

Un système d'information géographique repose sur plusieurs composantes essentielles suivantes (voir Fig I.1) :

- **Matériel** : Le SIG nécessite une infrastructure informatique conséquente pour fonctionner efficacement.
- **Logiciels** : Ils assurent les cinq fonctions principales du SIG (Acquisition, Archivage, Analyse, Affiliation, Accès) et intègrent des outils de gestion et de manipulation des données géographiques, des systèmes de gestion de bases de données, des outils

d'analyse et de visualisation, ainsi qu'une interface graphique conviviale (Hufty, 2001). Exemple des logiciels SIG : MapInfo, Arc Gis , Qgis.

- **Données** : Élément central du SIG, elles incluent des données spatiales graphiques et alphanumériques, souvent importées ou produites par l'opérateur.
- **Savoir-faire** : Il s'agit des compétences techniques nécessaires à l'exploitation du SIG, notamment en analyse spatiale, en statistiques et en cartographie.
- **Utilisateurs** : Le système est destiné à un large éventail de services publics qui en dépendent pour la gestion de leurs opérations.



Figure I.1: Composantes du système d'information géographique

I.1.4 Fonctions du SIG

Les principales fonctions du SIG sont :

- **Acquisition** : Elle consiste à intégrer des données dans le SIG, en définissant à la fois les formes des objets géographiques et leurs attributs.
- **Archivage** : Transfert des données vers un support de stockage, selon une architecture logicielle, avec ou sans Système de Gestion de Base de Données (SGBD).
- **Analyse** : Permet de répondre aux différentes interrogations spatiales.
- **Affichage** : Utilisé pour la production automatique de cartes et la visualisation des relations spatiales sur écran.
- **Abstraction** : Sert à structurer les données selon des composantes (exemple : données géologiques) et à fournir des descriptions fondées sur les relations entre objets (Bougerra, 2020).

Le système d'information géographique (SIG) fournit une représentation environnementale précise à partir de données graphiques, qu'elles soient vectorielles ou matricielles, intégrant des informations qualitatives sur les itinéraires, la localisation, et le contexte (Major *et al.*, 2004).

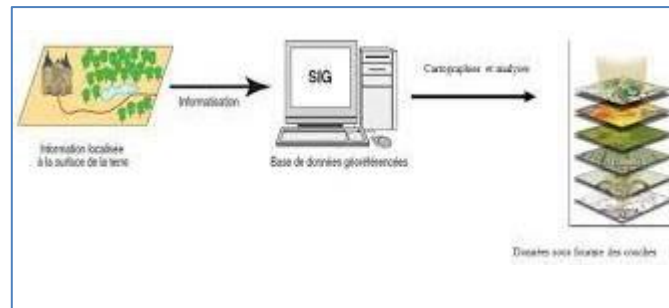


Figure I.2: Processus de conversion de données dans le SIG (Kouadria, 2020)

I.1.5 Domaines d'application

Le SIG est largement utilisé dans tous les domaines utilisant la notion d'échelle spatiale. On peut citer quelques domaines comme :

- Les applications touchant l'environnement (météorologie, océanographie, changement climatique).
- L'aménagement du territoire (urbanisme, agriculture de précision et sylviculture).
- La prévention et le traitement des catastrophes naturelles (inondation, sécheresse,...)

I.1.6 Apport spécifique du SIG dans le domaine agricole

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) jouent un rôle essentiel dans la modernisation de l'agriculture en Algérie, notamment dans le contexte de la gestion durable des ressources naturelles. Leur contribution se manifeste à plusieurs niveaux :

- ✓ **Intégration et analyse de données spatiales et non-spatiales :** par superposer différentes couches d'information (topographie, type de sol, climat, occupation du sol), le SIG facilite ainsi une lecture croisée des dynamiques agricoles et environnementales (Missoumi et Tadjrouni, 2003).
- ✓ **Suivi des terres agricoles à l'échelle spatio-temporelle:** il est possible de suivre l'évolution des parcelles agricoles dans l'espace et au fil du temps. Par exemple, dans certaines zones de l'Atlas tellien, les SIG ont permis de détecter une diminution des zones humides au profit des cultures arboricoles (Bouacha, 2013).

- ✓ **Évaluation des impacts environnementaux** : En croisant des données géospatiales, les SIG aident à comprendre les conséquences des pratiques agricoles sur les écosystèmes locaux, comme la dégradation des sols ou la baisse de la biodiversité (Remil, 2006).
- ✓ **Appui à la prise de décision** : Les résultats issus des analyses SIG sont des outils précieux pour les décideurs dans les domaines de l'aménagement agricole, du zonage, ou encore de la gestion intégrée des ressources en eau (Brahimi, 2021).

I.2 Télédétection

I.2.1 Définition

La télédétection regroupe des techniques d'acquisition et de traitement des informations sur des objets sans contact direct sur la base de rayonnement électromagnétique (Kergomard, 1990 ; Guillet, 1991 ; Caloz et Collet, 2001 ; Caloz, 2006). Les objets analysés peuvent être la surface terrestre (sol, végétation, l'eau... etc), les océans ou l'atmosphère.

I.2.2 Éléments de la télédétection

La télédétection est composée des éléments clés suivants :

- **Le rayonnement électromagnétique** : vecteur d'information.
- **La cible** : l'objet détecté qui émet et réfléchit un rayonnement porteur d'informations.
- **Le capteur** : Appareil de mesure, acquisition, traitement et interprétation.
- **Le milieu perturbateur** : l'atmosphère modifiant le signal.

I.2.3 Rayonnement électromagnétique

I.2.3.1 Définition

Le rayonnement électromagnétique est la propagation d'onde du champ électromagnétique porteuse d'une énergie de rayonnement. Il est composé de photons et se déplace à la vitesse de la lumière (Madani, 2023).

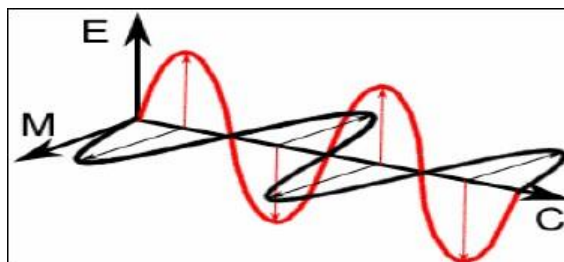


Figure I.3 : Onde électromagnétique monochromatique (Source : (Madani, 2023)).

Le rayonnement électromagnétique provient des : images aériennes (verticales, obliques, panoramiques) ou satellites. Il renseigne sur les propriétés géométriques, optiques et physico-chimiques des objets rencontrés (Gérard, 2005 ; Caloz, 2006 ; Kamel, 2007).

I.2.3.2 Caractéristiques

Le rayonnement électromagnétique se caractérise par :

- ❖ La période : qui est le temps (T) en seconde au bout du quelle le champ électrique ou magnétique retrouve sa valeur (un cycle) à partir d'un instant quelconque.
- ❖ La fréquence ν est le nombre de cycles par unité de temps (1/T). L'unité de fréquence est le Herz (Hz).
- ❖ La longueur d'onde λ ou amplitude est la distance entre deux points homologues sur l'onde.
- ❖ La vitesse v de propagation de l'onde dans l'espace
- ❖ La polarisation : est l'orientation du champ électrique dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation.
- ❖ l'amplitude de l'onde qui conditionne l'intensité du rayonnement.

I.2.3.3 Spectre électromagnétique

Est le classement du rayonnement par fréquences et longueur d'onde, en des ondes les plus courtes aux plus longues (Madani, 2023). Les différentes longueurs d'ondes sont données dans la figure I.4 suivante.

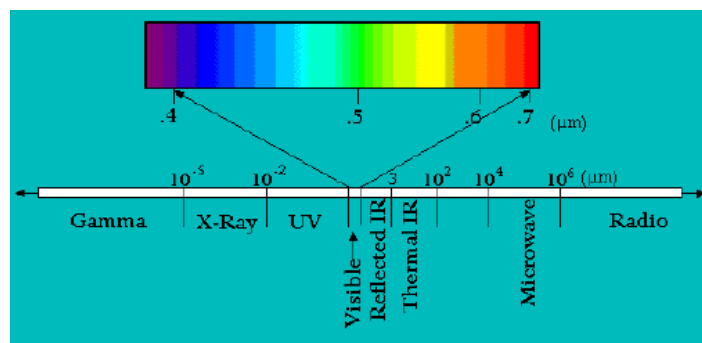


Figure I.4: Spectre du rayonnement électromagnétique solaire (Kamel, 2007)
(Madani, 2023).

Les types d'ondes électromagnétiques sont :

- **Les rayons X :** Longueur d'onde : 10-12mà 10-8m ;
- **Les ultraviolets :** Longueur d'onde :10-8mà 4.10-7 m ;

- **Le spectre visible :** Longueur d'onde : $4 \cdot 10^{-7}$ m (lumière bleue) à $8 \cdot 10^{-7}$ m (lumière rouge);
- **L'infrarouge :** La longueur d'onde est de $8 \cdot 10^{-7}$ m à 10^{-3} m ;
- **Les ondes radar ou hyperfréquences :** Le domaine des hyperfréquences s'étend sur des longueurs d'onde de l'ordre de centimètre jusqu'au mètre;
- **Les ondes radio:** Les ondes radio (de quelques cm à plusieurs km).

Les différentes ondes du rayonnement interagissent différemment avec les surfaces terrestres selon leurs caractéristiques (rugosité, humidité, matière organique), affectant leur réponse spectrale (Figure I.5)

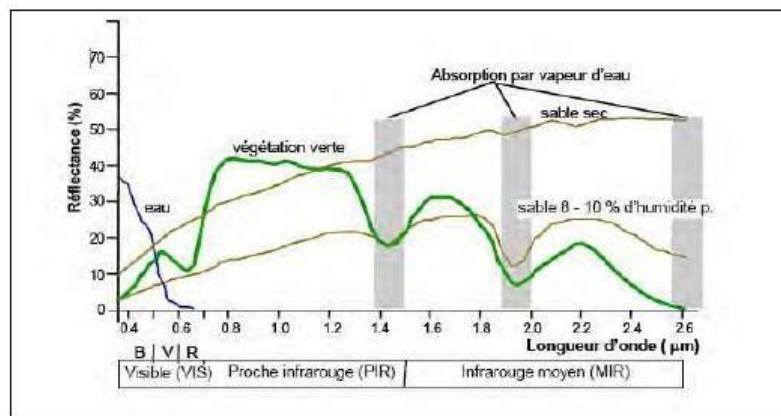


Figure I.5 : Propriétés spectrales de quelques surfaces terrestres (Provencher *et al.*, 2007) (Madani, 2023).

I.2.4 Étapes de la télédétection

La télédétection des surfaces naturelles décrivent les étapes de parcours du rayonnement électromagnétique et ses interactions avant son arrivée au radiomètre satellisé, suivant un processus (Fig I.7) structuré comme suit :

- ❖ **Source d'énergie ou d'illumination (A) :** peut-être naturelle (le soleil), les capteurs peuvent détecter l'énergie uniquement lorsqu'elle est disponible naturellement (Fig I.6a). ou bien artificielle lorsque les capteurs produisent leur propre énergie pour éclairer la cible (télédétection active) (Fig I.6b).

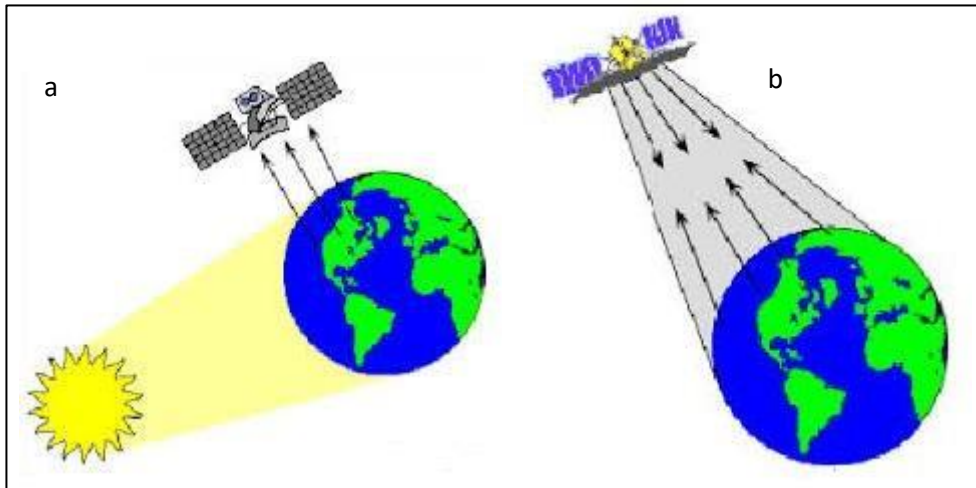


Figure I.6 : Source d'énergie utilisée dans la télédétection

- ❖ **Interactions du rayonnement avec l'atmosphère (B)** : Le rayonnement traverse l'atmosphère et interagit avec lui avant d'atteindre la cible.
- ❖ **Interactions avec la cible (C)** : La cible modifie le rayonnement selon trois processus : transmission, réflexion et absorption.
- ❖ **Enregistrement du signal (D)** : L'énergie émise par la cible est captée et enregistrée par un capteur situé à distance.
- ❖ **Transmission, réception et traitement (E)** : Le signal est envoyé à des stations de réception où il est transformé en images numériques ou photographiques.
- ❖ **Traitement, analyse et interprétation (F & G)** : L'image obtenue est analysée par des méthodes complexes afin d'extraire des informations utiles pour caractériser la cible étudiée.

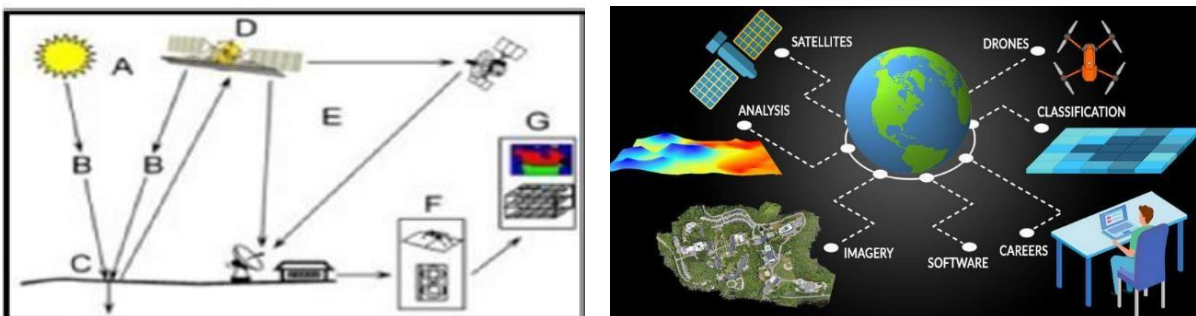


Figure I.7 : Étapes de la télédétection spatiale

I.2.5 Applications de la télédétection

La télédétection peut être utilisée à deux échelles :

- **Echelle régionale** ; Agriculture (rendements des cultures, activité photosynthétique, Foresterie, ...Etc.), hydrologie, occupation du sol...Etc. (**Tonye et al., 2000**), (**Kamel, 2005**)
- **Echelle globale** ; Météorologie et climat, océanographie, ressources marines, Changements globaux... Etc. (**Soudani 2006**).

Quelques exemples spécifiques sont détaillés au tableau I.1 suivant :

Tableau I.1: Applications de la télédétection (Source :(**Gérard et al., 2005**) in (**Madani, 2023**))

Vecteurs	Capteurs	Domaines d'applications
Télédétection de l'ATMOSPHERE (Météorologie, Climatologie)		
Satellites géostationnaires (Météosat), Satellites à défilement (NOAA)	Basse et moyenne résolutions (on privilégie la répétitivité et la couverture spatiale). Capteurs passifs : visible, infrarouge, microondes. Dans le futur : radars planétaires, lidars (capteurs laser).	Étude de la nébulosité, mesure des propriétés thermiques, vapeur d'eau et précipitations. Éléments du bilan radiatif
OCÉANOGRAPHIE ET ÉTUDE LITTORALES		
Avions, satellites météorologiques ou de télédétection terrestre, satellites spécialisés (Nimbus, Seasat, ERS-1)	Toutes résolutions selon les espaces côtiers / de l'océan explorés (résolution spatiale, spectrale, temporelle, radiométrique). Capteurs passifs : visible, infrarouge, microondes. Radars imageurs, radar-altimeètre, diffusion micro-ondes.	Analyse de la couleur de l'océan, productivité biologique, détection et surveillance de la surface de la mer. Vagues et vents. Altitude de la surface (dynamiques de l'océan). Glaces de mer.
APPLICATIONS TERRESTRES		
Avions, satellites à défilement en orbite polaire (Landsat, SPOT)	Surtout une très haute résolution spatiale. Capteurs passifs : radiomètres à balayage optique. Capteurs actifs : radars imageurs.	Cartographie régulière et thématique. Géologie, prospection minière, agriculture, foresterie. Hydrologie, neige, risques naturels. Urbanisme, aménagement, génie civil, etc.

I.2.5.1 Apport spécifique de la télédétection dans le domaine agricole

Est un outil stratégique pour l'observation et la gestion des terres agricoles. La télédétection permet notamment :

- ✓ L'identification des types de cultures à l'aide d'indices spectraux tels que le NDVI, qui renseigne sur la vigueur de la végétation (**Bourenane, 2021**).

- ✓ La détection des anomalies agricoles, comme la sécheresse, le stress hydrique ou les maladies phytosanitaires (Sahnoune, 2020).
- ✓ Le suivi des changements d'occupation du sol, en détectant les transitions entre cultures, et les zones urbanisées (Aït Aoudia, 2019).
- ✓ La cartographie de l'occupation et de l'usage des sols, facilitant la planification agricole et la prise de décision.

Ces apports permettent ainsi une gestion plus efficace et durable des ressources agricoles, en fournissant des données fiables, répétées dans le temps, et spatialement cohérentes.

I.2.6 Types de la télédétection

Selon le mode d'acquisition de données spatiale, il existe :

I.2.6.1 Télédétection passive : le soleil est la source d'illumination des objets (Fig I.6a). En conséquence, le rayonnement solaire émis ou réfléchi par l'objet observé ou la zone environnante est détecté par les capteurs. Ces capteurs passifs incluent le film, l'infrarouge et les radiomètres ; c'est le cas des satellites SPOT (Satellite pour observation de la Terre), LANDSAT (Land Satellite) METEOSAT (Meteorological Satellite),...etc (Soudani, 2005).



Figure I.8 : Télédétection passive (Abdulrahman, 2010).

I.2.6.2 Télédétection active : utilisant une autre source d'illumination (radars , lasers) pour pouvoir réaliser des acquisitions en tout temps (Fig I.6b). Un capteur embarqué sur un aéronef ou un satellite génère sa propre énergie pour éclairer une cible dont le rayonnement réfléchi par la cible est alors capté et mesuré par le capteur. Ce rayonnement traverse les nuages, ce qui permet d'acquérir des images quelles que soient les conditions météorologiques diurnes ou nocturnes (Tempfli, 2009). Exemple : LIDAR (Light Détection and Ranging) et le RADAR (Radio Détection And Ranging) .

I.3 Apport combiné de la télédétection et du SIG

Le SIG et la télédétection sont des outils complémentaires pour analyser la surface terrestre permettent une meilleure compréhension des phénomènes naturels. La télédétection capte des informations à distance via des satellites ou avions, tandis que le SIG intègre les images satellites aux données exogènes pour le traitement, la modélisation et la synthèse gère et visualise des données géographiques.

Cette intégration SIG–télédétection permet également la modélisation de scénarios d'évolution future des terres agricoles, en tenant compte de facteurs politiques, climatiques ou socio-économiques (Djellouli, 2020).

I.4 Indices dérivés de la télédétection à usage agricole

Pour connaître le type de végétation, leur état et leurs changements au moyen de satellites, nous utilisons les indices suivants (Mohamed Adou *et al.*, 2019).

I.4.1 NDVI (normalized difference vegetation index)

I.4.1.1 Définition et objectif

Est l'indice de végétation par différence normalisé. Il est utilisé en environnement et en agriculture pour évaluer la vigueur et la quantité de végétation par analyses des mesures de télédétection. Le NDVI est souvent utilisé comme outil d'aide à la décision en agriculture de précision, il permet de générer une image illustrant une couverture végétale, également appelée biomasse relative (Mohamed Adou *et al.*, 2019).

I.4.1.2 Calcul de l'indice NDVI

Il est indice scientifique calculé à partir du contraste des caractéristiques de deux canaux multi spectral de la bande visible : l'absorption de pigments chlorophylliens dans le canal rouge (R) et la réflectivité élevée des matières végétales dans le canal proche infrarouge (NIR) (Mohamed Adou *et al.*, 2019) (équations I.1 et I.2)

$$\text{NDVI} = (\text{PIR}-\text{R}) / (\text{PIR}+\text{R}) \dots\dots\dots (\text{I.1})$$

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red}) \dots\dots\dots (\text{I.2})$$

Avec :

PIR: Proche Infrarouge qui correspond à une bande du spectre électromagnétique dont la longueur d'onde se situe entre 760 et 900 nanomètres environ.

NIR : Infrarouge proche fortement réfléchi par la végétation saine. Il est très utile pour l'analyse de la couverture végétale.

Red ou **R** : valeurs de pixel du canal rouge.

Cet indice scientifique (NDVI) génère en sortie des valeurs de densité de la végétation comprises entre -1,0 et 1,0 . Les valeurs négatives sont principalement générées par les nuages, l'eau et la neige, et les valeurs proches de zéro sont principalement produites par les roches et le sol nu. Les valeurs très faibles (0.1 et inférieures) de l'indice NDVI correspondent aux surfaces stériles des roches, du sable ou de la neige.

Les valeurs modérées (de 0.2 à 0.3) représentent les arbustes , les prairies et les pâturages, tandis que les valeurs élevées (de 0.6 à 0.8) désignent les forêts et une végétation luxuriante.

I.4.2 LST (Land surface temperature)

I.4.2.1 Définition

Est la température de la surface terrestre mesurée par télédétection thermique qui reflète la chaleur émise par le sol sous l'effet du rayonnement solaire. Le LST est un indicateur clé pour évaluer le stress thermique des plantes et surveiller la sécheresse (**Mohamed Adou et al., 2019**).

I.4.2.2 Méthode de calcul

La télédétection thermique ne fournit que la mesure de la température radiante de surface principalement émise par le sol. Cette grandeur peut être convertie en température de luminosité, qui est affectée par différents effets atmosphériques. Nous expliquons les étapes du processus d'estimation de la température de surface.

a) Calcul de la Radiance spectrale (TOA) au sommet de l'atmosphère:

$$TOA = ML \times Q_{cal} + AL \dots\dots\dots (I.3)$$

Avec :

ML, AL : facteurs de redimensionnement multiplicatif spécifique à la bande à partir des métadonnées.

Qcal : correspond à la bande 10

b) Calcul de Conversion de la température TOA en luminosité (Température de brillance) :

$$BT = (K2 / \ln((K1 / L) + 1)) - 273,15 \dots\dots\dots (I.4)$$

D'où :

K1 , K2 : constantes de conversion thermique spécifique à la bande à partir des métadonnées

L = TOA

c) Calcul de l'Émissivité du sol (E)

$$E = 0.004 \times PV + 0.986 \dots \dots \dots (I.5)$$

D'où :

PV : proportion de végétation dérivée du NDVI

d) La température de la surface terrestre (LST) :

$$LST = BT / (1 + ((\lambda \times BT) / p) \times \ln(E)) \dots \dots \dots (I.6)$$

Avec :

λ : longueur d'onde,

$$p = 1.438 \times 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{K}$$

Les données de LST sont utilisées pour évaluer l'effet de la température sur la santé des plantes. Une température élevée et une faible humidité nuisent à leur croissance. Le LST et le NDVI sont convertis respectivement en TCI et VCI pour calculer le VHI (**Mohammad et al., 2018**).

I.4.3 VCI (Vegetation Condition Index)

I.4.3.1 Définition du VCI

Il mesure les conditions hydriques de la végétation par rapport à une période de référence, indiquant si la végétation est plus ou moins hydratée que d'habitude. Il est utilisé pour surveiller la sécheresse et le stress hydrique des plantes sur la base des valeurs de **NDVI** (**Mohammad et al., 2018**).

$$VCI = 100 \times (NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}) \dots \dots \dots (I.7)$$

Le VCI varie de 0 (végétation très faible (sécheresse)) à 100 (végétation en bon état)

I.4.4 TCI (Temperature Condition Index)

I.4.4.1 Définition

Il mesure les conditions thermiques de la végétation par rapport à une période de référence, indiquant si la végétation est plus ou moins chaude que d'habitude. Le **TCI** est un indice de stress thermique subi par la végétation. Il est calculé à partir de la température de surface terrestre (LST) (**Mohammad et al., 2018**).

$$TCI = 100 \times (LST_{max} - LST) / (LST_{max} - LST_{min})$$

Les valeurs de TCI varient entre 0 (conditions défavorables) et 100 (idéales).

- Près de **0** = température élevée, **stress thermique important**.
- Près de **100** = température modérée, **conditions favorables**.

I.4.5 VHI (Vegetation Health Index)

I.4.5.1 Définition

L'indice de santé de la végétation (VHI) est un indicateur qui combine l'indice de condition de la végétation (VCI) et l'indice des conditions de température (TCI) pour estimer la santé globale de la végétation en tenant compte à la fois de l'humidité et de la température.

I.4.5.2 Calcul

Le VHI est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$VHI = \alpha * VCI + (1 - \alpha) * TCI$$

Avec :

α : coefficient qui permet de donner plus de poids à l'un ou l'autre des indices, selon les conditions spécifiques à étudier. Généralement, α est égal à 0,5, ce qui signifie que les deux indices ont une importance égale.

Le VHI est particulièrement utile pour évaluer les impacts des épisodes de sécheresse sur la végétation. Les valeurs de VHI sont mentionnées au tableau I.2 suivant

Tableau 2: Le système de classification pour la cartographie de la sécheresse (**Mohamed Adou et al., 2019**)

Classes de sécheresse	VHI
Sécheresse extrême	< 10
Sécheresse severe	10-20
Sécheresse modérée	20-30
Sécheresse légère	30-40
sans sécheresse	> 40

I.5 La sécheresse

I.5.1 Définition

Est un phénomène climatique naturel qui survient lorsqu'on observe une diminution prolongée des ressources en eau (telles que les précipitations, l'humidité du sol ou les nappes phréatiques), par rapport aux moyennes climatiques à long terme. Elle engendre des perturbations écologiques, économiques et sociales tels que la désertification, notamment lorsqu'elle s'accompagne de pressions anthropiques telles que le surpâturage, la déforestation ou la surexploitation des eaux souterraines (UNEP, 1994). (Wilhite et Glantz, 1985 ; Heim, 2002).

I.5.2 Types de sécheresse

I.5.2.1 Sécheresse météorologique

Elle se manifeste par une réduction anormale des précipitations sur une période déterminée, comparée aux moyennes climatiques historiques.

La sécheresse météorologique est souvent le premier signal du développement d'une sécheresse prolongée. (Wilhite et Glantz, 1985 ; Heim, 2002).

I.5.2.2 Sécheresse agricole

Ce type de sécheresse résulte d'un manque d'humidité dans le sol, empêchant la croissance normale des cultures, même si des précipitations légères surviennent. Elle affecte directement la productivité agricole (Boken *et al.*, 2005 ; NDMC 2006).

I.5.2.3 Sécheresse hydrologique

Elle est caractérisée par une diminution significative du débit des cours d'eau, du niveau des nappes phréatiques et des réservoirs, généralement à cause de plusieurs saisons sèches consécutives (Tallaksen et Van Lanen 2004).

Conclusion

L'ensemble des termes cités et décrits dans ce chapitre nous servira de base pour comprendre le phénomène étudié et interpréter les résultats trouvés.

Chapitre II :

Présentation de la zone d'étude

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

Introduction

Une bonne connaissance du milieu naturel (domaine d'étude) est un moyen important de comprendre les phénomènes étudiés et d'interpréter les résultats obtenus. Ce chapitre vise à fournir un aperçu complet des caractéristiques géographiques, climatiques, hydrographiques, géologiques et hydrogéologiques de la wilaya de M'Sila.

II.1. Localisation géographique et population

La wilaya de M'Sila est située au centre-Est de l'Algérie à 245 km environ de la capitale Alger (Fig II.1). Elle s'étend sur une vaste zone entre les latitudes 34°00' et 36°00' Nord, et entre les longitudes 4°00' et 6°30' Est. Elle est bordée au nord par Bordj Bou Arreridj, au nord-est par Sétif, au nord-ouest par Bouira, à l'est par Batna, à l'ouest par Médéa, au sud-est par Biskra et au sud-ouest par Djelfa. La wilaya de M'sila été fondée en 1974 et compte aujourd'hui 47 communes réparties sur 15 daïras. Sa population est estimée à 1.336.958 habitants en 2019, avec une densité de 57 habitants par km² (Achouri et Tadjine, 2013).

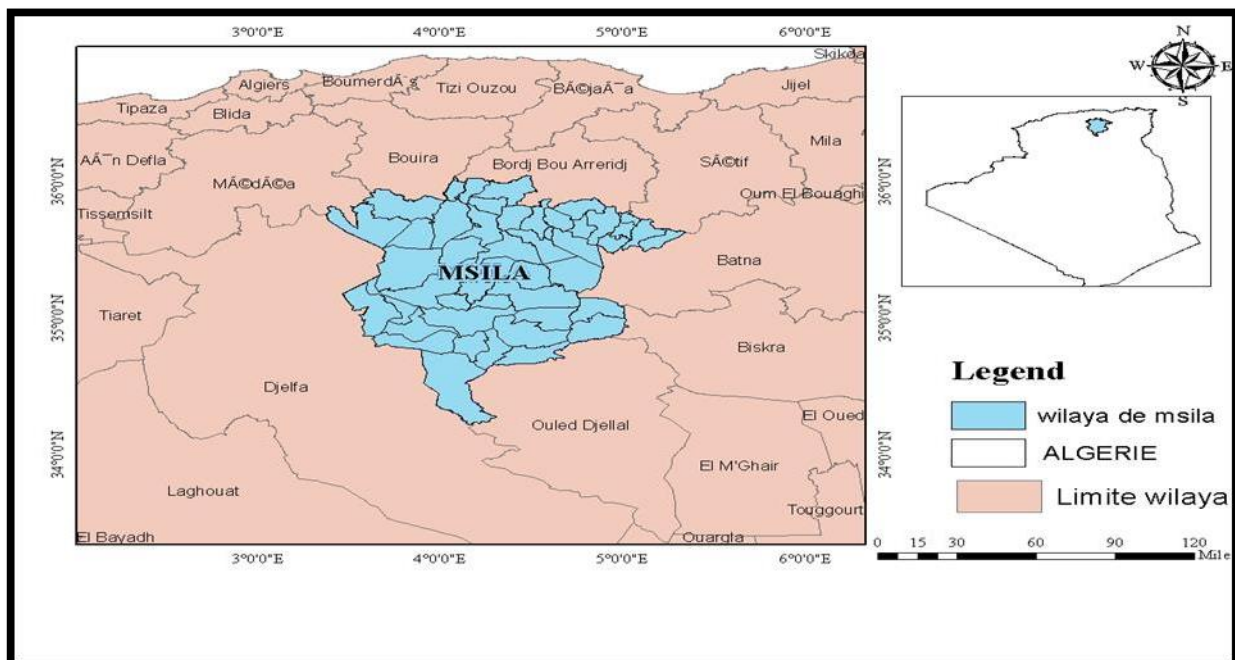


Figure II.1 : Localisation géographique du la wilaya de M'sila

II.2 Relief

La wilaya de M'Sila est une zone de transition entre l'Atlas tellien et l'Atlas saharien qui lui confère un relief diversifié. Elle est limitée au Nord par la chaîne du Bibans et les monts du Hodna d'altitude comprise entre 1400 m et 1800 m et au Sud par l'extrémité orientale de l'Atlas Saharien (prolongement des monts du Ouled Naïls d'altitude comprise entre 1470 m et 1675 m et les Monts du Zab (980 m) (Jean et Franco, 1995). La wilaya de M'sila comprend de vastes plaines qui sont la plaine d'El Hodna dans la région centrale et Zahraz El-Sharqi (Fig II.2). Les zones montagneuses entourant Chott El-Hodna à l'est et à l'ouest, y compris les hauteurs du Jabal Boukahil, qui culmine à environ 1 650 mètres, et du Jabal Lambarak, qui culmine à environ 1 485 mètres. Sur le côté nord, nous trouvons le Jabal Zarq al-Gharaba, qui atteint une hauteur d'environ 1 400 mètres (Kaabeche, 1990). Les dunes de sable causées par le vent sont également très répandues dans certaines régions du sud de la wilaya (Jean et Franco, 1995).

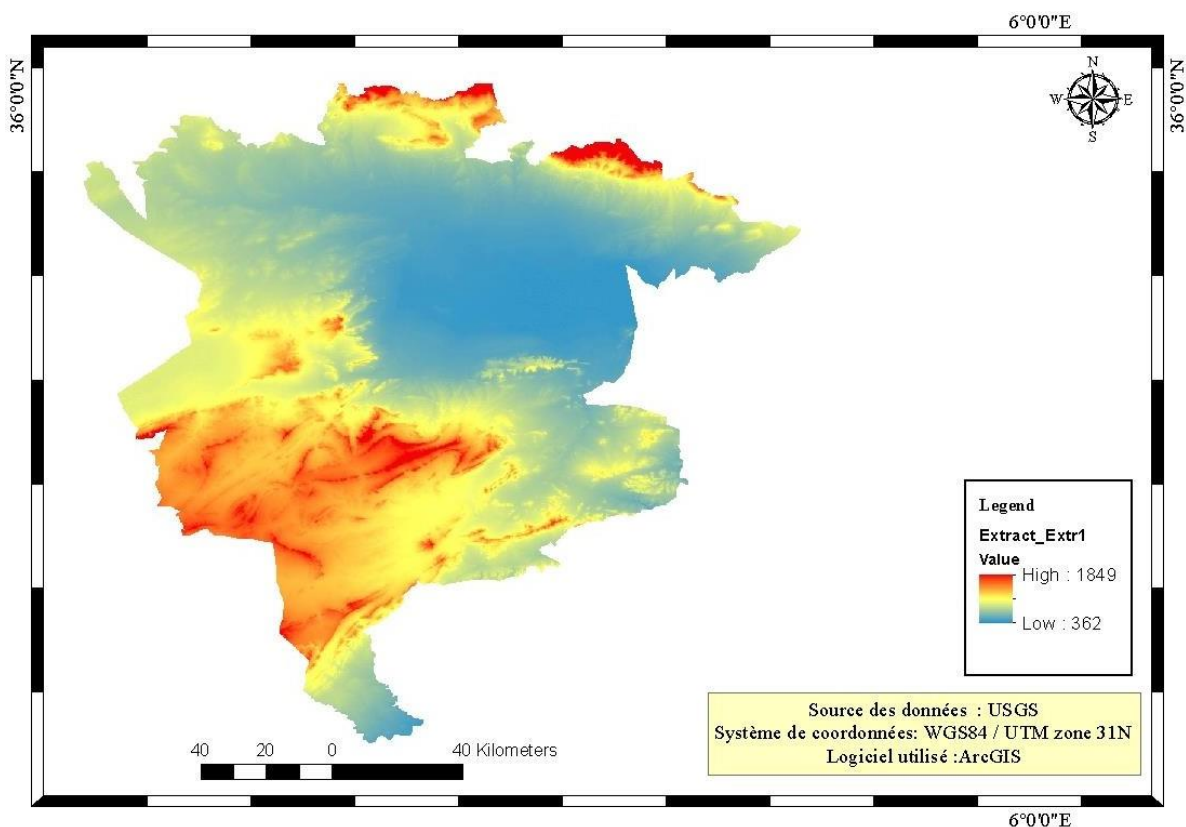


Figure II.2 : Modèle numérique du terrain Le wilaya de M'Sila

L'ensemble des cartes ont été dressées par le logiciel Arc Gis 10.3.

II.3 Etude climatique

II.3.1 Données climatiques

La diversité du relief de la wilaya de M'Sila va être influencée sur sa diversité climatique. Afin d'identifier et d'étudier les caractéristiques climatiques de la wilaya de M'sila, six (06) points satellitaires (voir tab II.1) ont été sélectionnés de manière à couvrir l'ensemble du territoire de la wilaya, en tenant compte de la variation d'altitude entre ses différentes régions. Les données climatiques ont été téléchargées depuis le site officiel de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) à l'adresse suivante : <https://power.larc.nasa.gov/dataaccess-viewer/>, avec une résolution spatiale de **0.5 x 0.5 degré**. La période d'étude s'étend sur **30 ans**, de **1990 à 2019**, ce qui permet une analyse approfondie des tendances climatiques observées dans la région durant cette période.

Tableau II 1 : Caractéristiques des points satellitaires choisis

Nom du point satellitaire	Code	Coordonnées		
		Lat.	Long.	Z (m)
Ain Melh	X1	34.69	4.08	645
Bordj Ghedir	X2	36.03	4.92	1028
Boussada	X3	35.23	4.16	725
M'Sila	X4	35.66	4.51	558
N'Gaous	X5	35.40	5.51	906
Sidi Aissa	X6	35.90	3.81	759

II.3.2 Précipitations

Elles représentent un élément fondamental du climat de la wilaya de M'sila. Les précipitations moyennes mensuelles enregistrées durant la période (**2000-2020**), à partir des points satellitaires sélectionnés, sont présentées dans le tableau suivant. Ces données permettent de mieux comprendre la répartition spatio-temporelle des pluies dans la région, caractérisée généralement par une pluviométrie irrégulière et concentrée sur la saison hivernale.

Tableau II.2: Précipitations moyennes annuelles et mensuelles des points satellitaires.

mois/précipitation	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	Année
P Ain melh (mm)	23.9	19,7	14,8	13.7	16,7	10,2	15,3	20.7	17,2	4,7	2,8	9,5	169,2
Pbordj ghdir (mm)	49.0	43.4	51,9	60.8	63,3	46,4	56,1	61,3	51,0	18,6	5,6	14.6	522
P boussada (mm)	27,6	23,0	18,6	20.4	22.1	13,9	20.6	27,9	26,9	7,9	3,5	10,5	223
Pmsila (mm)	27,2	23,2	23,4	24,4	27,8	17,9	27,1	33,0	30,8	9,3	2,8	10,0	256,9
P N'Gaouse (mm)	36,04	27,77	25,49	26,89	28,30	18,98	33,57	37,62	39,73	16,87	4,57	14,24	310

Les résultats du tableau II.3 montrent que la station de Sidi Aïssa, située au sud de la wilaya de M'sila, enregistre la plus faible valeur annuelle de précipitations (environ 180 mm), tandis que le maximum (environ 500 mm) est relevé à Magra, au nord-ouest du territoire. La zone centrale, autour de la ville de M'sila, reçoit quant à elle un cumul moyen annuel d'environ 280 mm.

De la fin septembre au début mai, le nord de l'Afrique est soumis à l'influence du front polaire dont les perturbations, après avoir traversé la Méditerranée, parviennent jusqu'à la région de M'sila. Toutefois, la wilaya reste partiellement abritée derrière les reliefs de l'Atlas tellien. Certaines perturbations pénétrant dans le bassin méditerranéen depuis le sud-ouest de la France parviennent néanmoins à atteindre la région, provoquant un temps nuageux et quelques pluies. En été, de rares cyclones issus du front polaire ouest-européen peuvent occasionner, lors de leur incursion dans la Méditerranée occidentale, de brèves perturbations se traduisant localement par une brusque rotation des courants qui soulève tempêtes de sable et poussières, parfois ponctuées de petites pluies. Enfin, au début de l'automne, la descente de l'anticyclone des Açores vers le sud se voit compensée par une dorsale de hautes pressions qui assure généralement le maintien d'un temps calme et ensoleillé sur la wilaya de M'sila.

II.3.3 Température

Elle joue également un rôle primordial dans l'identification du climat de la wilaya de M'sila. Les températures moyennes mensuelles, ainsi que les valeurs maximales et minimales enregistrées durant la période (2000–2020) aux différents points satellitaires sélectionnés, sont présentées dans la figure II.3.

L'analyse de la figure II.3 pour la wilaya de M'sila montre que :

➤ Le mois le plus froid est janvier pour l'ensemble des stations, avec des températures minimales inférieures à zéro : elles peuvent descendre jusqu'à -4 °C à Magra (nord-ouest) et avoisiner $-0,6\text{ °C}$ à Sidi Aïssa (sud).

➤ Les mois de juillet et août sont les plus chauds de l'année: les secteurs de M'sila (centre), Bousaada et Sidi Aïssa enregistrent des maxima d'environ 42 °C , tandis qu'à Magra le pic thermique reste plus modéré, autour de 38 °C .

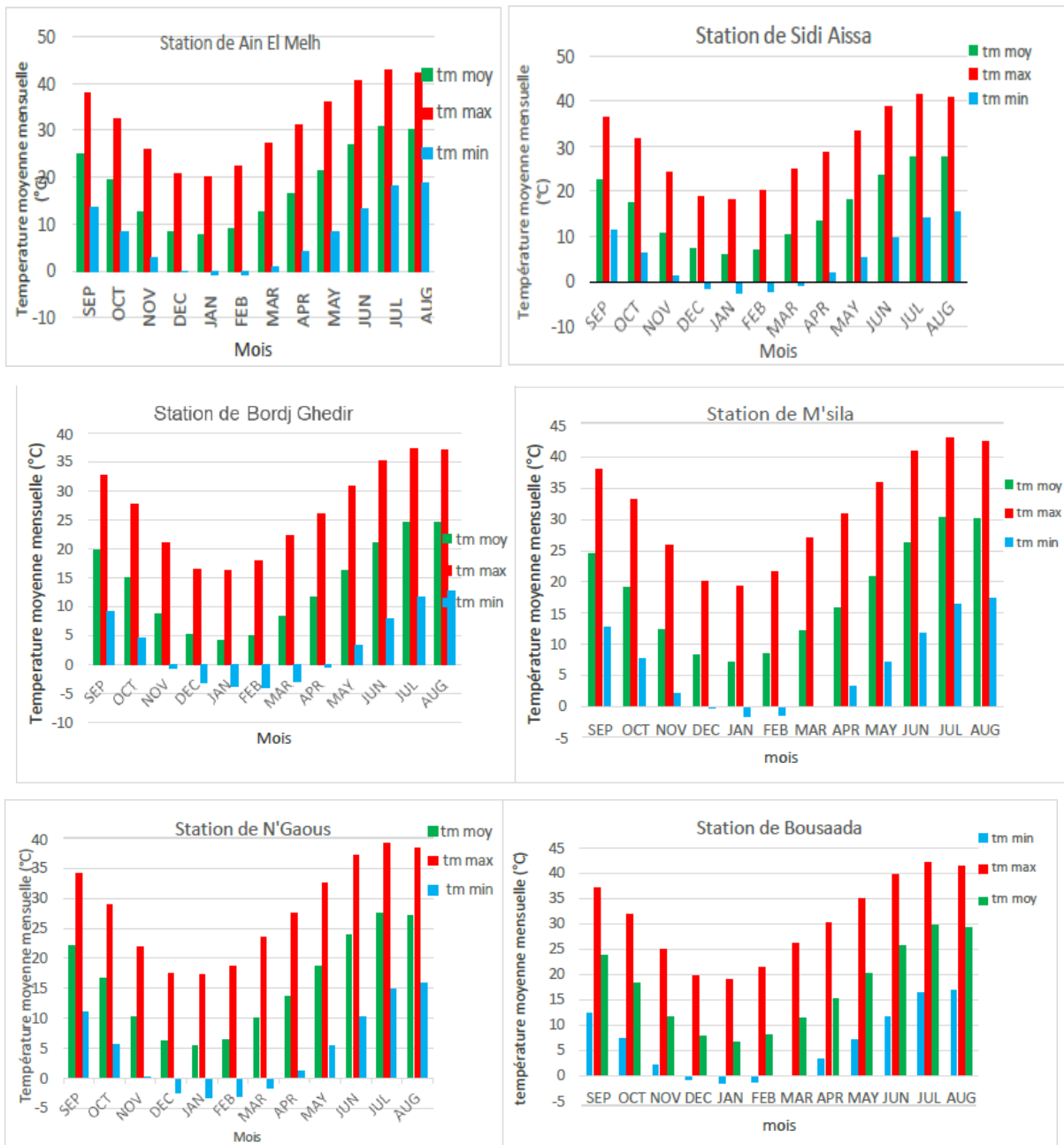


Figure II.3 : Températures mensuelles moyennes, minimales et maximales des points satellitaires choisis dans la wilaya de M'sila

II.3.4 Climatogramme d'EMMBERGER (Q2)

Il permet la classification des différents climats méditerranéens (Dajoz, 1972), grâce au calcul d'un quotient Q2 qui donné par la formule suivante :

$$Q2 = 2000 \left[\frac{P}{M^2 + m^2} \right]$$

Avec :







P : Précipitation moyenne annuelle (mm).

M : Moyenne des maxima du mois le plus chaud en ° Kelvin (°K).

m : Moyenne des minima du mois le plus froid en ° Kelvin (°K).

Les résultats de calcul du quotient pluviométrique Q2 des trois (06) stations climatologiques sont donnés au tableau II.4 suivant.

Tableau II.3: Valeurs du quotient pluviométrique Q₂ des six (06) points satellitaires.

Nom de la station	P (mm)	M (°K)	m (°K)	m (°C)	Q ₂	Couleur
Ain El Melh	169,2	315,9	272,3	-0,8	13,2	
Bord Ghedir	500,0	310,4	269,3	-3,8	43,8	
Boussada	223,0	315,1	271,7	-1,4	17,5	
M'sila	256,9	316,2	271,6	-1,5	19,6	
Sidi Aissa	432,5	314,4	270,6	-2,5	33,7	
N'Gaous	310,0	312,4	269,9	-3,2	25,0	

Les valeurs de Q2 et la moyenne des minima m du mois le plus froids ainsi obtenus sont portées sur le climatogramme d'EMMBERGER (Figure II.4.) suivant.

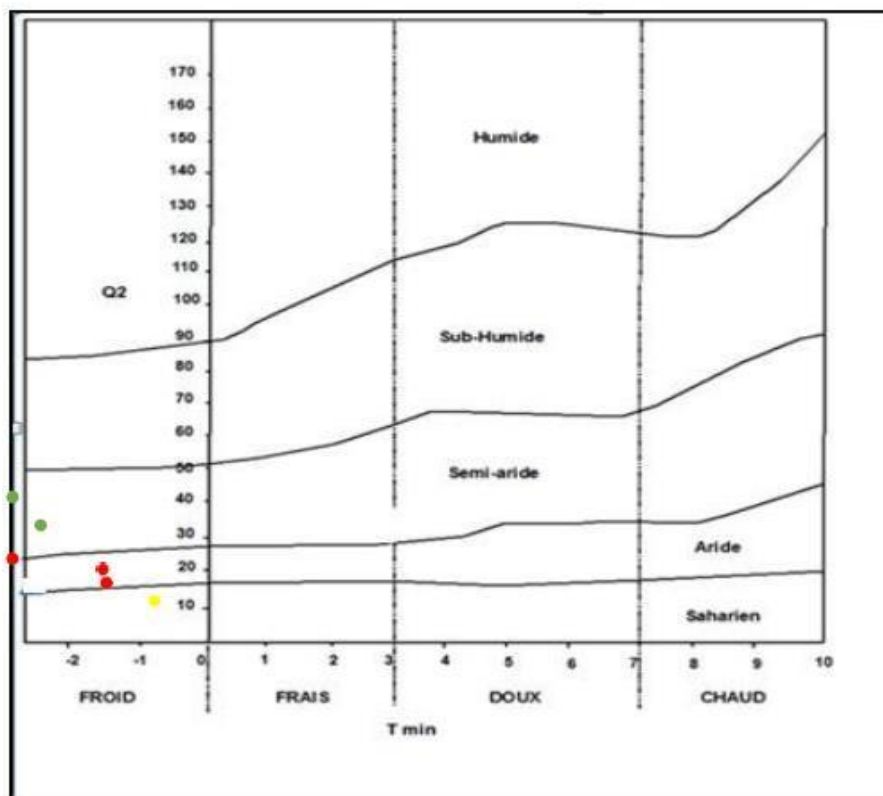


Figure II.4 : Quotient pluviométrique des stations climatologiques utilisées sur le climatogramme d'EMBERGER

La projection des caractéristiques climatiques des points satellitaires de la wilaya de M'sila dans le climatogramme d'Emberger (Fig. II.6) met en évidence la transition entre deux grands ensembles naturels : le Tell au nord et l'Atlas Saharien au sud. Cette transition se manifeste par une alternance de zones montagneuses et de plaines, ce qui contribue à la diversité des milieux bioclimatiques à travers le territoire de la wilaya.

La station de Sidi Aïssa, située au sud de la wilaya, se trouve dans l'étage climatique saharien. Les stations de Bousaada et M'sila, situées au centre, relèvent de l'étage aride. Quant aux stations de Magra et Ouled Mansour, situées plus au nord, elles se classent dans l'étage semi-aride. Cette variété de climats est traduit par la diversité topographique et la richesse écologique et la complexité des conditions naturelles qui caractérisent la wilaya de M'sila (Kaabeche, 1990).

Le territoire de la wilaya de M'sila peut être subdivisé en trois zones climatiques distinctes :

➤ Au sud, dans la région de l'Atlas Saharien (zones de Bousaada, Sidi Aïssa, Ain El Melh), où l'altitude est généralement comprise entre 800 et 900 mètres, les précipitations sont faibles, avec des étés très chauds et des hivers froids. Le climat y est typiquement saharien à aride.

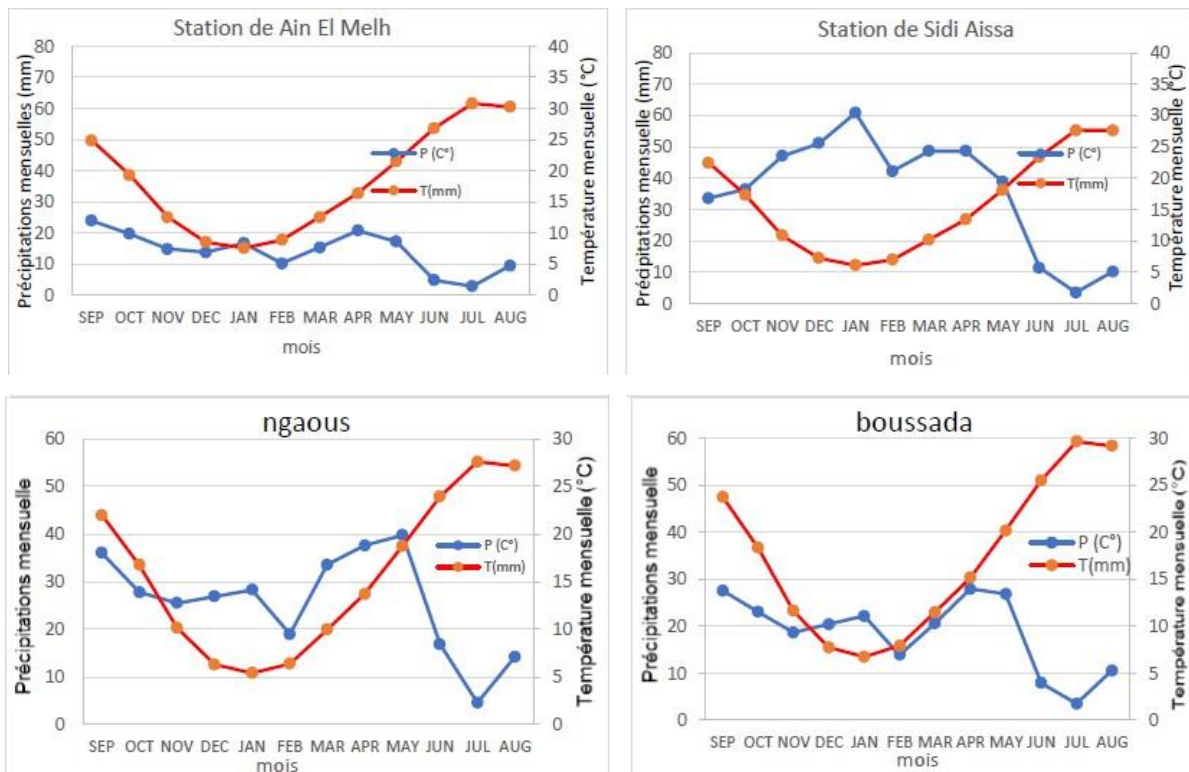
➤ Au centre, correspondant à la cuvette du Hodna (zones de M'sila, Khoubana...), constituée de plaines à des altitudes variant entre 400 et 700 mètres, cette zone est isolée des influences maritimes par les reliefs du Tell. Elle subit souvent des tempêtes de sable venues de l'Atlas Saharien. Le climat y est aride, avec des hivers rigoureux marqués par le gel, et des étés très chauds. (Kebiche, 2017).

➤ Au nord, dans la région de l'Atlas Tellien (notamment Magra et Ouled Mansour), culminant jusqu'à 1800 mètres d'altitude dans les monts du Titteri, le climat est plus arrosé, allant de semi-aride à sub-humide. Cette zone bénéficie de conditions climatiques relativement plus douces, surtout en période hivernale. (Kebiche, 2017).

Cette diversité climatique à l'échelle de la wilaya de M'sila reflète la complexité de son relief et la position stratégique qu'elle occupe entre les grands ensembles naturels du nord de l'Algérie.

II.3.5 Diagramme ombrothermique de Gausson et Bagnouls

C'est un outil graphique qui permet de visualiser la relation entre les précipitations et les températures moyennes mensuelles, fournissant des informations précieuses sur la durée et l'intensité des périodes de sécheresse. Les diagrammes ombrothermiques des points étudiés dans la wilaya de M'sila sont illustrés dans la Fig II.5 suivante.



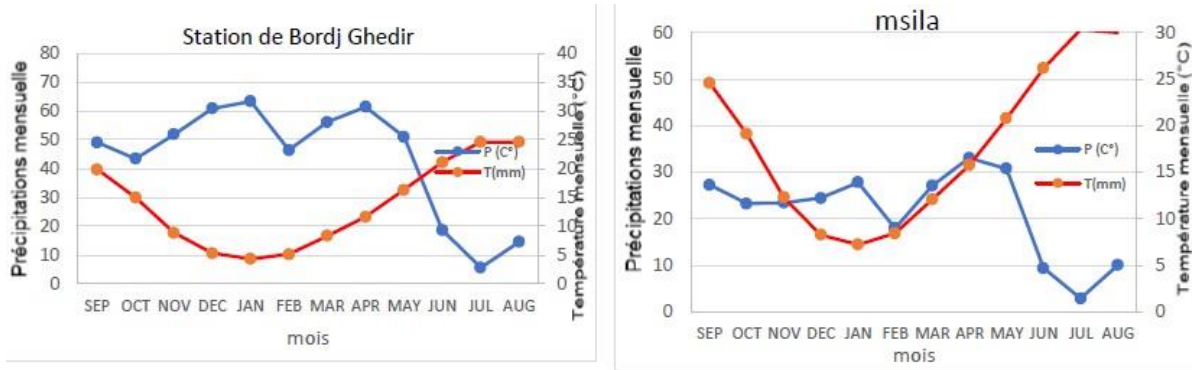


Figure II.5 : Courbes ombrothermiques des stations climatiques étudiées.

L'analyse de la Fig II.5 montre que l'intersection entre la courbe des précipitations et celle des températures permet d'identifier deux périodes climatiques distinctes : une période humide et une autre sèche, selon la position relative des courbes. La durée de ces périodes varie d'une station à une autre. Par exemple, les stations de Magra et Sidi Aïssa, situées respectivement au nord et au sud de la wilaya, présentent une période humide d'environ 7 mois, allant de l'automne jusqu'au début du printemps. La période sèche, quant à elle, couvre les 5 mois restants de l'année, traduisant un climat relativement plus humide comparé à d'autres régions de la wilaya.

La période sèche dans la wilaya de M'sila varie selon les zones géographiques. Elle est plus marquée à la station de M'sila et celle de Ouled Mansour (anciennement N'Gaous) où elle s'étend sur environ 7 mois. À Boussaada, la période sèche est encore plus longue, atteignant 10 mois au cours de l'année. Quant à la station de Sidi Aïssa, située au sud de la wilaya, la sécheresse s'étale pratiquement sur toute l'année, ce qui témoigne d'un climat à tendance saharienne.

II.4 Morphologie des sols

La morphologie des sols dans la wilaya de M'sila résulte de plusieurs facteurs naturels, notamment la variation des altitudes, la proximité du Chott El Hodna et la nature des dépôts sédimentaires qui s'y trouvent. Cette combinaison génère une diversité remarquable de sols allant des sols minéraux peu développés jusqu'aux sols halomorphes, en passant par des sols calcimagnésiques et faiblement évolués (Fig II.6). La carte des sols a été téléchargée du site officiel de la FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture) ce qui permet une analyse approfondie de la nature des sols dans la wilaya de M'sila.

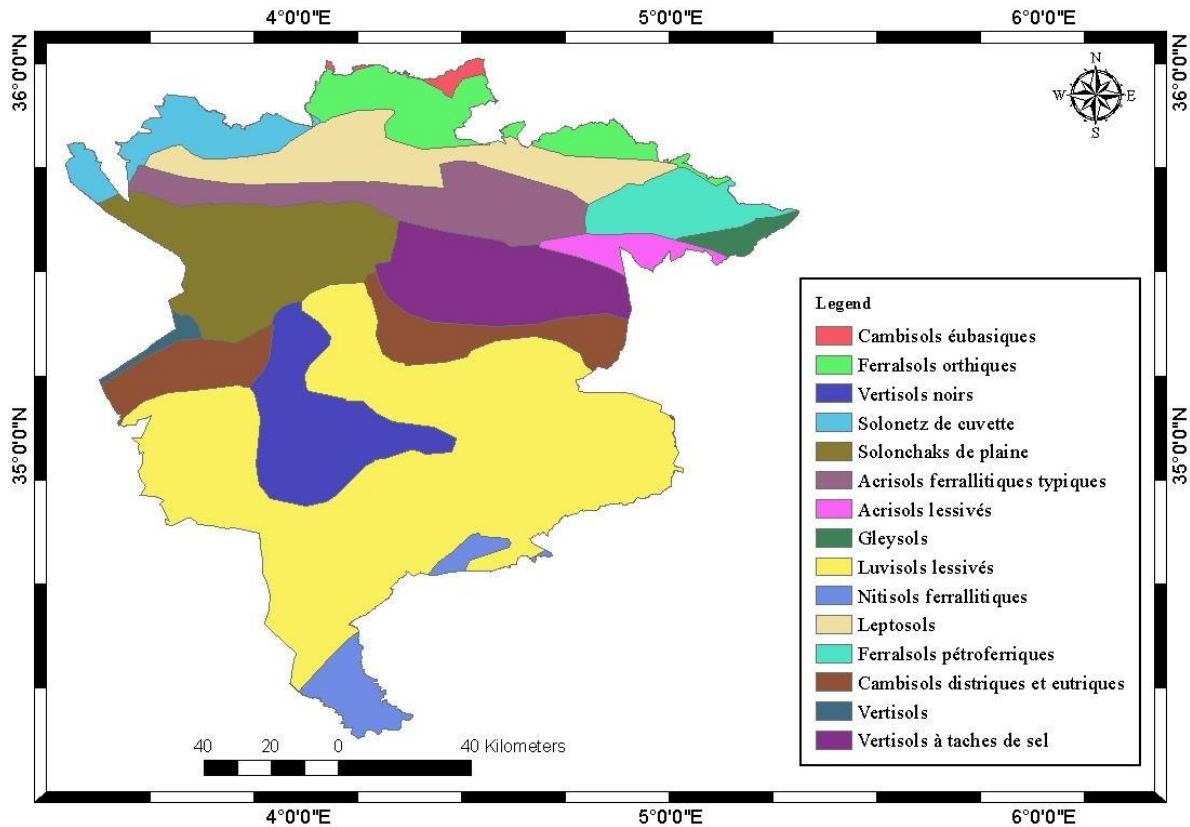


Figure II.6 : Carte des types de sols de la wilaya de M'Sila (FAO)

D'après la carte de morphologie des sols (Fig II.6), il ressort que les types des sols constituant la wilaya de M'sila sont :

➤ **Cambisols éubasiques**

Présents au centre sud-ouest, ces sols jeunes et bien structurés sont modérément fertiles et bien perméables. Ils conviennent à diverses cultures si une gestion agricole appropriée est appliquée (FAO, 2025).

➤ **Ferralsols orthiques**

Localisés au sud-ouest, ce sont des sols tropicaux profondément altérés, pauvres en nutriments mais stables. Leur faible fertilité nécessite des amendements pour une utilisation agricole (FAO, 2025).

➤ **Vertisols noirs**

Situés au centre ouest, ces sols argileux se fissurent en saison sèche. Ils sont naturellement fertiles, mais difficiles à travailler sans techniques agricoles adaptées (FAO, 2025).

➤ **Solonetz de cuvette**

Dans l'extrême sud, ces sols salins et alcalins sont compacts et peu perméables. Leur mise en valeur exige un drainage efficace et des corrections chimiques (FAO, 2025).

➤ **Solonchaks de plaine**

Localisés au sud-est, ils sont très salins et souvent inondés. Ils peuvent être cultivés (notamment pour le riz) avec une gestion hydrique rigoureuse (FAO, 2025).

➤ **Acrisols ferrallitiques typiques**

Au centre de la région, ces sols sont acides et très lessivés. Leur faible fertilité et leur sensibilité à l'érosion nécessitent une gestion prudente (FAO, 2025).

➤ **Acrisols lessivés**

Situés au centre-sud-est, ils sont fortement lessivés et acides. Leur productivité dépend de l'apport d'amendements et de pratiques anti-érosives (FAO, 2025).

➤ **Gleysols**

Dans l'extrême nord-est, ces sols hydromorphes sont saturés d'eau et riches en matière organique. Un bon drainage est essentiel pour leur exploitation agricole (FAO, 2025).

➤ **Luvisols lessivés**

Au nord-est, ils présentent une accumulation d'argile modérée et une fertilité moyenne. Ils sont cultivables avec un enrichissement organique et minéral (FAO, 2025).

➤ **Nitisols ferrallitiques**

Au centre sud-est, ces sols tropicaux sont profonds, bien structurés et très fertiles (FAO, 2025).

➤ **Leptosols**

Dans l'extrême nord-ouest, ce sont des sols peu profonds et très pierreux. Leur usage agricole est limité, convenant plutôt au pâturage ou à la végétation naturelle (FAO, 2025).

➤ **Ferralsols pétroferriques**

Situés au sud-est central, ces sols contiennent une croûte ferrugineuse dure qui limite leur exploitation. Ils soutiennent principalement la végétation naturelle (FAO, 2025).

➤ **Cambisols distriques et eutriques**

Au nord central, ces sols bien drainés ont une fertilité variable (pauvres pour les distriques, modérés pour les eutriques). Ils sont utilisables avec des amendements adaptés (FAO, 2025).

➤ **Vertisols**

À l'ouest extrême, ces sols argileux se fissurent en saison sèche. Bien que fertiles, ils nécessitent des techniques spécifiques pour prévenir l'érosion et optimiser la gestion de l'eau (FAO, 2025).

➤ **Vertisols à taches de sel**

Dans l'extrême nord-ouest, ces Vertisols présentent une salinité partielle qui réduit leur productivité. Une gestion ciblée est nécessaire pour leur valorisation (FAO, 2025).

II.5 Occupation du sol

La carte d'occupation des sols (Fig II.7) a été établie par télédétection en utilisant le logiciel « Arc Gis 10.3 », selon les étapes suivantes :

- Acquisition des images satellitaires de la région de M'sila par le capteur LANDSAT, avec une résolution de 30 m,
- Extraction de la zone d'étude.
- Une classification non supervisée est établie.

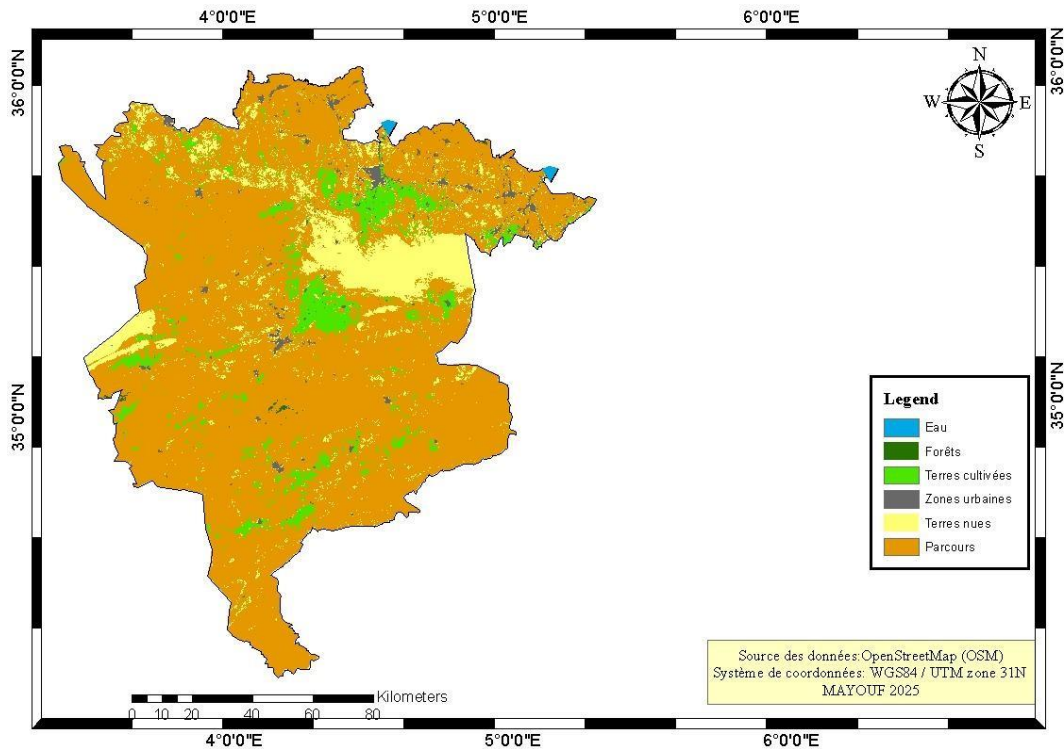


Figure II.7 : Carte d'occupation du sol du wilaya de M'sila

La carte d'occupation du sol de la wilaya de M'sila illustre la répartition spatiale des différentes formes de couverture terrestre. Cette représentation cartographique divise le territoire en plusieurs zones. En parcourant la région du nord au sud, on remarque une grande diversité de formations végétales, allant des zones forestières aux steppes, en passant par les dunes de sable et les terres salées. Cette mosaïque botanique reflète fidèlement l'influence combinée de plusieurs facteurs : le climat sec, la nature du sol, ainsi que l'impact des activités humaines sur l'environnement. (Belouadah; 2009). La wilaya de M'sila fait partie du paysage caractéristique des régions steppiques où l'étendue des parcours naturels est grande qui couvre une superficie totale de 1 817 500 hectares. Les principales catégories d'occupation du sol identifiées dans la wilaya de M'sila sont :

- Eau : Les zones bleues représentent les plans d'eau temporaires comme le Chott El Hodna ou certains oueds intermittents, bien que l'eau y soit souvent présente de manière saisonnière ou sporadique.
- Forêts : Représentées en vert foncé, elles se concentrent surtout dans les zones montagneuses au nord-ouest de la wilaya (région de Sidi Aïssa), où la végétation naturelle est relativement dense. Les espèces forestières les plus importantes de M'Sila sont le pin d'Alep (*Pinus halepensis*) et le genévrier de Phénicie (*Juniperus phoenicea L.*). Ces deux espèces occupent de vastes superficies dépassant 86 000 hectares.

- Terres cultivées : Marquées en vert clair, ces zones s'étendent principalement au niveau des plaines centrales et dans les pourtours de l'oasis de Boussaâda, où l'on pratique la culture céréalière, le maraîchage et l'arboriculture.
- Zones urbaines : Codées en gris foncé, elles incluent les agglomérations principales telles que M'sila , Boussaâda , Sidi Aïssa et Hammam Dalaa, où se concentrent les habitations, infrastructures et équipements urbains.
- Terres nues : Identifiables en beige , ces zones couvrent une grande partie du centre et du sud de la wilaya, notamment autour du Chott El Hodna , et se caractérisent par l'absence de couverture végétale.
- Parcours : Très présents dans les zones semi-arides et steppiques de la wilaya, notamment dans les régions de Ain El Melh et Oultem, les parcours sont utilisés comme pâturages pour les troupeaux, notamment les ovins et les caprins. L'alpha est une plante emblématique des steppes, couvre à elle seule environ 200 000 hectares. D'autres espèces végétales sont également présentes, contribuant à la richesse florale de la zone **(CF M'sila; 2019)**.

La diversité de l'occupation du sol dans la wilaya de M'sila reflète la variété des milieux physiques, climatiques et humains, et constitue un indicateur clé pour l'aménagement du territoire et la gestion des ressources naturelles.

Le tableau II.4 analyse la répartition des superficies dédiées aux pâturages et aux forêts (en hectares) dans les différentes communes de la wilaya de M'Sila.

Tableau II.4: Répartition des Pacages et Forêts par Commune dans la Wilaya de M'Sila
(Source DSA, 2025)

Daira	Commune	PACAGES ET PARCOURS (hectares)	FORET (hectares)
M'SILA	M'SILA	9 803	1 197
	Ouled madhi	13 900	0
	Marrif	9 893	0
	Chellal	19 000	0
	K.Ced EL djie	34 000	0
Ouled Derradj	Ouled Derradj	6 230	300
	MTARFA	10 889	250
	Maadid	15 389	6 707
	O.A.Ghoubala	21 019	1 761
	SOUMAMAA	16 950	50
HAMMAM DALAA	HAMMAM DALAA	15 948	13 883
	OUANOGHA	7 182	3 522
	TARMOUNT	11 416	3 069
	OULED MANSOUR	12 895	200
BOUSAADA	BOUSAADA	17 640	1 760
	KHOUBANA	17 144	0
	MCIF	16 878	0
	O.S.IBRAHIM	13 180	0
	HOUAMMAD	55 260	0
	EL HAMEL	909	6 919
	SIDI AMEUR	45 763	7 950
	BEN ZOUH	27 566	0
	TAMSA	25 413	9 948
OULTEM	2 270	5 185	
MAGRA	MAGRA	16 404	2 848
	DEHAHNA	3 400	1 250
	BARHOUM	6 926	604
	AIN EL KHADRA	3 100	100
	BELAIBA	6 525	475
AIN EL HADJEL	AIN EL HADJEL	21 150	1 420
	SIDI AISSA	39 370	650
	BENI HMANE	5 271	1 450
	SIDI HADJRES	31 023	11 911
	BOUTI SAYEH	51 814	0
BEN SROUR	BEN SROUR	32 318	2 112
	OULED SLIMANE	41 350	0
	ZARZOUR	28 340	0
	MED BOUDIAF	44 619	3 220
AIN EL MELH	AIN EL MELH	14 578	50
	BIR FADHA	24 556	1 613
	AIN FERS	20 075	6 583
	SIDI M'HAMED	21 501	0
	AIN ERRICH	98 500	50
DJEBEL MESSAAD	DJEBEL MESSAAD	11 111	28 130
	SLIM	27 420	2 410
	MEDJEDEL	29 622	16 962
	MANAA	13 751	5 516
Total wilaya de msila		1 019 234.00	150 055

Les résultats du tableau II.4 indique que la superficie totale des pâturages dans la wilaya de M'sila s'élève à environ 1 019 243 hectares et celle des forêts à 150 055 hectares, représentant une exploitation combinée d'environ 1 169 298 hectares du territoire provincial. (Source DSA, 2025). Une différence notable entre les localités concernant l'étendue de ces deux types de ressources naturelles. On observe ainsi des communes avec de vastes zones de pâturage, à comme e d'Aïn Errich avec ses 98 500 hectares, tandis que d'autres se distinguent par des étendues forestières plus importantes, comme Djebel Messaoud avec 28 130 hectares. Ces données offrent un aperçu de l'affectation des terres et du potentiel agricole et forestier de chaque région de la province.

II.6 Ressources en eau

La wilaya de M'sila fait partie du grand bassin endoréique du Chott El Hodna qui reçoit les eaux de pluie de plusieurs vallées qui coulent vers la plaine du Chott. La wilaya de M'Sila bénéficie de ressources en eau souterraines et superficielles considérables, jouant un rôle fondamental dans le développement agricole de la région. Il contient des aquifères de surface salins et non potables, ainsi que des aquifères souterrains profonds tels que la plaine de Nadhida al-Hadna et la plaine d'Ain al-Rish. (Kebiche, 1993). Les ressources en eau de surface proviennent principalement des eaux de pluie collectées dans les barrages, notamment ceux de Ksob et Soubella, ainsi que dans 6 retenues collinaires, permettant l'irrigation d'une superficie agricole estimée à 2 062 ha (Tab II.5). En ce qui concerne les ressources en eau souterraine, la wilaya dispose de 8 425 forages privés et 27 forages publics, auxquels s'ajoutent 1 302 puits traditionnels, contribuant à l'irrigation d'environ 511 221,11 ha de terres agricoles. Par ailleurs l'irrigation par sources naturelles couvre une superficie de 230 ha, tandis que l'irrigation par pompage au fil de l'eau permet d'arroser environ 8 230 ha (Tab II.5). Ces ressources hydriques, bien qu'hétérogènes en qualité et en répartition, représentent un potentiel stratégique pour la gestion agricole et la sécurité hydrique de la wilaya, notamment dans un contexte climatique aride et de forte demande en eau.

Tableau II.5: Surfaces agricoles irrigués à partir des ressources en eau de surface dans le wilaya de M’Sila (Source DRE, 2025).

wilaya	Forages (prv)		Forages (publ)		puits		Barrages		Retenue collinaire		sources		Pompage au Fil de l'eau	
	Nbr	Surf (ha)	Nbr	Surf (ha)	Nbr	Surf (ha)	Nbr	Surf (ha)	Nbr	Surf (ha)	Nbr	Surf (ha)	Nbr	Surf (ha)
M'sila	8425	49020.96	27	8516	1302	2100.15	2	2000	06	62	7	230	22	8230

II.7 Agriculture

La wilaya de M’sila est reconnue par sa vocation agro-pastorale, principalement en raison de l’étendue de ses parcours naturels. Elle couvre une superficie totale de 1 817 500 hectares, répartie selon les catégories d’occupation du sol suivantes :

- Surface agricole utile (SAU) : Elle représente environ 277 592 hectares, soit 15,27 % de l’ensemble du territoire de la wilaya (DSA, 2025).
- Terres de parcours et de pacage : Elles occupent une part majoritaire avec 1 029 564 hectares, soit 62,52 % de la surface agricole totale. Ces espaces sont essentiels pour l’élevage extensif (DSA, 2025).

La répartition des superficies irriguées selon le système d’irrigation et les types de cultures dans la wilaya de M’Sila est donnée au tableau II.6.

Tableau II.6 : Répartition des superficies irriguées selon le système d’irrigation et les types de cultures dans la wilaya de M’Sila (DSA, 2025).

wilaya	System d'irrigation	Marîchage	Arbori-culture	Céréaliculture	Fourrages	Cultures indistrielles	Superficie irriguée développée
M'sila	Gravitaire	1702,25	7016,25	13630.73	4107,5	0	22481,98
	Aspersion	4257,85	2	19730,5	7559,5	0	31549,85
	Localisé	487,48	4355,55	0	0	0	4843,03
	Total	6447,83	11373,8	33361.23	11667	0	61874,86

Le résultats du tableau II.6 indiquent que la superficie totale irriguée développée atteint 61 874,68 hectares, avec une prédominance du système d'aspersion (31 459,85 ha), suivi du système gravitaire (22 481,98 ha), tandis que l'irrigation localisée reste limitée à 4 843,03 ha (Tab II.6). En ce qui concerne les cultures, la céréaliculture domine l'usage des terres irriguées avec 32 386,23 ha, dont 975 ha sont consacrés aux cultures vivrières. L'arboriculture représente également une part importante avec 11 373,8 ha, ce qui reflète l'intérêt croissant pour les cultures pérennes dans la région. Les fourrages occupent 11 667 ha, tandis que le maraîchage couvre une superficie totale de 6 447,83 ha, dont une petite partie est exploitée sous serres plastiques (206,48 ha). À noter l'absence de cultures industrielles recensées dans ces superficies. (DSA, 2025).

Ces chiffres témoignent de la diversification agricole de la wilaya de M'Sila ainsi que de l'adoption progressive de techniques d'irrigation modernes, bien que l'irrigation gravitaire reste encore très utilisée, notamment pour les céréales. Cela souligne la nécessité d'une meilleure gestion de l'eau pour améliorer l'efficacité de l'irrigation et optimiser la production agricole. (Source DSA, 2025)

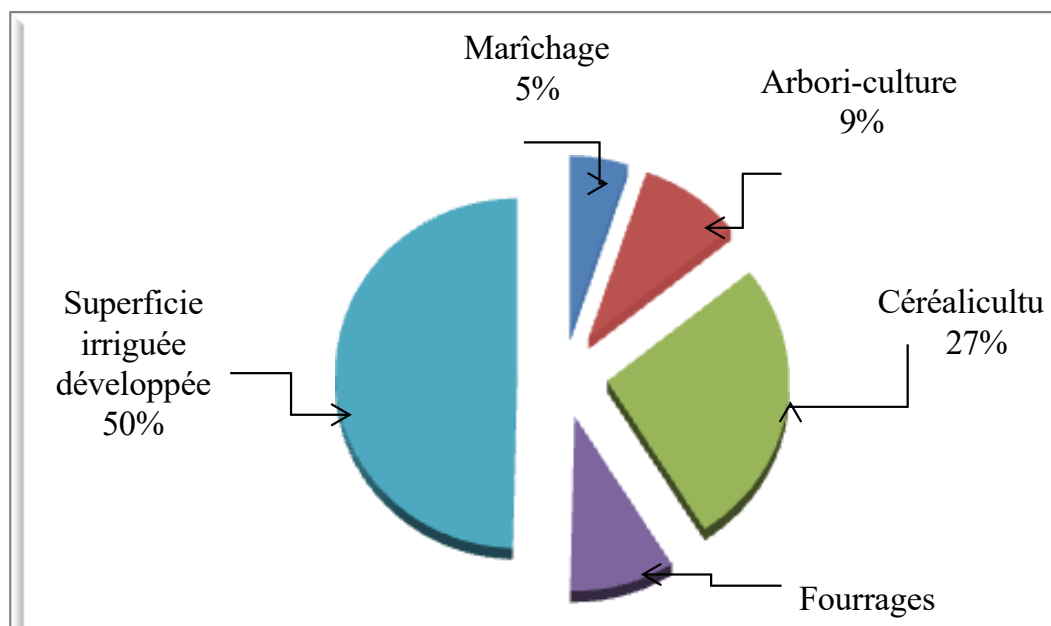


Figure II.8 : Répartition des superficies irriguées selon le système d'irrigation et les types de cultures dans la wilaya de M'Sila

Répartition des superficies agricoles par commune par type de production est donnée au tableau II.7 suivant

Tableau II.7 : Répartition des superficies agricoles par type de production et commune dans la wilaya de M'Sila (DSA, 2025)

Daira	Commune	Céréales (hectares)	Arboriculture fruitiers (hectares)	cultures Fourrages (hectares)	Cultures maraicheres (hectares)
M'SILA	M'SILA	3017	464	1219	68
	Ouled madhi	2756	140	42	66
	Marrif	3092	573	217	867
	Chellal	1261	80	925	13
	K.Ced EL djie	3092	573	217	867
Ouled Derradj	Ouled Derradj	946.5	189	81	193
	MTARFA	2334.25	239	11	39
	Maadid	25	209	100	5
	O.A.Ghoubala	87	146	4171	0
	SOUMAMAA	1597	92	402	159
HAMMAM DALAA	HAMMAM DALAA	636	1108	21	16
	OUANOGHA	409	363	1146	9
	TARMOUNT	296.5	277	55	17
	OULED MANSOUR	6741	298	266	9
	BOUSAADA	295.5	237	648	786
BOUSAADA	KHOUBANA	904.5	882	283	292
	MCIF	952	1408	22	98
	O.S.IBRAHIM	79	533	50	25
	HOUAMMAD	1336.5	419	36	336
	SIDI AMEUR	854	395	38	432
	BEN ZOUH	1036.5	228	213	42
	TAMSA	865	215	894	187
	OULTENE	92.5	197	3080	14
	MAGRA	391.5	883	631	46
MAGRA	DEHAHNA	125.5	162	130	18
	BARHOUM	50	172	180	2
	AIN EL KHADRA	305	489	217	181
	BELAIBA	198.5	355	143	31
	AIN EL HADJEL	2890.5	237	683	30
AIN EL HADJEL	SIDI AISSA	3097.5	98	348	0
	BENI ILIMENE	883.5	47	733	0
	SIDI HADJRES	2734.5	59	2943	0
	BOUTI SAYEH	3035.5	189	839	38
	BEN SROUR	1404.5	308	984	210
BEN SROUR	OULED SLIMANE	76	17	962	53
	ZARZOUR	118	17	1377	1
	MED BOUDIAF	840	122	1403	295
	AIN EL MELH	1380.5	309	211	702
AIN EL MELH	BIR FADHA	473	100	19	152
	AIN FERS	183	36	0	26
	SIDI M'HAMED	1991	133	309	367
	AIN ERRICH	1583	234	3684	1002
	DJEBEL MESSAAD	2290.95	541	2019	167
DJEBEL MESSAAD	SLIM	1675	312	1018	65
	MEDJEDEL	2198	243	2913	223
	MANAA	1128	78	391	52
	Total wilaya de msila	53832.2	10593	33338	6415

Ce tableau présente la répartition des superficies agricoles dans les différentes communes de la province de M'Sila, en mettant en évidence la superficie (en hectares) des terres allouées à quatre principaux types de production : les céréales, la culture fruitière, le fourrage et l'horticulture. L'analyse révèle que la commune **d'Ouled Mansour** possède la plus grande superficie allouée à la culture céréalière (**6 741 hectares**) , tandis que la commune de **MCIF** domine la culture fruitière (**1 108 hectares**) . En matière de fourrage, la commune **d'Ouled Addi El Kabala** se classe au premier rang avec une superficie de (**4.171 hectares**) , tandis que la commune **d'Ain Rich** possède la plus grande superficie de maraîchage (**1.002 hectares**). La superficie agricole est estimée à (**104 178,2 hectares**).

Ces données permettent une comparaison directe de la répartition des terres agricoles entre les municipalités de l'État.

Selon les informations données par la direction des services agricoles de la wilaya de M'sila, la production végétale des différentes cultures pratiquées dans la wilaya de M'Sila est :

- Céréales Superficie : 21 840 ha, Production : 460 870 qx
- Maraîchage Superficie : 9 400 ha, Production : 2 512 000 qx
- Arboriculture Superficie : 19 122 ha, Production : 630 465 qx
- Fourrages Superficie : 40 500 ha, Production : 1 430 000 qx

Chapitre III :
Modélisation et régionalisation des
indices de sécheresse

Chapitre III : Modélisation et régionalisation des indices de sécheresse

Introduction

La collecte et le traitement des images satellitaires constituent une étape clé dans l'évaluation de la sécheresse et de la désertification. Ce chapitre utilise des images Landsat et des indices biophysiques (NDVI, LST, VCI, TCI, VHI) pour analyser l'évolution du couvert végétal dans la wilaya de M'Sila. L'analyse a été réalisée à l'aide d'outils de télédétection et de systèmes d'information géographique.

III.1. Choix de la zone d'étude

Dans le cadre de l'analyse des impacts de la sécheresse et de la désertification sur la wilaya de M'Sila, notre étude cible l'ensemble du territoire régional en tant que zone d'étude représentative. Cette région, caractérisée par une variabilité climatique marquée et des épisodes de sécheresse prolongés, subit également des pressions anthropiques importantes telles que le surpâturage, la déforestation pour l'agriculture et la surexploitation des ressources en eau (Hadjab, 1998).

III.2 Méthodologie

Notre méthodologie repose exclusivement sur des outils de télédétection et de systèmes d'information géographique (SIG). Les indicateurs biophysiques suivants (NDVI, LST, VCI, TCI, VHI) ont été utilisés pour calculer et dresser des cartes dynamiques de l'évolution spatiale et temporelle du couvert végétal à l'échelle de la wilaya par analyse de l'évolution de la sécheresse durant les années 2000, 2010 et 2020.

III.3 Données et outils utilisés

III.3.1 Images satellitaires

Dans cette étude, nous avons utilisé des images satellites Landsat 7 (ETM+) qui permet d'obtenir des images fiables et standardisées pour l'analyse de l'évolution de la végétation, de l'utilisation des sols, et de phénomènes environnementaux comme la sécheresse ou la désertification. utilisées. et cartographier les zones vulnérables dans la wilaya de M'Sila.

Le satellite Landsat 7, lancé par la NASA fournit depuis les années 1970 des images continues de la surface terrestre dans huit bandes spectrales. Il est équipé du capteur optique multispectral à haute résolution spatiale (ETM+), embarqué sur le satellite Landsat 7, avec

une résolution spatiale de 30 mètres. pour les bandes optiques et 15 mètres en mode panchromatique.

Les images satellitaires ont été téléchargées depuis la plateforme officielle USGS Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov>) durant les saisons sèches des années 2000, 2010 et 2020. Ces images sont géoréférencées selon le système UTM basé sur le référentiel WGS84.

Tableau III.1 : Caractéristiques techniques du capteur ETM+ (Landsat 7)

(Source : NASA & USGS 2021),

Bande	Nom	Longueur d'onde (μm)	Résolution spatiale (m)	Type
Bande 1	Bleu	0,45 – 0,52	30	Visible
Bande 2	Vert	0,52 – 0,60	30	Visible
Bande 3	Rouge	0,63 – 0,69	30	Visible
Bande 4	Infrarouge proche	0,77 – 0,90	30	Proche IR
Bande 5	Infrarouge moyen (SWIR 1)	1,55 – 1,75	30	Infrarouge moyen
Bande 6	Infrarouge thermique	10,40 – 12,50	60	Thermique
Bande 7	Infrarouge moyen (SWIR 2)	2,08 – 2,35	30	Infrarouge moyen
Bande 8	Panchromatique	0,52 – 0,90	15	Panchromatique

III.3.2 Logiciels

ArcGIS est un système d'information géographique (SIG) développé par ESRI (Environmental Systems Research Institute), qui permet la gestion, l'analyse, la visualisation et la cartographie de données géospatiales. Dans le cadre de cette étude, la version ArcGIS 10.3 a été utilisée pour le traitement des images satellitaires, l'extraction des indices de végétation et la cartographie des zones touchées par la sécheresse dans la wilaya de M'Sila. NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), LST (Land Surface Temperature), VCI (Vegetation Condition Index), TCI (Temperature Condition Index), VHI (Vegetation Health Index)

ArcGIS 10.3 est un logiciel SIG puissant offrant des outils avancés pour l'analyse spatiale, la cartographie et la gestion des données géographiques.

Tableau III.2 : caractéristiques d'ArcGIS 10.3

Caractéristique	Description
Interface conviviale	Interface graphique intuitive facilitant la manipulation des données.
Analyse spatiale avancée	Outils puissants pour l'analyse de couches, requêtes spatiales, et modélisation.
Compatibilité avec données raster/vector	Prend en charge une large gamme de formats (TIFF, Shapefile, GeoTIFF, etc.).
Extension Spatial Analyst	Permet le calcul d'indices tels que NDVI, LST, VCI, etc.
Gestion de bases de données géospatiales	Intégration avec des bases de données comme PostgreSQL, SQL Server, etc.
Projection et géoréférencement	Support complet des systèmes de projection comme WGS84, UTM, etc.
Création de cartes thématiques	Cartographie professionnelle pour l'aide à la décision.
Automatisation via ModelBuilder	Permet la création de flux de travail automatisés pour le traitement de données.

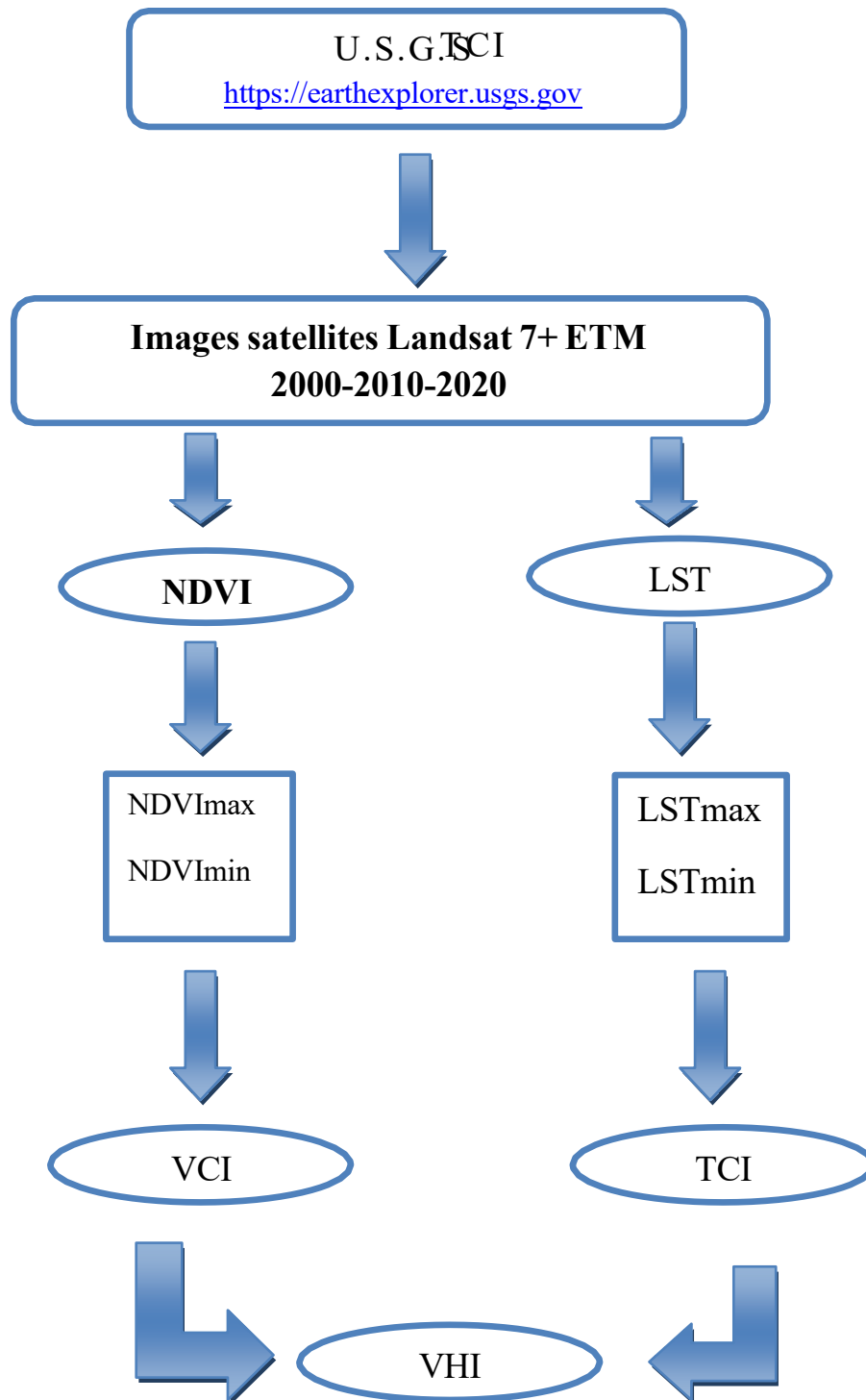


Figure III.1 : Diagramme de flux du calcul du VHI et de la classification de la sécheresse

III.4 Les indices utilisés pour l'évaluation

Pour évaluer la sécheresse dans la wilaya de M'Sila, plusieurs indices biophysiques dérivés des images satellitaires ont été utilisés. Le NDVI mesure la vigueur de la végétation, tandis que le LST renseigne sur la température de surface. Le VCI et le TCI permettent d'évaluer respectivement les conditions de végétation et les stress thermiques. Ces deux derniers sont combinés pour calculer le VHI, un indice global de la santé de la végétation.

III.4.1 NDVI (Indice de Végétation par Différence Normalisée)

Dans le logiciel ArcMap, le calcul de l'indice NDVI se fait généralement à l'aide de l'outil **Raster Calculator** disponible dans l'extension Spatial Analyst. Il suffit d'insérer la formule :

La formule standard du NDVI est

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red) \dots\dots\dots (1.1)$$

$$NDVI = (bande 4 - bande 3) / (bande 4 + bande3) \quad (1.1)$$

en remplaçant les noms des bandes selon l'image utilisée. Cette opération génère une nouvelle couche raster représentant la distribution spatiale de la végétation. L'utilisation du type **Float** permet d'obtenir des valeurs décimales précises entre -1 et 1.

$$NDVI = \text{Float}(\text{Band PIR} - \text{Band Red}) / \text{Float}(\text{Band PIR} + \text{Band Red})$$

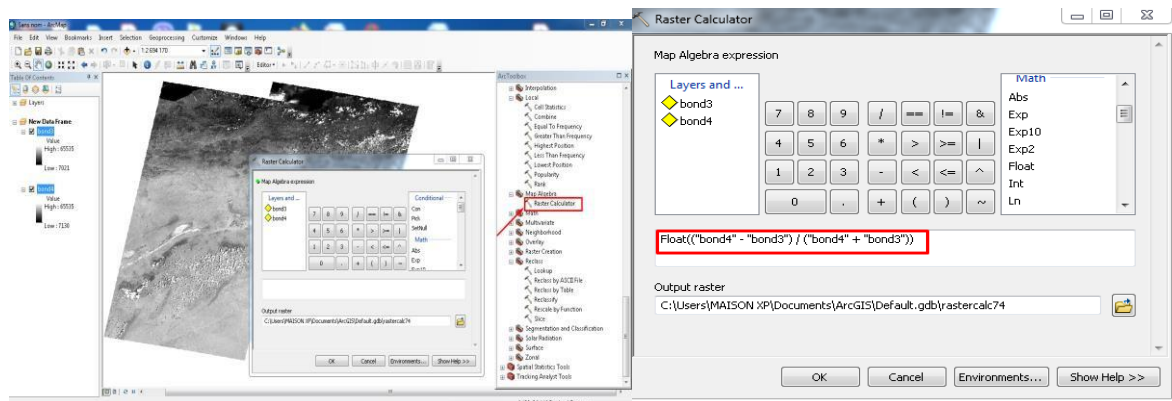


Figure III.2 : Application de la formule NDVI dans le logiciel ArcGIS

III.4.2 LST (Température de Surface du Sol)

Le calcul de la température de surface terrestre (LST) s'effectue à partir de la bande thermique (Band 6 pour Landsat 7). On commence par convertir les valeurs DN en radiance, puis en température en Kelvin à l'aide de la formule fournie par l'USGS. Ensuite, une correction de l'émissivité est appliquée en utilisant la proportion de végétation (Pv). L'ensemble des étapes se réalise à l'aide de l'outil Raster Calculator en combinant les formules :

Lien entre LST et stress hydrique :

La LST est un indicateur indirect mais fiable du stress hydrique des plantes. Une température élevée de la surface du sol est souvent associée à un déficit en eau, notamment lorsque la végétation est clairsemée ou absente. En effet, en l'absence d'évapotranspiration (due à un manque d'eau), la température de la surface augmente rapidement, ce qui accentue le stress hydrique.

Dans cette étape, nous expliquons les étapes du processus d'estimation de la température de surface.

La température de surface terrestre (LST) récupérées par les capteurs infrarouges thermiques des satellites (Price,1989 ; Watkins et Kolokotroni,2007). le processus de calcul en gros modo est synthétisé en six étapes ci-dessous pour chaque capteur :

a- Calcul de la Radiance spectrale TOA (Top of Atmospheric) à partir de DN ;

$$\text{TOA (L)} = \text{ML} * \text{Qcal} + \text{AL} \dots\dots\dots (2.1)$$

D'où :

ML est le facteur de redimensionnement multiplicatif spécifique à la bande à partir des métadonnées (RADIANCE_MULT_BAND_10 = 3.80008-04 où 10 est le numéro de la bande).

Qcal est correspond à la bande 10, et AL le facteur de redimensionnement additif spécifique à la bande à partir des métadonnées RADIANCE_ADD_BAND_10 = 0.300000, où 10 est le numéro de bande).

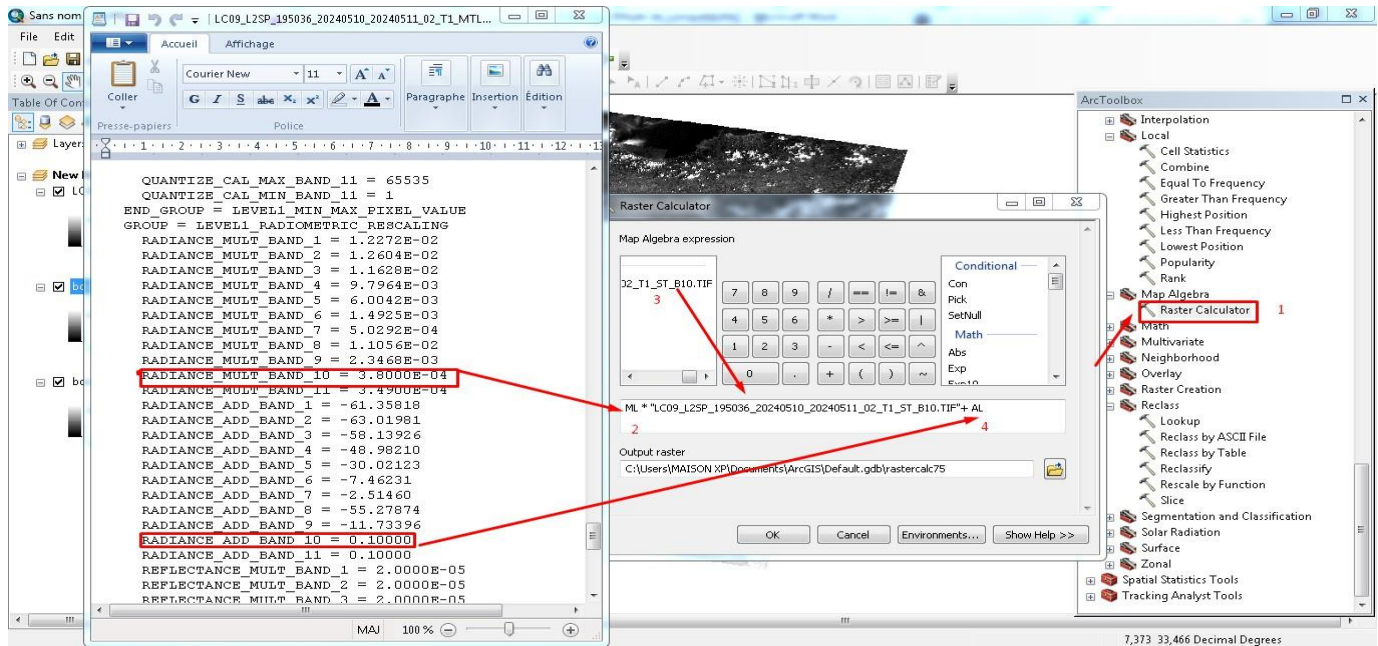


Figure III.3 : Calcul de la Radiance spectrale TOA

b- Conversion de la température TOA en luminosité (Température de brillance)

$$BT = (K2 / (\ln (K1 / L) + 1)) - 273,15 \dots\dots\dots (2.2)$$

D'où :

K1 est la constante de conversion thermique spécifique à la bande à partir des métadonnées (K1_CONSTANT_BAND_x, où x est le numéro de la bande thermique).

K2 est la constante de conversion thermique spécifique à la bande à partir des métadonnées (K2_CONSTANT_BAND_x, où x est le numéro de la bande thermique).

L = TOA

Par conséquent, pour obtenir les résultats en degrés Celsius, la température de rayonnement est ajustée en ajoutant le zéro absolu (environ -273,15 ° C).

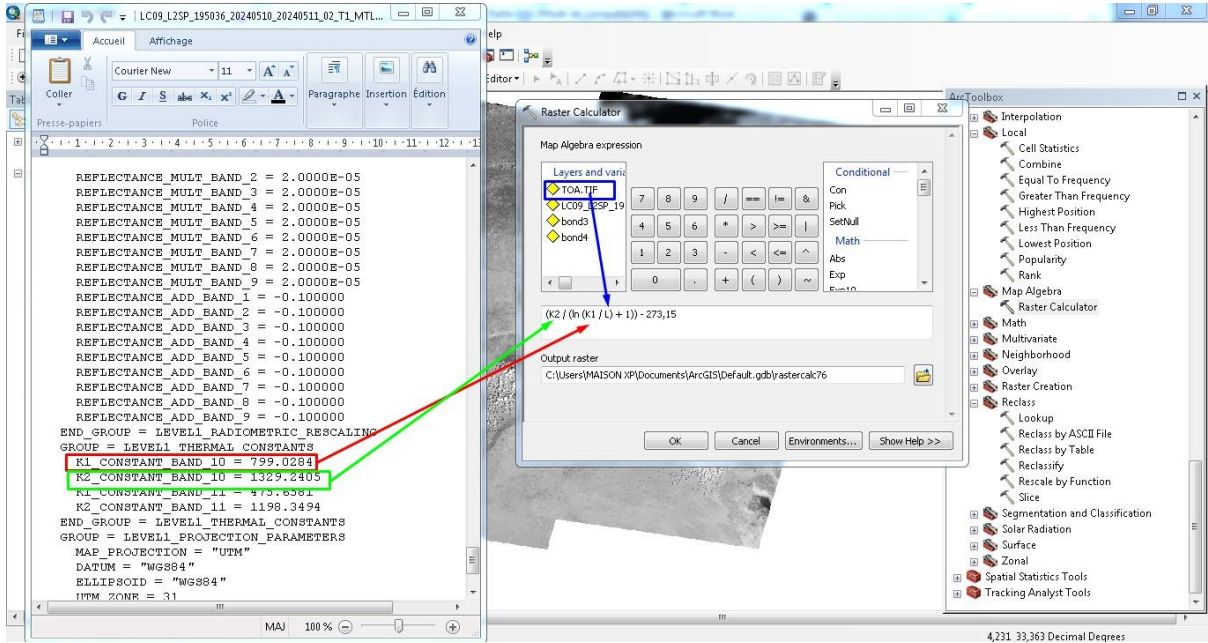


Figure III.4 : Calcul de la température TOA en luminosité(BT)

C- Calculez la proportion de végétation Pv

$$Pv = \text{Carré} ((NDVI - NDVImin) / (NDVImax - NDVImin)) \dots\dots (2.3)$$

En règle générale, les valeurs minimale et maximale de l'image NDVI peuvent être affichées directement dans l'image (dans

ArcGIS,). Sinon, vous devez ouvrir les propriétés du raster pour obtenir ces valeurs.

$$Pv = \text{Square} ((\text{"NDVI"}+0,3921697735786438/0,5825164914131165+0,3921697735786438)).$$

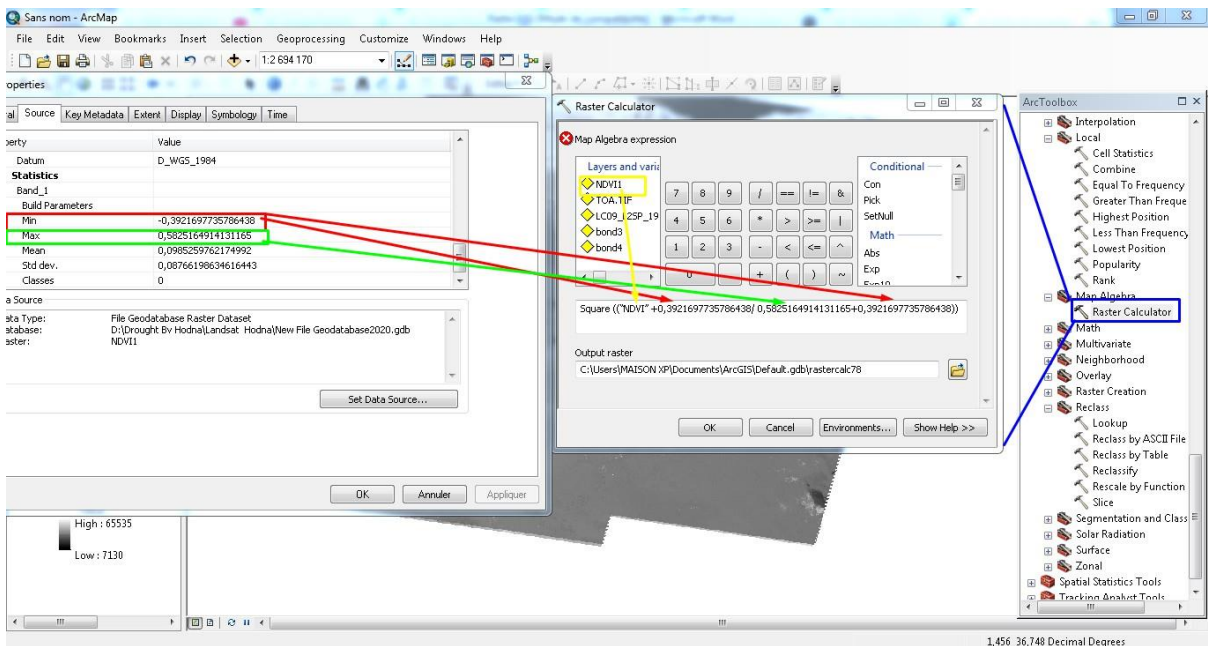


Figure III.5 : Calculez la proportion de végétation Pv

D) Calculer l'émissivité ε

$$\epsilon = 0,004 * Pv + 0,986 \dots \dots \dots (2.4)$$

Appliquez simplement la formule dans la calculatrice raster, la valeur de 0,986 correspond à une valeur de correction de l'équation.

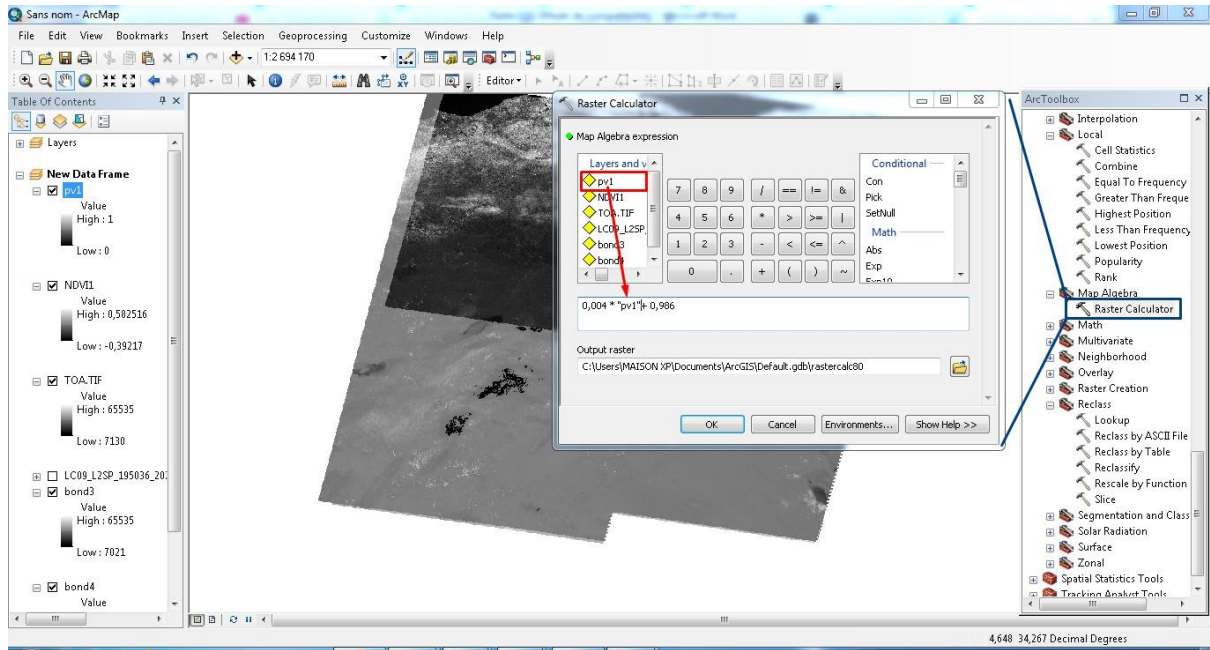


Figure III.6 : Calculer l'émissivité ε

E-Calculer la température de surface terrestre (LST)

$$LST = (BT / (1 + (0,00115 * BT / 1,4388) * Ln(\epsilon))) \dots \dots \dots (2.5)$$

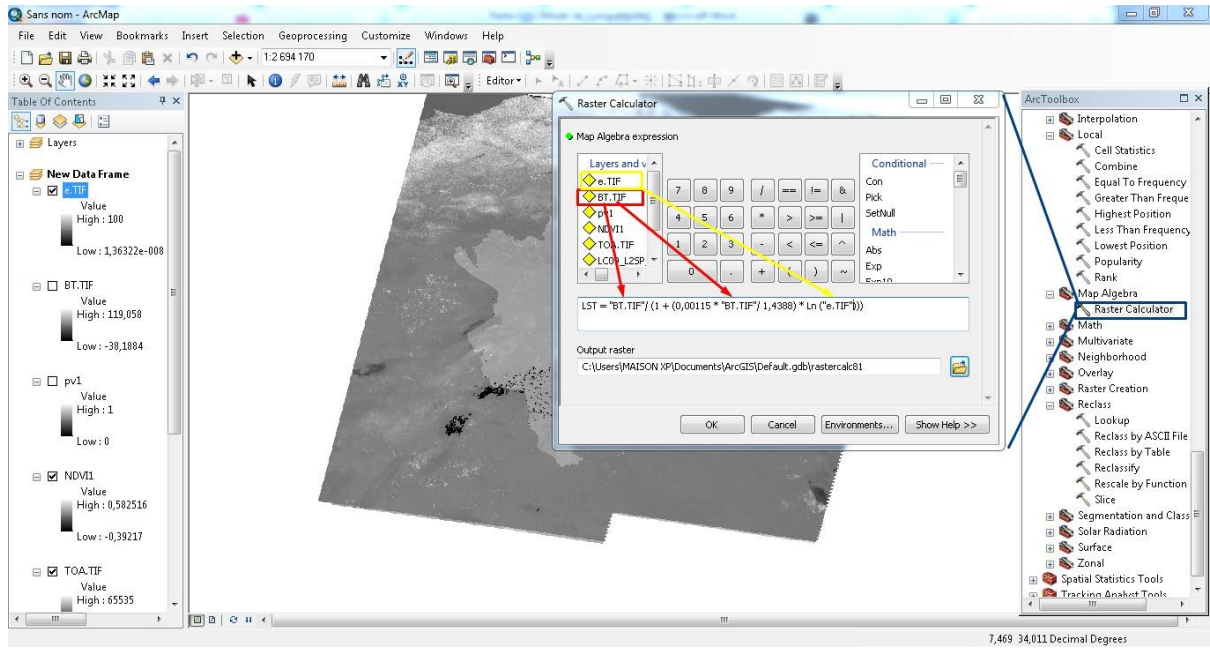


Figure III.7 : Calculer la température de surface terrestre (LST)

III.4.3 VCI (Végétation Condition Index)(Indice de l'état de la végétation)

le calcul du VCI (Vegetation Condition Index) s'effectue à l'aide de l'outil Raster Calculator en utilisant les couches raster du NDVI actuel, ainsi que les valeurs historiques minimale et maximale du NDVI. La formule à insérer est :

$$VCI = 100 \times (NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}) \dots (3.1)$$

Cette opération permet de produire une carte thématique montrant l'état relatif de la végétation et de détecter les zones affectées par la sécheresse.

$$VCI = ("NDVI1" - "NDVImin.TIF") / ("NDVI_{max}.TIF" - "NDVImin.TIF") * 100$$

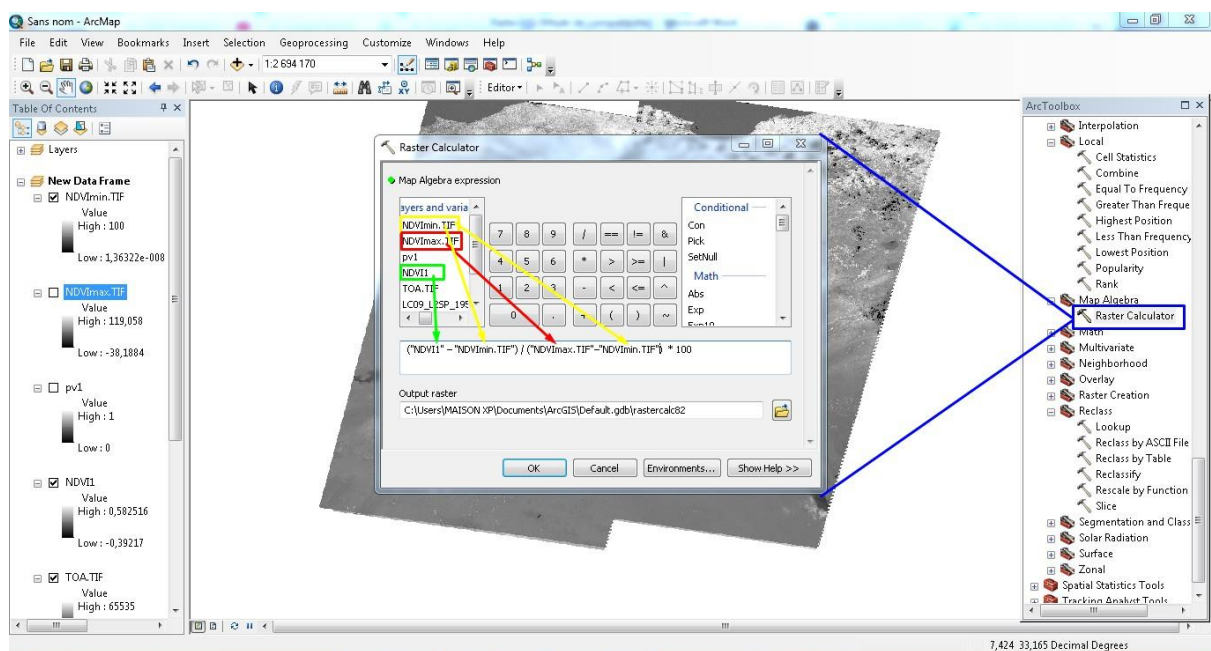


Figure III.8 : Calcul de l'indice de l'état de la végétation

III.4.4 TCI (Indice de l'État Thermique – Temperature Condition Index)

le calcul de l'indice TCI (Temperature Condition Index) s'effectue via l'outil Raster Calculator, en utilisant les rasters représentant la température de surface actuelle (LST) ainsi que ses valeurs historiques maximale et minimale. La formule à utiliser est :

$$TCI = 100 \times (LST_{max} - LST) / (LST_{max} - LST_{min}) \dots (4.1)$$

Ce calcul permet d'identifier les zones soumises à un stress thermique élevé, contribuant à l'analyse des conditions de sécheresse liées à la température.

$$TCI = ("LST_{max}.TIF" - "LST.TIF") / ("LST_{max}.TIF" - "LST_{min}.TIF") * 100$$

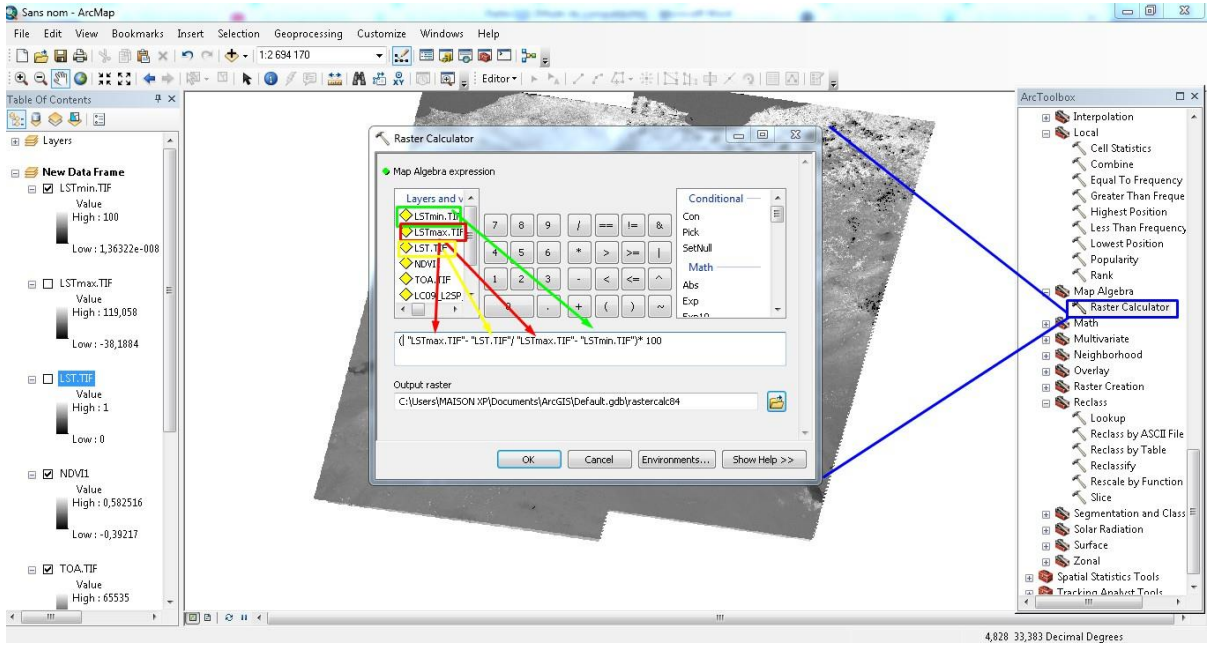


Figure III.9 : Calcul TCI (Indice de l'État Thermique – Temperature Condition Index)

Importance écologique

Le TCI est particulièrement utile dans les régions arides et semi-arides comme l'Algérie, où la température est un facteur déterminant dans la dynamique de la végétation. Il est souvent utilisé en combinaison avec le NDVI et le VCI pour une évaluation plus complète des conditions environnementales.

III.4.5 VHI (Indice de Santé de la Végétation – Vegetation Health Index)

le calcul de l'indice VHI (Vegetation Health Index) s'effectue à l'aide du Raster Calculator, en combinant les couches raster du VCI et du TCI. En utilisant un coefficient de pondération $\alpha = 0,5$, la formule devient :

$$VHI = \alpha \times VCI + (1 - \alpha) \times TCI \dots \dots \dots (5.1)$$

α est un coefficient de pondération (souvent fixé à 0,5 pour donner un poids égal aux deux indices)

D'où :

VCI : indice de condition de la végétation,

TCI : indice de condition thermique.

Cette opération permet d'obtenir une carte synthétique qui reflète la santé globale de la végétation, en intégrant l'effet combiné du stress hydrique et thermique.

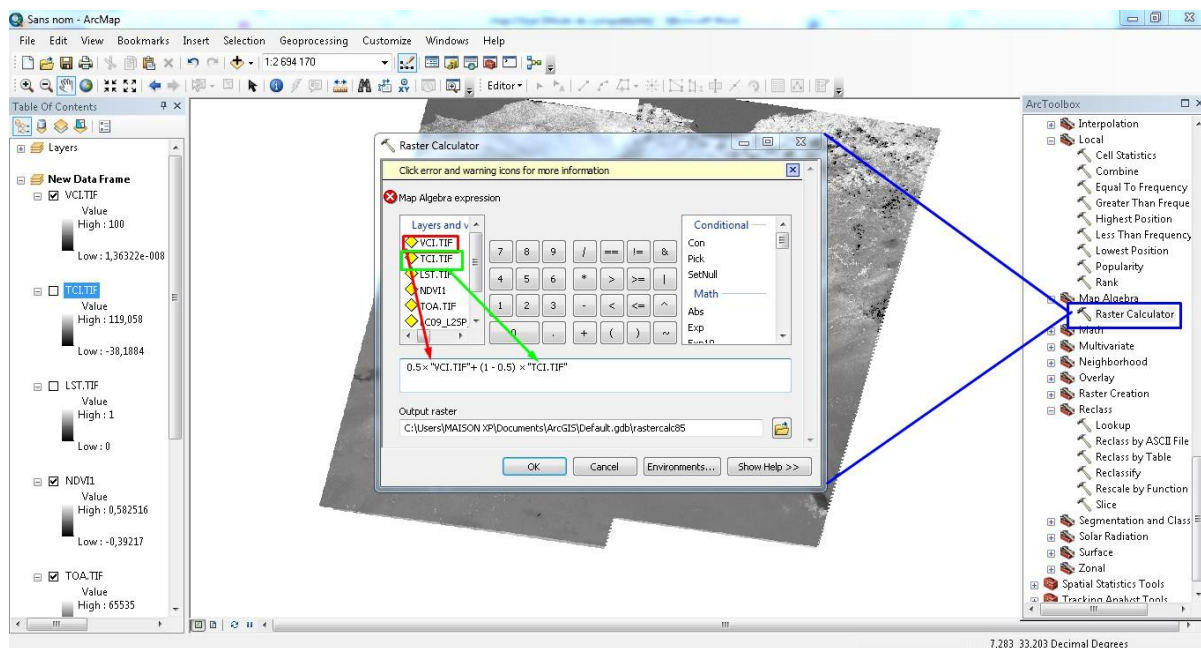


Figure III.10 : Calcul VHI (Indice de Santé de la Végétation – Vegetation Health Index)

Utilité :

Le VHI est largement utilisé pour :

La surveillance de la sécheresse à grande échelle,

La planification de la gestion des cultures,

L'évaluation de l'impact du changement climatique sur les écosystèmes.

III. 5. Résultats et discussion

Dans cette étude, des images satellitaires Landsat 7 des années 2000, 2010 et 2020 ont été utilisées pour analyser l'évolution des indicateurs biophysiques dans la wilaya de M'Sila, notamment la température de surface (LST), le NDVI et l'occupation du sol. Les résultats ont révélé une régression marquée de la végétation naturelle et une élévation des températures, surtout dans les zones sud et centre. En revanche, les zones agricoles irriguées ont conservé des niveaux de NDVI relativement stables, contrairement aux steppes et aux sols nus, fortement dégradés. Les indices VCI, TCI et VHI ont permis de localiser les zones les plus vulnérables à la sécheresse et de proposer des priorités de restauration écologique.

III. 5 .1. NDVI

Dans le cadre de cette étude, des cartes spatio-temporelles de l'indice NDVI ont été produites à partir d'images Landsat des années 2000, 2010 et 2020, afin de suivre l'évolution du couvert végétal et d'évaluer les dynamiques environnementales. Les valeurs du NDVI, comprises entre -1 et +1, indiquent qu'une valeur proche de +1 correspond à une végétation dense et saine, tandis qu'une valeur proche de 0 ou négative reflète des zones urbaines, arides ou peu végétalisées

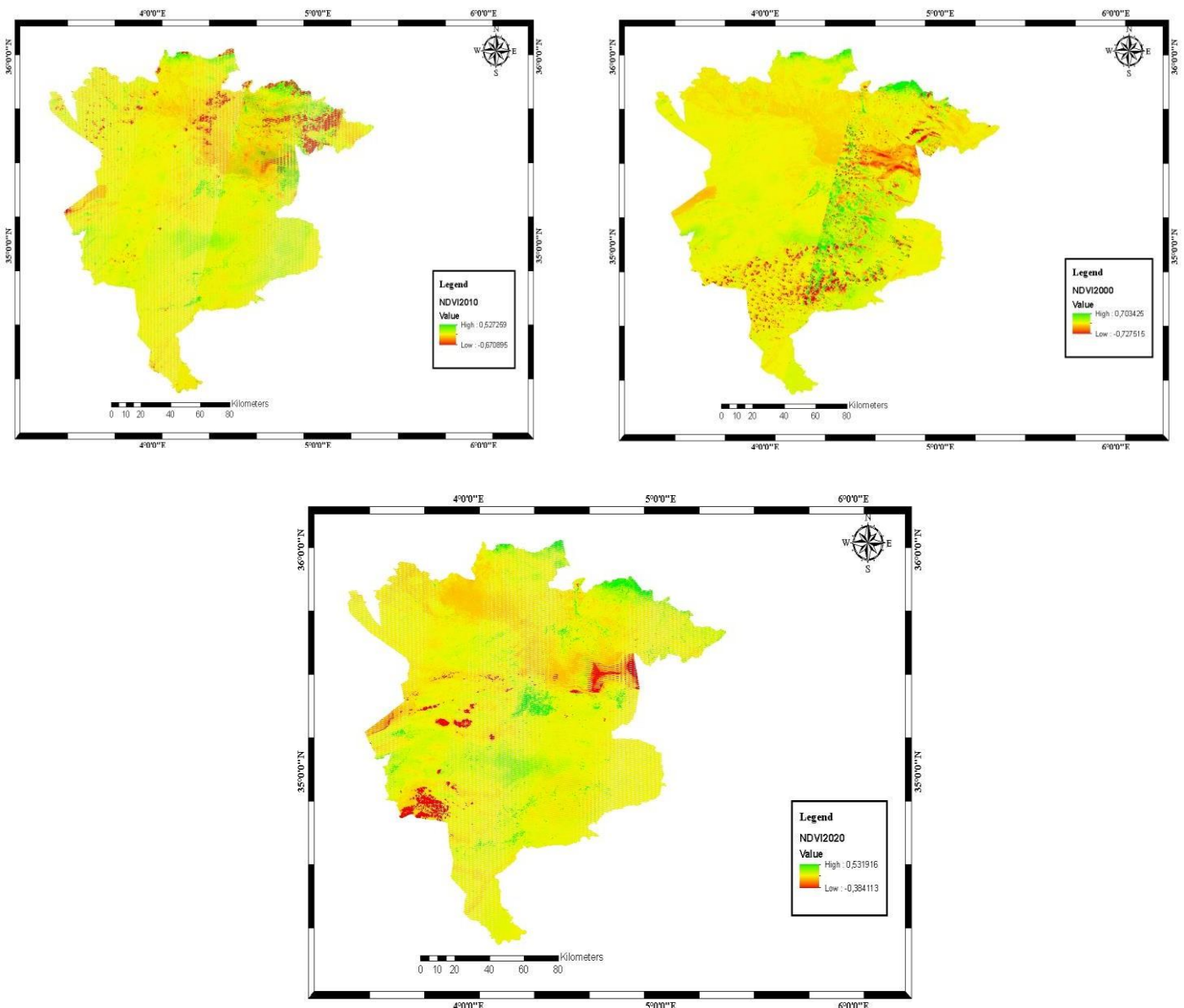


Figure III.11 : Évolution spatio-temporelle de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) dans la wilaya de M'Sila (2000, 2010, 2020)

III. 5. 1. 2 Discussion

1-NDVI Année 2000

La carte NDVI2000 montre une dominance des teintes jaune à vert clair, ce qui reflète une végétation modérée dans plusieurs zones, notamment dans la partie nord-est. Quelques zones en vert vif indiquent une couverture végétale plus dense, localisée dans des poches agricoles ou forestières. À l'inverse, le sud et le centre de la zone présentent des valeurs faibles (zones en rouge/orange), révélant un déficit de couverture végétale, possiblement dû à la sécheresse ou à la pression anthropique.

2-NDVI Année 2010

La carte NDVI2010 indique une régression globale de la végétation par rapport à 2000, avec une extension notable des zones rouges et orange, particulièrement dans le nord et l'est de la zone. Ce changement peut être associé à une intensification de la sécheresse durant cette décennie, ou à une accentuation des activités humaines comme le surpâturage et l'extension urbaine.

3-NDVI Année 2020

En 2020, on observe une légère amélioration par rapport à 2010, avec la réapparition de zones vertes, notamment dans la partie centrale et sud-est. Cela peut être le résultat de politiques de reforestation, de meilleures précipitations ou de l'introduction de techniques agricoles plus durables. Toutefois, certaines zones continuent d'enregistrer de faibles valeurs de NDVI, soulignant une persistance de la vulnérabilité écologique.

III. 5. 2. LST

Ces cartes montrent l'évolution de la température de surface (LST) dans la wilaya de M'Sila pour les années 2000, 2010 et 2020. Grâce à une échelle de couleurs du vert foncé (températures basses) au rouge (températures élevées), elles permettent d'observer les variations spatiales et temporelles. La LST est un indicateur clé des dynamiques environnementales, influencée par la végétation, l'occupation du sol et le climat. Cette série cartographique met en évidence les tendances thermiques et l'impact des changements naturels et humains sur le climat local.

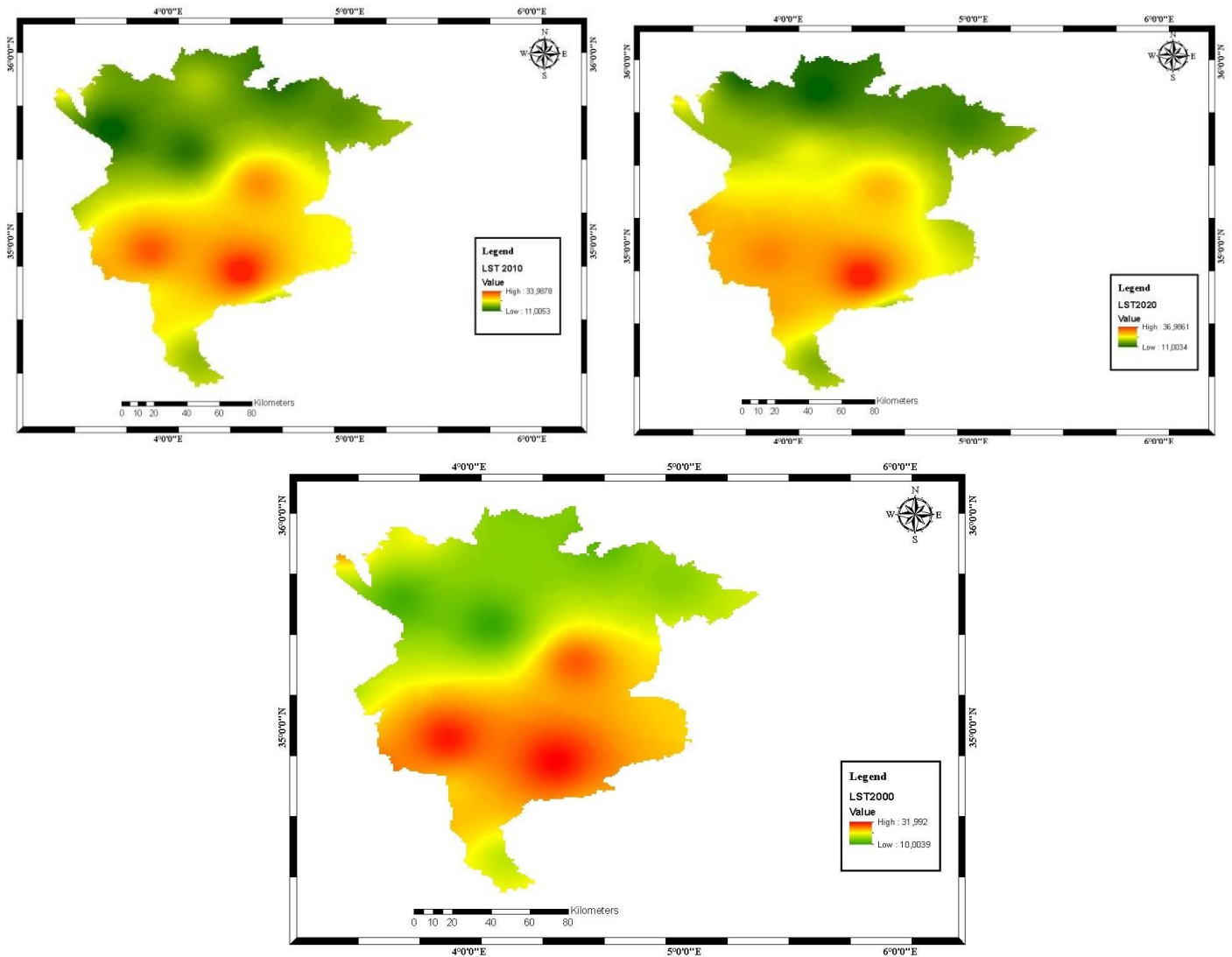


Figure III.12 : Évolution spatio-temporelle de la Température de Surface (LST) dans la wilaya de M'Sila (2000, 2010, 2020)

III. 5. 2. 1 Discussion

En analysant les trois cartes de la Température de Surface (LST) pour les années 2000, 2010 et 2020, des tendances claires et des changements spatio-temporels significatifs peuvent être observés

1. LST 2000

La carte de l'année 2000 révèle une variation des températures de surface entre 10,00 et 31,99 °C. Les températures les plus élevées, représentées en orange et rouge, se concentrent dans les zones sud et centrales de la wilaya, correspondant à des régions arides ou à sol nu. En revanche, les températures plus modérées, visibles en vert, se situent dans le nord et le nord-

est, où la végétation est plus présente ou l'altitude plus élevée, contribuant à un climat plus frais.

2. LST 2010

Entre 2000 et 2010, une hausse générale des températures de surface est observée, avec un maximum atteignant environ 33,97 °C. Les zones chaudes (en orange et rouge) se sont étendues, surtout dans le centre de la wilaya, reflétant une possible dégradation de la couverture végétale ou une intensification des activités humaines et de l'urbanisation. Parallèlement, les zones plus fraîches (en vert foncé) ont régressé, confirmant une tendance au réchauffement sur l'ensemble du territoire.

3. LST 2020

En 2020, la température de surface a atteint un record avec des valeurs avoisinant 36,99 °C, confirmant une tendance marquée au réchauffement. Les zones chaudes (orange et rouge) dominant désormais la majeure partie de la wilaya, notamment au centre et au sud, remplaçant les zones auparavant plus modérées. Cette évolution traduit une dégradation environnementale croissante, liée à la régression de la végétation naturelle, à l'urbanisation, à la sécheresse et aux effets du changement climatique.

III. 5. 3. VCI

Les cartes du VCI pour les années 2000, 2010 et 2020 illustrent l'évolution de la vitalité de la végétation dans la wilaya de M'Sila. Le VCI permet de détecter les zones affectées par le stress hydrique. Des valeurs élevées (en vert) indiquent une bonne santé de la végétation, tandis que des valeurs faibles (en rouge) traduisent un stress sévère. Cette série cartographique met en évidence la dynamique spatio-temporelle de la végétation et la vulnérabilité croissante de la région face à la sécheresse.

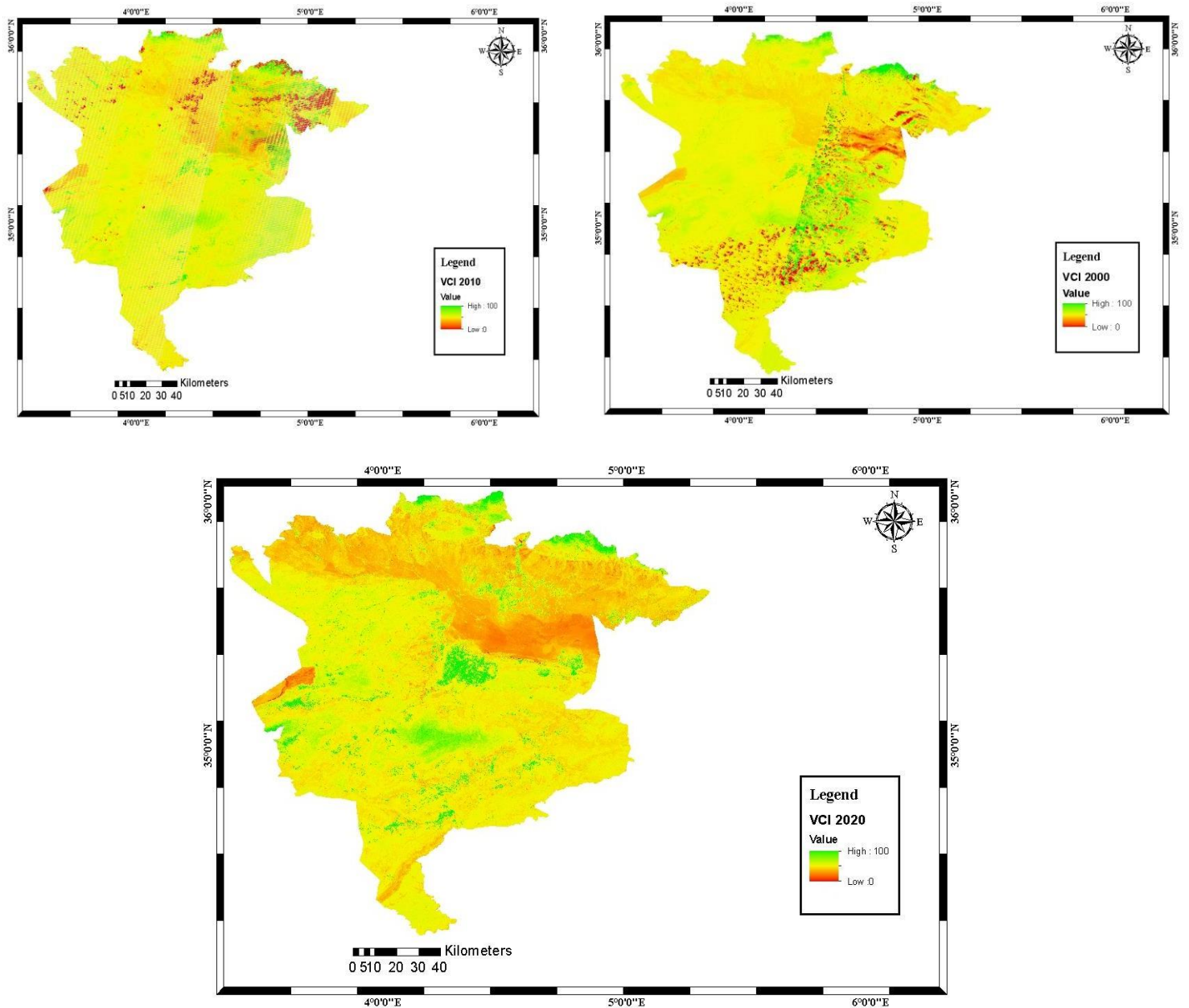


Figure III.13 : Évolution spatio-temporelle de l'Indice de Condition de la Végétation (VCI) dans la wilaya de M'Sila (2000, 2010, 2020)

III. 5. 3. 1 Discussion

L'analyse comparative des cartes VCI pour 2000, 2010 et 2020 révèle des tendances significatives concernant la condition de la végétation et la prévalence du stress hydrique dans la wilaya de M'Sila.

1. VCI 2000

La carte VCI de l'année 2000 montre une dominance de teintes jaunes à vert clair, indiquant une condition végétative modérée à bonne sur l'ensemble de la wilaya. Des zones de stress, en rouge et orange, apparaissent surtout au centre et au sud-est, reflétant une végétation affaiblie. Quelques zones en vert foncé traduisent une végétation en très bon état, probablement localisées dans des régions agricoles irriguées ou plus résilientes face aux aléas climatiques.

2. VCI 2010

La carte VCI de 2010 révèle une aggravation du stress végétal, avec une nette expansion des zones rouges et orange, notamment au centre et à l'est de la wilaya. Les zones de végétation saine se sont réduites, et leur intensité est moins marquée, traduisant une dégradation généralisée. Malgré la présence d'artefacts liés au capteur Landsat 7 (SLC-off), la tendance indique clairement un accroissement du stress hydrique et de la sécheresse par rapport à l'an 2000.

3. VCI 2020

La carte VCI de 2020 montre une persistance et une extension marquée des zones de stress végétal (rouge et orange), couvrant une grande partie du centre et du nord de la wilaya. La dégradation de la végétation semble s'être accentuée par rapport aux années précédentes, avec très peu de zones en bon état. Cette situation reflète une vulnérabilité accrue de la végétation face à la sécheresse, aux effets du changement climatique et aux pressions humaines croissantes.

III. 5. 4. TCI

Les cartes TCI des années 2000, 2010 et 2020 montrent l'évolution du stress thermique dans la wilaya de M'Sila. Des valeurs faibles de TCI (en vert) indiquent des températures de surface modérées, favorables à la croissance végétale, tandis que des valeurs élevées (en orange et rouge) traduisent un stress thermique intense. Cette série chronologique permet de mieux comprendre l'influence du réchauffement climatique et de la sécheresse sur l'état physiologique de la végétation dans la région.

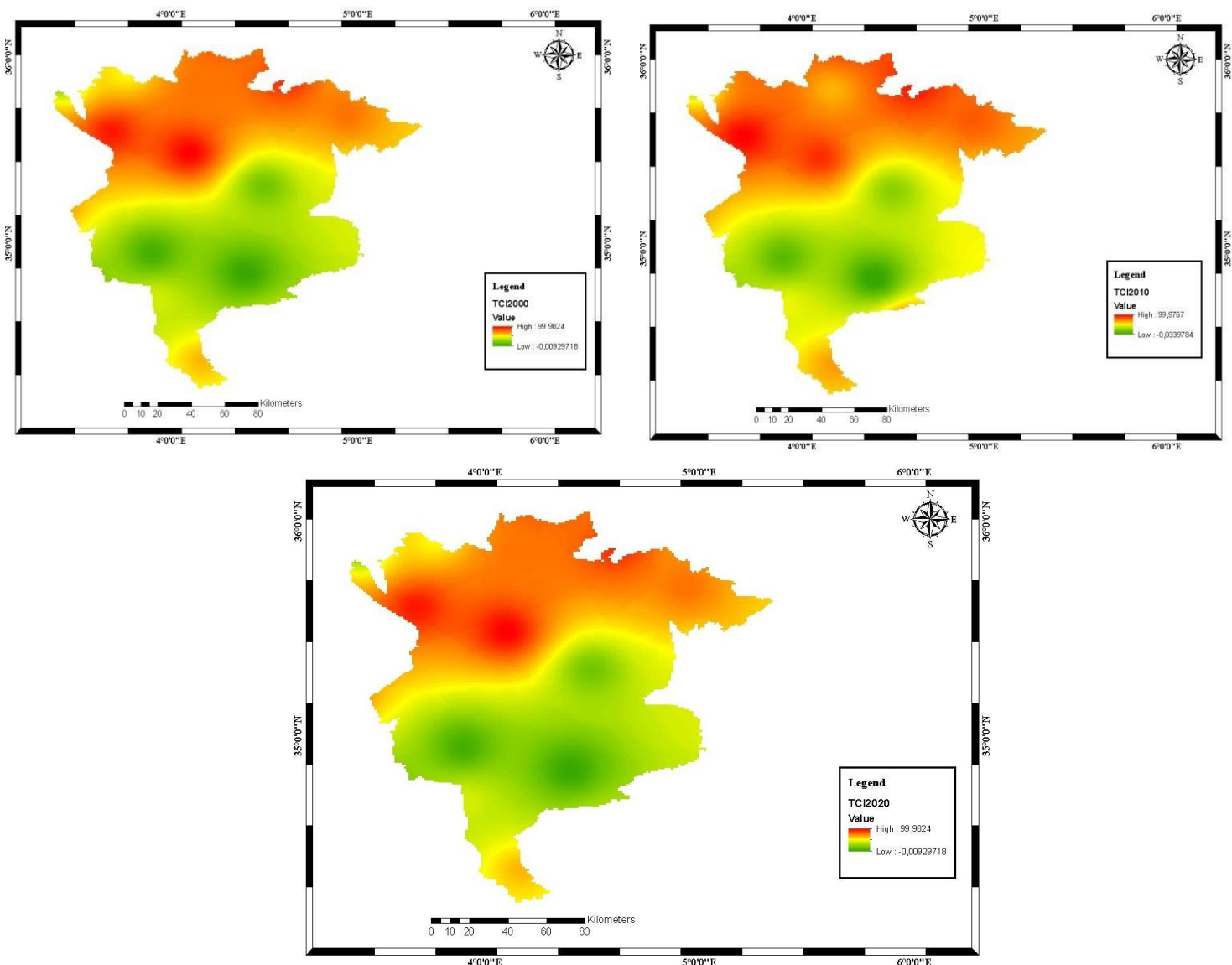


Figure III.14 : Évolution spatio-temporelle de l'Indice de Condition Thermique (TCI) dans la wilaya de M'Sila (2000, 2010, 2020)

III. 5. 4. 1 Discussion

L'examen comparatif des cartes TCI pour 2000, 2010 et 2020 révèle des dynamiques significatives concernant le stress thermique subi par la végétation dans la wilaya de M'Sila.

1. TCI 2000

La carte TCI de l'année 2000 montre une prédominance de zones vertes au centre et au nord de la wilaya, traduisant des conditions thermiques favorables à la végétation. En revanche, les zones en orange et rouge, situées surtout à l'ouest, au nord-ouest et au sud, indiquent un stress thermique élevé, souvent lié à une végétation clairsemée ou dégradée et à des températures de surface plus élevées.

2. TCI 2010

La carte TCI de 2010 révèle une expansion significative des zones de stress thermique (orange et rouge), notamment vers le centre et le nord de la wilaya, où les zones vertes étaient dominantes en 2000. Les zones à TCI faible se sont réduites et fragmentées, indiquant une généralisation du stress thermique. Cette évolution concorde avec la hausse des températures de surface (LST), soulignant l'impact croissant du réchauffement climatique sur la région.

3. TCI 2020

La carte TCI de 2020 confirme l'intensification du stress thermique, avec une domination claire des zones orange et rouge sur l'ouest, le centre et le sud de la wilaya. Les zones vertes, signe de conditions favorables, sont devenues rares et très localisées. Cette situation traduit un stress thermique sévère et généralisé affectant la végétation, aggravant le stress hydrique et accentuant la vulnérabilité des écosystèmes, notamment les steppes et les zones arides déjà fragiles.

III. 5. 5. VHI

Les cartes du VHI pour les années 2000, 2010 et 2020 illustrent l'évolution de la santé de la végétation dans la wilaya de M'Sila en combinant les indices VCI et TCI. Des valeurs faibles (en rouge/orange) indiquent un stress végétal important lié à la sécheresse, tandis que des valeurs élevées (en vert) reflètent des conditions favorables. Le VHI offre ainsi une vision intégrée des impacts du stress hydrique et thermique, et permet d'identifier les zones les plus vulnérables à la dégradation écologique.

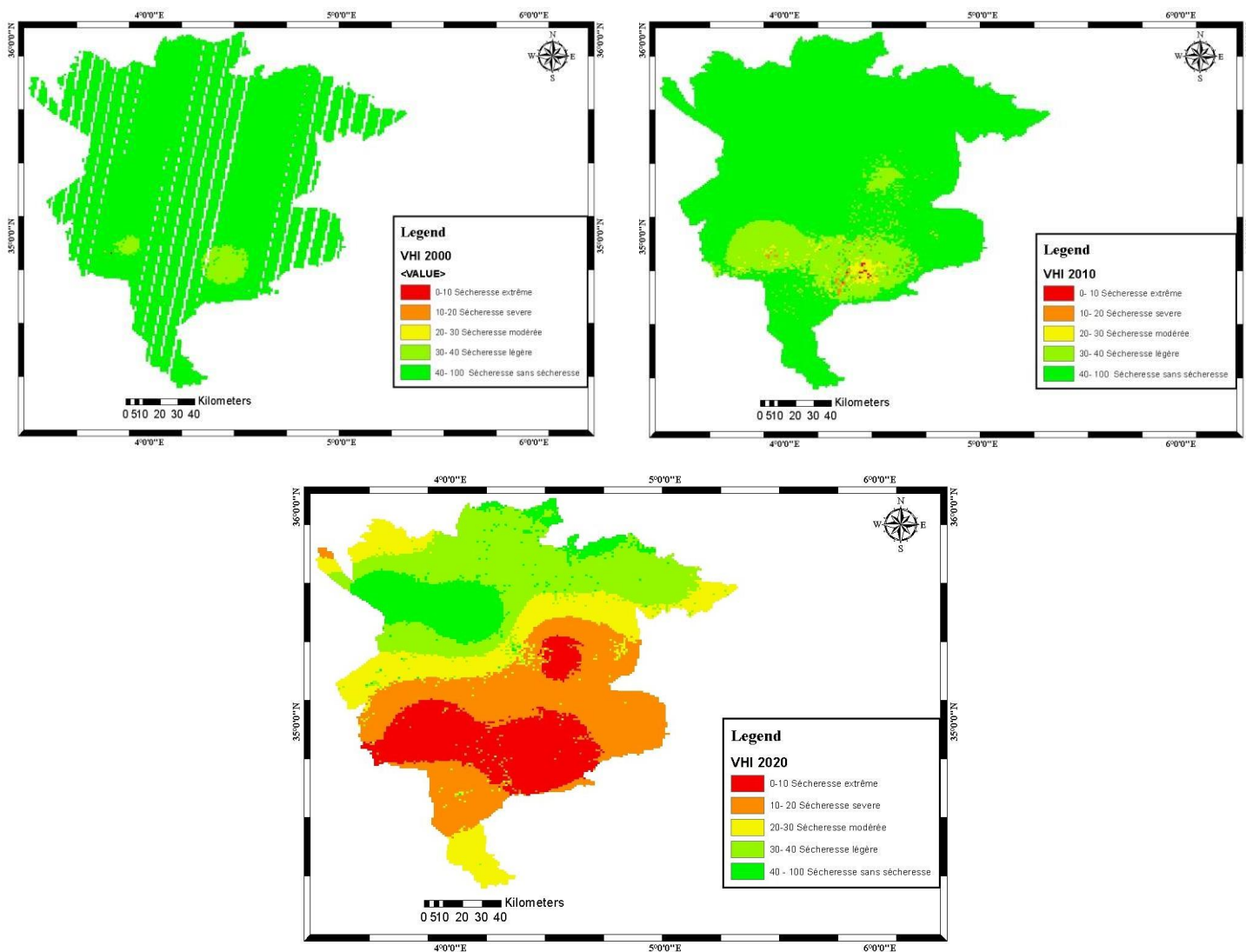


Figure III.15 : Évolution spatio-temporelle de l'Indice de Santé de la Végétation (VHI) dans la wilaya de M'Sila (2000, 2010, 2020)

III. 5. 5. 1 Discussion

L'analyse des cartes VHI pour les années 2000, 2010 et 2020 permet de retracer l'évolution de la sévérité de la sécheresse et de la santé globale de la végétation dans la wilaya de M'Sila.

1. VHI 2000

Motif général : La carte VHI 2000 est dominée par des teintes de vert vif, indiquant des valeurs élevées de VHI (40-100), ce qui se traduit par "Sécheresse sans sécheresse" ou une sécheresse légère. Cela suggère que l'année 2000 a été relativement favorable pour la végétation de la wilaya, avec peu de stress hydrique ou thermique généralisé.

Anomalies : Malgré la dominance du vert, quelques petites poches de jaune clair (30-40 Sécheresse légère) et quelques points oranges (20-30 Sécheresse modérée) sont visibles, principalement dans les parties sud et centre de la wilaya. Ces zones pourraient indiquer des conditions de stress localisées, mais elles ne représentent pas une sécheresse généralisée.

Artefacts : Il est important de noter la présence de bandes blanches diagonales sur la carte (résultat des données Landsat 7 SLC-off). Bien qu'elles puissent masquer certaines informations, l'impression générale d'une bonne santé est maintenue.

2. VHI 2010

Apparition et extension de la sécheresse : En comparant avec 2000, la carte VHI 2010 montre une nette apparition et extension des zones de sécheresse. Alors que le vert reste majoritaire, une zone significative de sécheresse modérée (orange, 20-30) et quelques poches de sécheresse sévère (rouge/orange foncé, 10-20) et même extrême (rouge, 0-10) apparaissent distinctement dans la partie centre-sud de la wilaya.

Signe de dégradation : Cette transition du vert dominant vers l'apparition de couleurs chaudes indique une détérioration de la santé de la végétation et l'installation de conditions de sécheresse plus marquées qu'en 2000. La combinaison d'informations de VCI et TCI dans le VHI renforce cette observation.

Augmentation de la vulnérabilité : L'émergence de ces zones de sécheresse sévère suggère une vulnérabilité accrue de certaines parties de la wilaya face aux déficits pluviométriques et/ou aux températures élevées.

3. VHI 2020

Aggravation de la sécheresse : La carte VHI 2020 confirme une aggravation de la sécheresse déjà amorcée en 2010. Les zones affectées par la sécheresse (jaune-orange-rouge) sont beaucoup plus étendues et intenses. La zone de sécheresse modérée à sévère (orange à rouge) s'est agrandie considérablement, englobant une grande partie du centre et du sud de la wilaya.

Réduction des zones saines : Les zones de "Sécheresse sans sécheresse" (vert vif) sont désormais marginales, cantonnées principalement aux frontières nord de la wilaya. Cela témoigne d'une situation où la quasi-totalité de la végétation subit un certain niveau de stress hydrique ou thermique.

Impact généralisé : Le VHI 2020 dépeint un tableau d'une sécheresse quasi généralisée et sévère sur une grande partie de la wilaya de M'Sila. Les valeurs faibles du VHI dans les zones

les plus touchées (rouge/orange) indiquent un stress végétal critique et un risque élevé de dégradation des écosystèmes.

III.6. Comparaison

L'analyse quantitative des niveaux de sécheresse dérivés de l'indice VHI sur les années 2000, 2010 et 2020 brosse un tableau clair et préoccupant de l'aggravation du phénomène de sécheresse dans la wilaya de M'Sila. Les graphiques fournis illustrent la répartition en pourcentage de la surface de la wilaya au sein des différentes catégories de sécheresse, permettant une comparaison précise des changements temporels.

III.6. 1État de la Sécheresse en 2000 (VHI 2000)

Les données de 2000 indiquent une situation environnementale relativement saine en termes de sécheresse :

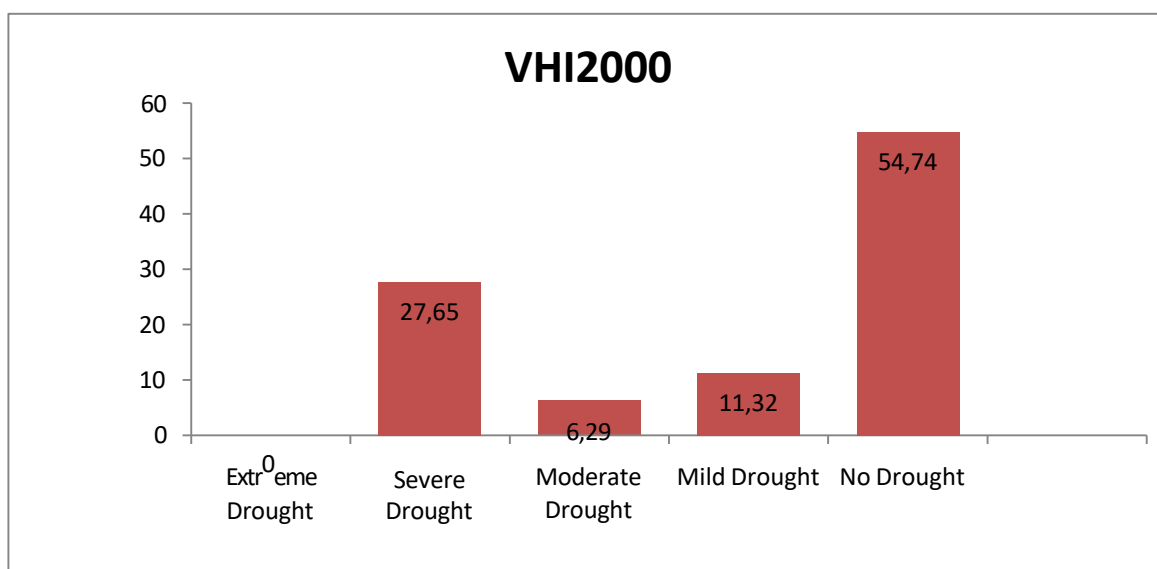


Figure III.16 : barres représentant le pourcentage de désertification VHI en 2000

Pas de Sécheresse (No Drought) : La plus grande proportion de la surface de la wilaya, environ 54,74%, était classée comme exempte de sécheresse. Ce pourcentage élevé reflète des conditions environnementales favorables à la végétation à cette époque.

Sécheresse Légère (Mild Drought) : Environ 11,32% de la surface souffrait d'une sécheresse légère.

Sécheresse Modérée (Moderate Drought) : Le pourcentage de sécheresse modérée était de 6,29%.

Sécheresse Sévère (Severe Drought) : Une proportion relativement importante de 27,65% de la wilaya était affectée par une sécheresse sévère. Ce pourcentage est notable même pour une année globalement considérée comme bonne, ce qui pourrait indiquer l'existence de zones intrinsèquement sensibles ou de régions subissant des stress précoces.

Sécheresse Extrême (Extreme Drought) : Aucune proportion significative (0%) n'a été enregistrée dans cette catégorie, confirmant que la sécheresse n'était pas catastrophique cette année-là.

Globalement, l'année 2000 montre une dominance des conditions "sans sécheresse" avec une sécheresse sévère touchant près d'un quart de la surface, indiquant une variabilité spatiale de la sensibilité de la région.

III.6.2 État de la Sécheresse en 2010 (VHI 2010)

L'année 2010 révèle une détérioration notable par rapport à 2000, avec un changement dans la distribution des catégories de sécheresse :

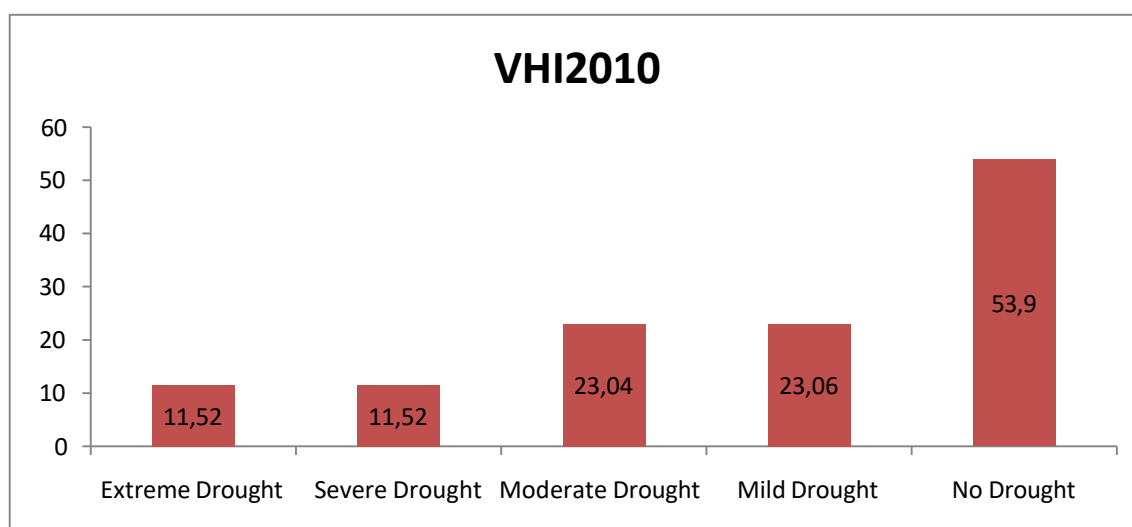


Figure III.17 : barres représentant le pourcentage de désertification VHI en 2010

Pas de Sécheresse (No Drought) : Bien que toujours la catégorie la plus importante, son pourcentage a diminué pour atteindre environ 54% (lecture approximative du graphique, légèrement supérieur à 50% mais inférieur à 55%), indiquant une réduction des zones exemptes de sécheresse.

Sécheresse Légère (Mild Drought) : Cette catégorie a connu une augmentation notable, atteignant environ 23% (lecture approximative), suggérant que de vastes zones ont commencé à subir un stress hydrique.

Sécheresse Modérée (Moderate Drought) : Ce pourcentage a également augmenté pour atteindre environ 23% (lecture approximative).

Sécheresse Sévère (Severe Drought) : Ce pourcentage est resté autour de 11% (lecture approximative), ce qui pourrait indiquer que certaines zones sévèrement touchées en 2000 ont basculé vers des catégories plus extrêmes, ou que de nouvelles zones ont commencé à souffrir.

Sécheresse Extrême (Extreme Drought) : Pour la première fois, les données de 2010 montrent l'apparition d'une proportion significative de la surface (environ 11%, lecture approximative) sous l'influence d'une sécheresse extrême. Cette distribution en 2010 indique le début de la propagation de la sécheresse et l'aggravation de son intensité, avec une régression des zones exemptes de sécheresse et l'apparition de zones souffrant d'une sécheresse extrême.

III.6.3 État de la Sécheresse en 2020 (VHI 2020)

Les données de 2020 brossent un tableau encore plus sombre, confirmant une aggravation radicale du phénomène de sécheresse :

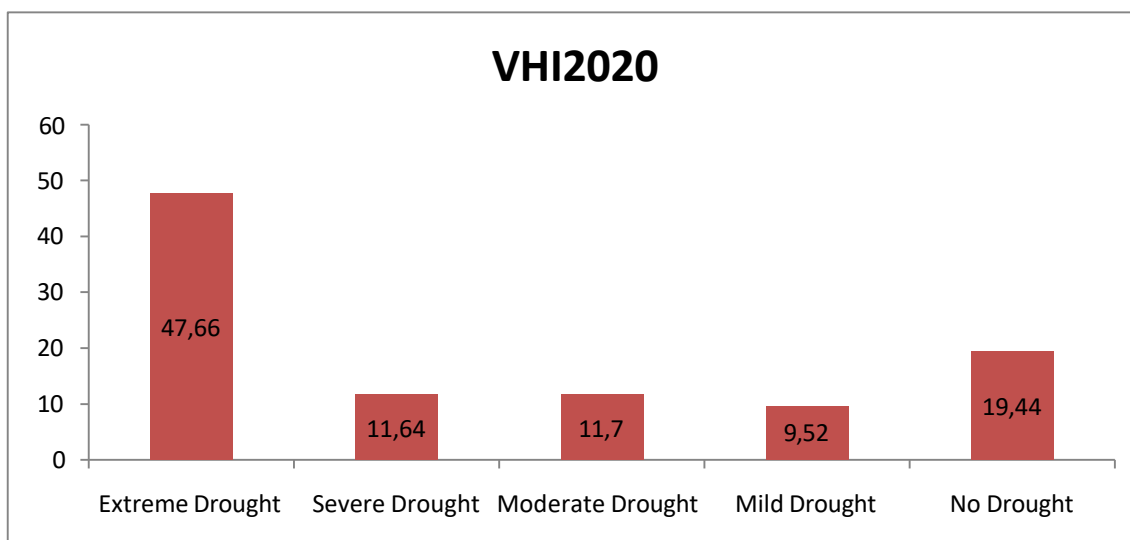


Figure III.17 : barres représentant le pourcentage de désertification VHI en2020

Sécheresse Extrême (Extreme Drought) : Cette catégorie devient largement dominante, représentant près de 48% de la surface de la wilaya (lecture approximative, légèrement inférieure à 50%). Cela signifie que près de la moitié de la wilaya souffrait des formes les plus sévères de sécheresse.

Sécheresse Sévère (Severe Drought) : Le pourcentage de sécheresse sévère s'élevait à environ 12% (lecture approximative).

Sécheresse Modérée (Moderate Drought) : Le pourcentage de sécheresse modérée était d'environ 12% (lecture approximative).

Sécheresse Légère (Mild Drought) : Ce pourcentage a diminué pour atteindre environ 10% (lecture approximative).

Pas de Sécheresse (No Drought) : Cette catégorie a considérablement diminué, ne représentant plus qu'environ 20% de la surface de la wilaya (lecture approximative).

L'année 2020 illustre un changement spectaculaire dans le régime de sécheresse, où la catégorie "Sécheresse Extrême" est devenue la plus répandue, indiquant une crise environnementale aiguë et des impacts négatifs généralisés sur la végétation et les ressources en eau.

Tableau III.3 Évolution des niveaux de sécheresse (VHI) et de leurs superficies dans la wilaya de M'Sila (2000, 2010, 2020)

VHI	2000		2010		2020	
	%	superficie	%	superficie	%	Superficie
Sécheresse extrême	0%	0.00km ²	11%	1970.27km ²	48%	8597.57km ²
Sécheresse severe	27.65	4948.42km ²	11%	1970.27km ²	12%	2149.39km ²
Sécheresse modérée	6.29%	1126.74km ²	23%	4119.67km ²	12%	2149.39km ²
Sécheresse légère	11.32%	2027.50km ²	23%	4119.67km ²	10%	1791.16km ²
Sécheresse sans sécheresse	54.74%	9805.80km ²	54%	9672.26km ²	20%	3582.32km ²

Conclusion

L'étude a permis d'évaluer l'évolution spatio-temporelle de la végétation dans la wilaya de M'Sila à travers les indices NDVI, VCI, TCI et VHI pour les années 2000, 2010 et 2020. Les résultats montrent une dégradation continue de la couverture végétale, une élévation des températures de surface (LST) et une intensification de la sécheresse. En 2020, les zones affectées par une sécheresse extrême ($VHI < 20$) couvrent près de la moitié du territoire.

Cette situation résulte d'une combinaison de facteurs climatiques et anthropiques. L'approche adoptée peut être reproduite à différentes périodes saisonnières pour mieux suivre les dynamiques végétales. La cartographie des zones prioritaires permet de proposer des actions ciblées telles que le reboisement, l'aménagement hydrique local et la promotion de l'agriculture durable pour limiter la dégradation des sols et renforcer la résilience environnementale.

Conclusion générale

Conclusion générale & recommandations

Au terme de ce travail portant sur l'analyse de l'évolution spatio-temporelle de la végétation et de la sécheresse dans la wilaya de M'Sila à travers l'utilisation d'images satellites (Landsat 7) et d'outils SIG, nous avons pu caractériser avec précision les dynamiques environnementales sur une période de 20 ans (2000–2020). L'étude s'est appuyée sur plusieurs indices biophysiques tels que le NDVI, le VCI, le TCI et le VHI, qui ont permis de suivre la dégradation de la couverture végétale, l'élévation des températures de surface, et l'intensification des conditions de sécheresse.

Les résultats obtenus ont montré une régression progressive de la végétation naturelle, notamment dans les zones steppiques et arides du sud et du centre de la wilaya, accompagnée par une élévation significative de la température de surface. L'indice VHI, combinant le stress thermique et hydrique, a confirmé une aggravation continue de la sécheresse, en particulier en 2020 où les conditions extrêmes prédominent. Ces tendances révèlent une vulnérabilité croissante des écosystèmes locaux, corrélée aux effets conjugués du changement climatique et de l'activité anthropique (déboisement, urbanisation, surpâturage).

Les cartes générées et l'approche SIG ont permis non seulement de visualiser ces dynamiques de manière précise, mais aussi d'identifier les zones les plus critiques, devant être ciblées en priorité pour les interventions de restauration et de protection.

Recommandations

- ✓ Promouvoir la restauration écologique à travers le reboisement et la protection des zones à forte dégradation.
- ✓ Mettre en place un système de suivi continu des indicateurs environnementaux via des outils SIG et de télédétection pour détecter précocement les zones à risque.
- ✓ Encourager les pratiques agricoles durables limitant la pression sur les sols et l'eau, notamment dans les zones agricoles du nord et du centre.
- ✓ Renforcer la sensibilisation locale à l'impact du changement climatique et à la gestion rationnelle des ressources naturelles.
- ✓ Intégrer les données issues de la télédétection dans la planification territoriale et les politiques environnementales régionales.

Limites et défis de l'utilisation des SIG et de la télédétection

Malgré leurs nombreux avantages, l'utilisation des SIG et de la télédétection en Algérie, en particulier dans les études environnementales à l'échelle régionale, présente plusieurs contraintes :

- Résolution spatiale et temporelle limitée : les images satellitaires disponibles (comme celles de Landsat) manquent parfois de finesse pour des analyses locales très précises, notamment dans les zones morcelées (Boukerma, 2020).
- Besoin de données de terrain : les classifications et les résultats obtenus à partir des indices nécessitent des campagnes de terrain pour être validés, ce qui est difficile dans les régions isolées ou mal accessibles (Kebaili, 2019).
- Coût élevé des données spécialisées : certaines images à très haute résolution ou logiciels avancés sont onéreux, ce qui limite leur accessibilité (Benhassine, 2021).
- Compétences techniques spécifiques : la manipulation des outils SIG, la maîtrise des algorithmes de traitement d'images et l'interprétation des résultats nécessitent des formations pointues, encore peu généralisées dans les universités et institutions locales (Hadji, 2018).

En somme, bien que les SIG et la télédétection offrent des perspectives puissantes pour la gestion de l'environnement, leur intégration optimale dans la recherche et la prise de décision en Algérie reste conditionnée par une meilleure accessibilité aux données, un renforcement des compétences humaines, et une politique nationale de valorisation des technologies géospatiales.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Bernier, S., Duthoit, S., Ladet, S., & Baudet, D. (2014). Les concepts de base des systèmes d'information géographique (SIG): les données et les fonctions générales. Cahier des Techniques de l'INRA, (Spécial), 19-27
- Ider, K. (2004). Modélisation hydrodynamique cour d'eau Application a l'Oued Soumamm Mémoire ENP Alger 124 p
- Da Cunha, A. (2005). Enjeux du développement urbain durable: transformations urbaines, gestion des ressources et gouvernance. EPFL Press.
- Beltran, A., & Griset, P. (2007). Histoire d'un pionnier de l'informatique: 40 ans de recherche à l'Inria. EDP sciences.
- Hufty, A. (2001). Introduction à la climatologie: le rayonnement et la température, l'atmosphère, l'eau, le climat et l'activité humaine. Presses Université Laval.
- Major, W., & Golay, F. (2004). SIG, cognition et métiers. SIRS, organisation et sociétés.
- BOUGUERRA Somia, Impacts de la dégradation des terres par la désertification dans la commune de Boussaâda 2019/2020 31p, 32p.
- MISSOUMI, A et TADJEROUNI, K, 2003. SIG et imagerie Alsat1 pour la cartographie du risque d'incendie de forêt Article, p 14.
- KOUADRIA, S. (2019/2020). Application du SIG et télédétection pour la cartographie de la sensibilité aux feux de forêts de la forêt domaniale Des Sdamas Chergui de la Wilaya de Tiaret. Thèse de master, Université Ibn Khaldoun Tiaret.
- Remil Rachid, 2006 : utilisation de l'imagerie satellitaire et des sig dans l'analyse phytoécologique et l'aménagement application a la region de Beni Chougrane.
- ABDULRAHMAN.K. A, 2010. Remote sensing, third class, first edition (2010), 75p.
- BOUACHA M, I, 2013 - Etude de la dynamique de végétation des parcours steppiques du Sud de la Wilaya de TIARET à l'aide d'un SIG. Thèse magistère, université Ibn Khaldoun Tiaret, 92p.

- KAMEL, S. (2005). Cours Télédétection ECO. Laboratoire d'Ecophysiologie Végétale, Université Paris-Sud XI-91405 Orsay, France. kamel. soudani@ese.u-psud.fr.
- Bensaid, A., Mostephaoui, T., & Nedjai, R. (2021). Apport des images ETM+ et du SIG dans la détection des changements dynamiques de l'espace steppique de Naâma, Algérie. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 9(4).
- CALOZ, R. (2006). Télédétection satellite. Notes de cours. Section des Sciences et Ingénierie de l'Environnement, 3ème année, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), Laboratoire de systèmes d'information géographique (La SIG),
- Gérard, B., Escadafal, R., Fontannaz, D., & Nguyen, A. T. H. N. (2005). La télédétection: un outil pour le suivi et l'évaluation de la désertification. *Les dossiers thématiques du CSFD*, (2), 44.
- KAMEL, S. (2007). Introduction générale a la télédétection. Laboratoire d'Ecophysiologie Végétale, Université Paris-Sud XI-91405 Orsay, France. kamel. soudani@ese.u-psud.fr.
- Kergomard, C. (1990). La télédétection spatiale : une introduction. Cours de télédétection, Ecole Normale Supérieure. Paris
- Provencher, L., & Dubois, J. M. M. (2007). Précis de télédétection - Volume 4 (Vol. 4). Puq.
- Tonye, E., Akono, A., & Nyongui, A. N. (2000). Le traitement des images de télédétection par l'exemple (Vol. 210). Paris: Gordon and Breach Science Publishers.
- Soudani K. (2006). Exploration d'images de télédétection et quelques traitements et analyses élémentaires. Université Paris Sud XI - Faculté des Sciences d'Orsay. 12 p. Module géomatique 2006-2007. Travaux dirigés.
- http://www.ese.u-psud.fr/IMG/pdf/td1_teledec.pdf
- ABDULRAHMAN, K. A., 2010. Remote sensing, third class, first edition (2010), 75p.
- TEMPFLI, K., KERLE, N. 2009. Principles of remote sensing, an introductory textbook. The international institute for geo-information science and earth observation (ITC), 591p.

- Aït Aoudia, R. (2019). Utilisation des images satellitaires pour le suivi de l'occupation du sol dans la région de Bouira. Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- Bourenane, K. (2021). Application du NDVI pour le suivi des cultures céréalières dans la wilaya de Sétif. Université Ferhat Abbas – Sétif 1.
- Sahnoune, L. (2020). Télédétection et SIG pour la surveillance des stress hydriques dans la région de Biskra. Université Mohamed Khider – Biskra.
- Bensaâd, A. (2018). Étude de la dynamique des oasis par télédétection dans la région de Timimoun. Université de Béchar.
- Zerrouki, A. (2018). Télédétection et SIG pour l'analyse de la dynamique de l'occupation du sol dans la plaine de la Mitidja. Thèse de doctorat, Université Saad Dahlab – Blida 1.
- Bouziane, F. (2021). Application de la classification supervisée pour le suivi de l'évolution des terres agricoles dans la wilaya de Mascara. Doctorat, Université Mustapha Stambouli – Mascara.
- Djellouli, M. (2020). Modélisation spatio-temporelle des changements d'usage des terres agricoles par SIG et imagerie satellitaire dans la région de Sétif. Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas – Sétif 1.
- Benkaci, S. (2019). Étude des dynamiques agricoles dans la région d'El Oued à partir des données de télédétection et SIG. Doctorat, Université KasdiMerbah – Ouargla.
- Boukerma, M. (2020). Analyse spatio-temporelle de l'occupation du sol par télédétection dans la région de Tébessa. Thèse de doctorat, Université de Batna 2.
- Kebaili, F. (2019). Validation terrain et classification supervisée des cultures à partir d'images Landsat : cas de la plaine de Guelma. Université 8 Mai 1945 – Guelma.
- Benhassine, L. (2021). Contraintes et perspectives de l'utilisation de la télédétection en agriculture dans le Sud algérien. Université Amar Telidji – Laghouat.
- Hadji, M. (2018). Limites techniques de l'usage des SIG et de la télédétection dans l'analyse environnementale locale. Université de Constantine 1.

- Mohamed Adou Sidi Almouctar & Fubo Zhao & Caiqing Qin Journal d'hydrologie : études régionales 2019 p 4-6
- Wilhite, D.A. & Glantz, M.H. (1985) – Understanding the Drought Phenomenon, National Center for Atmospheric Research.
- Heim, R.R. (2002) – A review of twentieth-century drought indices used in the United States, Bulletin of the American Meteorological Society.
- Tallaksen, L.M. & Van Lanen, H.A.J. (2004) – Hydrological Drought: Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater.
- UNEP (1994) – United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD).
- NDMC (2006) – National Drought Mitigation Center, University of Nebraska-Lincoln.
- Boken V.K. et al. (2005). Monitoring and Predicting Agricultural Drought
- Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural (2020)
- DSA 2020
- FAO
- Boudrissa A., (2005). Étude des facteurs de risque de transmission de la leishmaniose cutanée zoonotique cas du foyer de Chott EL Hodna, Mémoire de magistère, Uni. Oum El Bouaghi, 146p.
- Jean, M., et Franco, P. (1995). Documents phytosociologiques Vol .15. Pp :394-401.
- Kaabeche, M., (1990). Les groupements végétaux de la région de Boussaâda (Algérie). Essai de synthèse sur la végétation steppique du Maghreb. Thèse de Doct. Univ. Paris sud, centre d'assai 104p.
- Achouri N et Tadjine S. 2013: Synthèse sur les plantes médicinales de la région de M'sila essai ébauche d'une pharmacopée Algérienne. Diplôme d'ingénieur d'état en écologie végétale et environnement. M'sila : Université de M'sila, . 4,5,7p.
- Belouadah N., (2009). Développement urbain et préservation du patrimoine architectural dans les médinas Cas de la médina de Bou-Saada, Mémoire Magister, Université Mohamed Khider – Biskra. 280 p.
- CF M'sila, (2019). Rapport de présentation du secteur des Forêts.

- DPSB - Direction de la Programmation et du Suivi Budgétaires de la wilaya de M'SILA, 2018.
- DSA Direction des Services Agricoles de la wilaya de M'Sila 2025
- DREDirection des Ressources en Eau de la wilaya de M'Sila 2025