

الجمهورية
الجزائرية الديمقراطية
الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم
العلمي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة بلكايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : métiers de la ville

Spécialité : géomatique et gestion du foncier

Par :

- BENESSALAH FATIHA
- CHERGUI HENNI FATIMA SOULEF

Sujet

**L'apport de la télédétection dans l'extraction et l'analyse des indicateurs de
végétation dans la commune de CHLEF de 1990 à 2022**

Soutenu publiquement, le 30 / 06 / 2025 , devant le jury composé de :

M HAMDAOUI Karim Chef département Université de TlemcenPrésident

Mme BENZENINE Faïla Doctorante en Université de TlemcenExamineur
génie civil

M MEBARKI ABDELKADER Expert foncier Université de TlemcenEncadrant

Année universitaire : 2024/2025

Remerciements

Avant toute chose, nous rendons grâce à Allah, Le Tout-Puissant, Le Très Miséricordieux, qui nous a accordé la santé, la patience et la force nécessaires pour mener à bien ce travail. Sans Sa volonté, rien n'aurait été possible.

Nous exprimons notre profonde gratitude à nos parents respectifs pour leur amour inconditionnel, leurs prières constantes et leur soutien indéfectible tout au long de notre parcours universitaire. Leur confiance et leurs encouragements ont été une source essentielle de motivation.

Nos remerciements les plus sincères vont à notre encadrant M. MEBARKI Abdelkader et notre Co encadrant M. MANSOUR Djamel pour leurs conseils pertinents, leurs disponibilités et leur accompagnement précieux durant toutes les étapes de la réalisation de ce mémoire.

Nous remercions également à chef département d'architecture M. HAMDAOUI Karim et l'ensemble des enseignants du département d'Architecture et les enseignants de la spécialité Géomatique et Gestion du Foncier pour la qualité de leur enseignement et leur accompagnement tout au long de notre formation.

Nous tenons à vous Mm BENZENINE Faïla exprimer notre profonde gratitude pour le temps que vous avez consacré à l'évaluation de notre travail, ainsi que pour vos remarques constructives qui nous aideront à progresser davantage.

Enfin, nous adressons nos remerciements les plus sincères à toutes les personnes qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Dédicaces

Nous tenons c'est avec grande plaisir que nous dédions ce modeste travail :

A nous chers parents, source de vie, d'amour et d'affection.

A nos chères frère et sœurs.

A tous les membres de notre famille.

Résumé

Ce mémoire analyse l'apport de la télédétection dans l'extraction et l'analyse des indicateurs de végétation entre 1990 et 2022, en mettant l'accent sur l'utilisation des données des satellites Landsat 5 et Landsat 8. Les indices étudiés incluent le NDVI, SAVI, EVI, LST et NDWI, qui sont largement utilisés pour surveiller l'état de la végétation, analyser ses variations spatio-temporelles, évaluer les effets du changement climatique et détecter les impacts des activités anthropiques. Le travail montre comment les progrès technologiques, ainsi que la disponibilité accrue des données satellitaires fournies par les missions Landsat, ont permis d'améliorer la précision et la fiabilité de ces indicateurs. À travers une approche méthodologique rigoureuse et des cas d'étude concrets, ce mémoire souligne l'importance croissante de la télédétection dans la compréhension des dynamiques végétales à différentes échelles, tout en identifiant ses limites et perspectives d'amélioration.

Les mots clés : Télédétection, Landsat 5, Landsat 8, Indicateurs de végétation, Analyse spatio-temporelle, Changement climatique, Environnement

المخلص

العنوان: مساهمة التصوير عن بعد في استخراج وتحليل مؤشرات الغطاء النباتي(1990-2022)

يهدف هذا البحث إلى دراسة مساهمة التصوير عن بعد في استخراج وتحليل مؤشرات الغطاء النباتي خلال الفترة الممتدة من سنة 1990 إلى 2022، مع التركيز على استخدام بيانات الأقمار الصناعية Landsat8 و landsat5. تشمل المؤشرات المدروسة NDVI و SAVI و EVI و LST و NDWI ، وهي تُستخدم بشكل واسع لمراقبة حالة الغطاء النباتي، وتحليل تغيراته المكانية والزمنية، وتقييم آثار التغير المناخي واكتشاف التأثيرات المرتبطة بالأنشطة البشرية. يظهر البحث كيف ساهمت التطورات التكنولوجية، إلى جانب توفر البيانات القمرية من بعثات لاندسات بشكل متزايد، في تحسين دقة هذه المؤشرات وموثوقيتها. ومن خلال منهجية بحثية دقيقة ودراسات حالة عملية، يبرز هذا العمل العلمي أهمية متزايدة للتصوير عن بعد في فهم أنظمة الغطاء النباتي على مختلف المقاييس، كما يسלט الضوء على إمكانياتها وقبورها.

الكلمات المفتاحية: التصوير عن بعد، لاندسات 5، لاندسات 8، مؤشرات الغطاء النباتي، التحليل المكاني والزمني، التغير المناخي، البيئة

Abstract

Title: The Contribution of Remote Sensing in the Extraction and Analysis of Vegetation Indicators (1990–2022)

This thesis analyzes the contribution of remote sensing to the extraction and analysis of vegetation indicators from 1990 to 2022, with a focus on the use of data from the Landsat 5 and Landsat 8 satellites. The studied indicators include NDVI, SAVI, EVI, LST, and NDWI, which are widely used to monitor vegetation status, analyze its spatiotemporal variations, assess the effects of climate change, and detect human-induced impacts. The study highlights how technological advancements, combined with increased availability of satellite data from the Landsat missions, have improved the accuracy and reliability of these indicators. Through a rigorous methodological approach and concrete case studies, this work underlines the growing importance of remote sensing in understanding vegetation dynamics at various scales, while also identifying its strengths and limitations.

Keywords: Remote sensing, Landsat 5, Landsat 8, Vegetation indicators, Spatio-temporal analysis, Climate change, Environment

Sommaire

1

Remerciements	II
Dédicaces	III
Sommaire	VII
Table des illustrations	XI
Introduction générale	01
CHAPITRE 01 : Revue de littérature sur les indices de végétation par télédétection et leurs applications	03
1 La Télédétection.....	04
2 Éléments de la télédétection	6
3 Les domaines d'application de la télédétection:	8
4 Importance de la télédétection pour l'étude de la végétation.....	11
5 Les indices de végétation	12
5.1 Définition et utilité	12
5.2 Principaux Indices de végétation	14
5.2.1 Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI)	15
5.2.2 Indice de Végétation à Ajustement de Sol (SAVI)	18
5.2.3 L'Indice de Végétation Amélioré (EVI)	19
5.2.4 Indice D'eau De Différence Normalisée (NDWI)	22
5.3 Capteurs utilisés.....	24
5.4 Pourquoi ces indices sont importants ?.....	25
5.5 La comparaison des différents indices de végétation.....	25
6 Application des indices de végétation dans la télédétection	26
7 Relation entre les indices de végétation et la Température de Surface Terrestre (LST)	28
7.1 Définition et estimation de la Température de Surface Terrestre	28
7.1.1 Qu'est-ce que la Température de Surface Terrestre ?.....	28
7.1.2 Comment la LST est mesurée par satellite ?.....	30
7.1.3 Pourquoi la LST est-elle importante ?.....	31
7.2 Relation théorique entre Indice de Végétation (ou IV) et LST	31
7.2.1 L'effet de la végétation sur la Température terrestre	31
7.2.2 L'effet du sol nu et de la végétation clairsemée sur la Température terrestre	32
7.2.3 Relation inverse entre Indice de végétation normalisé NDVI et Land Surface Temperature	32
CHAPITRE 02 : Etude de la zone	36

1	LE CHOIX DE CHLEF POUR ZONE ETUDE	37
2	PRESENTATION DE LA COMMUNE DE CHLEF.....	37
2.1	Cadre géographique.....	37
2.1.1	Contexte général.....	37
2.1.2	Contexte régional de la commune de Chlef.....	40
2.2	La topographie de la commune de chlef	40
c.	Cours d'eau et vallons	41
2.3	La pente de la commune de Chlef	41
2.4	Climatologie	43
2.5	Température	43
2.5.1	Les températures mensuelles moyennes	44
2.6	Précipitations	45
2.7	Humidité.....	48
2.7.1	L'humidité relative dans la commune de Chlef	48
2.7.2	Répartition saisonnière de l'humidité.....	48
2.7.3	Variation journalière	49
2.8	VENTS	50
2.8.1	LA VITESSE MOYENNE DES VENTS DANS LA COMMUNE DE CHLEF.....	50
2.8.2	Répartition saisonnière	50
2.8.3	Direction dominante des vents.....	51
2.9	Agricole	52
2.9.1	L'AGRONOMIE.....	52
2.10	Systèmes d'irrigation	54
2.11	Élevage	54
2.11.1	Importance de l'élevage à Chlef.....	55
2.11.2	Estimations de la part de l'élevage	55
2.12	RELIEF	55
3	L'autoroute et route principales à Chlef	57
3.1	L'Autoroute Est-Ouest (A1).....	57
3.2	Routes nationales.....	58
4	Séisme	59
4.1	L'activité sismique dans la commune de Chlef	59
4.2	Le séisme historique de Chlef (anciennement El Asnam) — 10 octobre 1980.....	59
4.3	Causes géologiques.....	60

4.4	Conséquences et gestion post-sismique.....	60
4.5	Impacts sur l'aménagement du territoire.....	60
CHAPITRE 03 : APPLICATION SUR LA COMMUNE DE CHELEF		62
1	Matériels et méthodes	64
1.1	Données Satellitaires (Landsat).....	64
1.1.1	Caractéristiques	64
1.1.2	Utilisation pour le suivi de la végétation.....	64
1.2	Logiciels utilisés.....	65
1.2.1	United States Geological Survey (USGS)	65
1.2.2	ARCGIS 10.6.....	70
1.2.3	Google Earth Pro	70
2	Correction radiométrique	72
2.1	Défiition :.....	72
2.2	Objectifs d la correction radiométrique.....	72
2.3	Types de correction radiométrique	72
3	Creation des cartes d'indices	73
3.1.1	Calcul de l'indice NDVI à partir des images Landsat	73
3.1.2	Indice SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index).....	74
3.1.3	Indice EVI (Enhanced Vegetation Index).....	75
3.1.4	Indice NDWI (Normalized Difference Water Index).....	76
3.1.5	Indice LST (Land Surface Temperature)	78
4	Résultats et discussions	82
4.1	Interprétation de carte NDVI pour la commune de Chlef	82
4.1.1	Structure générale de l'image.....	83
4.1.2	Échelle des couleurs NDVI.....	83
4.1.3	Analyse par année.....	83
4.1.4	Comparaison dans le temps.....	86
4.1.5	Observation spécifique	86
4.1.6	Résumé final.....	87
4.1.7	Conclusion finale	87
4.2	Interprétation de carte NDWI pour la commune de Chlef	88
4.2.1	Échelle de couleur NDWI	89
4.2.2	Analyse par année.....	89
4.2.3	Comparaison temporelle	92
4.2.4	Observation spécifique	93

4.2.5	Résumé final.....	93
4.2.6	Conclusion finale.....	94
4.3	Interprétation de carte SAVI pour la commune de Chlef	94
4.3.1	Structure générale de l'image.....	95
4.3.2	Échelle de couleur SAVI.....	95
4.3.3	Analyse par année.....	95
4.3.4	Comparaison temporelle	99
4.3.5	Observation spécifique	101
4.3.6	Résumé final.....	101
4.3.7	Conclusion finale	101
4.4	Interprétation de carte EVI pour la commune de Chlef.....	102
4.4.1	Structure générale de l'image.....	103
4.4.2	Échelle de couleur EVI.....	103
4.4.3	Analyse par année.....	103
4.4.4	Comparaison temporelle	107
4.4.5	Observations spécifiques	107
4.4.6	Résumé final.....	108
4.4.7	Conclusion finale	108
4.5	Interprétation de carte LST pour la commune de Chlef	109
4.5.1	Structure générale de l'image.....	110
4.5.2	Échelle de couleur LST.....	110
4.5.3	Analyse par année.....	110
4.5.4	Observation spécifique	115
4.5.5	Résumé final.....	115
4.5.6	Conclusion finale	116
5	Comparaison entre les indices.....	116
6	La classification supervisée en télédétection	117
6.1	Définition détaillée.....	117
6.2	Principe général	117
6.3	Étapes de la classification supervisée	117
6.4	Outils logiciels	118
6.5	Avantages de la classification supervisée	118
6.5.1	5.6Limites.....	119
7	Pour notre zone d'étude la commune de CHLEF de 1990 a 2022	119

7.1 Les étapes.....	119
7.2 Logiciels.....	120
Conclusion générale.....	124
8 Bibliographie.....	126
9 Bibliographie.....	126
10.....	127

Table des illustrations

Figures.

Figure 1: Éléments de la télédétection (EOS, 2025)	20
Figure 2: Schéma général de fonctionnement du système de télédétection optique satellitaire ... 21	
Figure 3: Présentation de NDVI 08/04/2025.....	29
Figure 4: Carte de NDVI 5cm	30
Figure 5: Les valeurs de l'indice amélioré de végétation (EVI) pour chaque pixel 08/04/2025	33
Figure 6: Indique (a) la carte de l'indice amélioré de végétation (EVI) (b) la carte de l'indice normalisé de différence de végétation (NDVI) 08/04/2025	34
Figure 7: NDWI carte dans 1988 (a) and dans 2021 (c) 20/04/2025	36
Figure 8: Présentation de LST dans Différentes années	41
Figure 9: Relation inverse entre NDVI et LST	45
Figure 10: Zone d'étude	51
Figure 11: carte de localisation	52
Figure 12: Carte topographique	Erreur ! Signet non défini.
Figure 13: Carte des pentes	55
Figure 14: relief de Chlef	70
Figure 15: autoroute	71
Figure 16: centre du tremblement.....	73
Figure 17: Etape de sélection de la zone d'étude	79
Figure 18: Choix des critères : La date et la couverture nuageuse	80
Figure 19: Choix des données Landsat (voir Landsat TM cocher dans la figure)	81
Figure 20: Sélection de l'image à télécharger	82
Figure 21: Utilisation de ARCGIS	83
Figure 22: GOOGLE EARTH PRO CHLEF	84
Figure 23: Les scènes captées par le satellite Landsat à différentes dates.	84
Figure 24: NDVI dans la commune de CHLEF	95
Figure 25: NDWI dans la commune de CHLEF	101
Figure 26: SAVI dans la commune de CHLEF	107

Figure 27: EVI dans la commune de CHLEF	113
Figure 28: LST dans la commune de CHLEF	120
Figure 29: Carte d'occupation du sol	131

Tableaux.

Tableau 1: Domaines d'application de la télédétection (Chlef, 2025).....	23
Tableau 2: Interprétation de NDVI 20/04/2025	28
Tableau 3: Interprétation de SAVI 20/04/2025	31
Tableau 4: Interprétation de NDWI	35
Tableau 5: Présentation des pentes	55
Tableau 6: Ces coordonnées correspondent à la station météorologique de la ville de Chlef.	56
Tableau 7: température de la commune de Chlef	57
Tableau 8: Comparaison des indices	126

Graphes.

Graphe 1: la température moyenne	58
Graphe 2: Le mois le plus pluvieux	59
Graphe 3: Graphe de précipitation moyennes mensuelles à Chlef	60
Graphe 4: humidité relative Moyenne à chlef 1990-2022	63
Graphe 5: Un graphique représentant la vitesse moyenne des vents à Chlef 1990-2022	65
Graphe 8: route principale	72

Introduction générale

Depuis plusieurs décennies, l'observation de la Terre par télédétection spatiale connaît un développement exponentiel, offrant des outils précieux pour la compréhension et la gestion des systèmes environnementaux. Parmi les domaines d'application les plus pertinents de cette technologie, l'étude de la végétation terrestre se distingue par son importance écologique, agricole et climatique. En effet, la végétation joue un rôle clé dans le cycle du carbone, la régulation du climat, la sécurité alimentaire ainsi que dans la lutte contre la dégradation des sols et la perte de biodiversité.

La télédétection, grâce à ses capacités d'acquisition multi-temporelle, synoptique et globale, permet d'extraire des indicateurs de végétation qui constituent des variables essentielles pour surveiller l'état et l'évolution des couverts végétaux sur de vastes étendues. Ces indicateurs, tels que l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI), l'indice de végétation ajusté au sol (SAVI), l'indice de végétation amélioré (EVI), la température de surface (LST), ou encore l'indice de l'eau dans les végétaux (NDWI), sont aujourd'hui largement utilisés pour analyser les dynamiques saisonnières et interannuelles de la végétation,

évaluer les impacts du changement climatique, détecter les phénomènes de sécheresse ou encore suivre les variations de couvert végétal en lien avec les activités anthropiques.

Entre 1990 et 2022, la disponibilité croissante de données satellitaires provenant notamment des satellites Landsat 5 et Landsat 8 a permis une amélioration considérable de la précision et de la fiabilité des indicateurs extraits. Ces missions, gérées par l'USGS et la NASA, ont apporté une continuité spatio-temporelle inégalée grâce à leurs résolutions spectrales et spatiales adaptées à l'analyse fine des surfaces terrestres. Les progrès technologiques en matière de traitement d'image, d'algorithmes d'extraction automatisés et d'accès libre aux données ont également contribué à renforcer la pertinence de ces indicateurs pour des applications variées et à différentes échelles.

Ce mémoire s'inscrit dans cette démarche scientifique en analysant l'apport de la télédétection dans l'extraction et l'analyse des indicateurs de végétation sur une période de plus de trois décennies, en s'appuyant principalement sur les archives des satellites Landsat 5 et 8. À travers une approche méthodologique rigoureuse et des cas d'étude concrets, il propose d'évaluer l'évolution des techniques, des capteurs et des algorithmes utilisés, tout en soulignant les apports et les limites de ces outils pour une meilleure compréhension des dynamiques végétales au niveau local, régional et global.

CHAPITRE 01 : Revue de littérature sur les indices de végétation par télédétection et leurs applications

INTRODUCTION

L'observation et l'analyse de la végétation constituent un enjeu majeur pour le suivi de l'environnement, la planification agricole, la gestion des ressources naturelles et l'étude des impacts du changement climatique. Dans ce cadre, la télédétection s'impose comme une méthode moderne et efficace, capable de fournir des données spatiales régulières, objectives et à large échelle. Elle permet notamment de mesurer la vitalité et la distribution de la végétation à travers le calcul de différents indices spectraux (Kergomard, n.d.).

Les indices de végétation, tels que l'Indice de végétation par différence normalisée (**NDVI**), l'Indice de végétation ajusté au sol (**SAVI**), l'Indice de végétation amélioré (**EVI**) ou encore l'Indice de bord rouge à différence normalisée (**NDRE**), sont dérivés de la réflexion de la lumière dans les bandes du rouge et de l'infrarouge proche. Ils fournissent des indicateurs quantitatifs sur la densité du couvert végétal, la photosynthèse active, ou encore la santé des plantes. Ces indices sont largement utilisés dans de nombreux domaines : agriculture de précision, évaluation des risques environnementaux, surveillance de la déforestation ou des phénomènes de sécheresse (EOS, 2024).

Par ailleurs, la température de surface terrestre (**LST**), également extraite par télédétection, constitue une variable complémentaire importante. Elle est étroitement liée à la présence et à l'état de la végétation, influençant les bilans énergétiques, l'évapotranspiration et les stress thermiques. L'étude conjointe des indices de végétation et de la **LST** permet ainsi de mieux comprendre les interactions entre le sol, la couverture végétale et l'atmosphère (EOS, 2024).

Ce premier chapitre du mémoire propose une revue de littérature complète sur les principaux indices de végétation issus de la télédétection, leurs fondements, leurs applications et leur relation avec la température de surface. Il se divise en deux grandes sections :

- La première est consacrée aux définitions, à l'utilité et aux types d'indices de végétation.
- La seconde explore la relation entre ces indices et la température de surface, en s'appuyant sur des travaux scientifiques récents.

1 La Télédétection

La télédétection par satellite est l'ensemble des techniques qui permet d'observer et d'évaluer à distance l'énergie émise et réfléchiée par un objet. Généralement, cette technique est mise en œuvre au moyen d'avions et de satellites. Mais quelle est la finalité de la télédétection ? En bref, elle est utilisée pour étudier tout objet dans le but d'identifier et de suivre les changements dans ses caractéristiques physiques (Kergomard, n.d.).

Des caméras spécialement conçues pour la télédétection jouent un rôle crucial en fournissant aux scientifiques des images à distance pour mieux comprendre la Terre. Dans le même temps, chacun peut bénéficier de l'évaluation plus précise d'une zone d'intérêt (ZI) et prendre des décisions éclairées grâce à des capteurs satellites de télédétection qui offrent une perspective élargie et une abondance d'informations (EOS, 2024). Voici quelques exemples concrets :

- Les caméras installées sur les appareils de télédétection et les avions capturent des images couvrantes d'immenses étendues de la surface terrestre et permettent d'accéder à des détails qui seraient autrement inaccessibles.
- Les sonars des navires établissent des cartes des fonds marins sans nécessité de plongées en profondeur.
- Les caméras des satellites saisissent les variations de température, y compris dans les zones éloignées et inaccessibles de l'océan (EOS, 2024).

Deux formes principales de données satellitaires sont les images optiques et radar, issues de différents types de télédétection. Les images optiques fournissent une vue panoramique impressionnante de la planète, mais le bon fonctionnement des capteurs optiques dépend de la lumière solaire et qui ne peuvent pas percer les nuages. En revanche, les capteurs radar sont opérationnels de jour comme de nuit, par tous les temps. De plus, la télédétection radar peut révéler des informations telles que l'humidité du sol, la végétation submergée, la contamination de l'eau et la biomasse dans les zones forestières, autant de détails invisibles à l'œil nu (EOS, 2024).

En combinaison avec d'autres sources de données, les informations fournies par la télédétection offrent aux planificateurs urbains une vision plus complète et actualisée de leurs zones de responsabilité. La consommation d'eau, l'humidité du sol, les infestations de parasites et de mauvaises herbes, les périodes de jachère et l'expansion urbaine ne sont que quelques exemples

des éléments mesurables et surveillables grâce à ces avancées technologiques (Kergomard, n.d.).

Le mot télédétection (en anglais « remote sensing ») désigne l'ensemble des techniques qui permettent d'étudier à distance des objets ou des phénomènes. Le néologisme « remote sensing » fait son apparition aux Etats-Unis dans les années soixante, lorsque des capteurs nouveaux viennent compléter la traditionnelle photographie aérienne. Le terme de télédétection a été introduit officiellement dans la langue française en 1973 et sa définition officielle est la suivante :

« Ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci. » Commission interministérielle de terminologie de la télédétection aérospatiale, 1988.

Selon cette définition très vaste, la télédétection peut se pratiquer de la surface de la Terre vers l'atmosphère ou vers l'espace, comme de l'espace vers la Terre, et l'astronomie utilise largement la télédétection. Mais ce cours concerne plus précisément les techniques de la télédétection aérospatiale, qui a pour but l'étude de la surface de la Terre, des océans et de l'atmosphère à partir d'avions, de ballons ou de satellites, en utilisant les propriétés du rayonnement électromagnétique émis, réfléchi ou diffusé par les corps ou surfaces que l'on étudie (Kergomard, n.d.).

Une définition plus précise, et pour nous plus opérationnelle, de la télédétection est la suivante: *« La télédétection est l'ensemble des techniques qui permettent, par l'acquisition d'images, d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre (y compris l'atmosphère et les océans), sans contact direct avec celle-ci. La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et analyser l'information qu'il représente, pour ensuite mettre en application cette information. »* (Télédétection, 2024)

2 Éléments de la télédétection

L'interaction du rayonnement incident avec les objets étudiés et sa détection par un capteur représentent une illustration notable de la télédétection. Les systèmes d'imagerie sont un exemple parlant, incorporant généralement les éléments de télédétection énumérés

cidessous. Il convient néanmoins de noter que la télédétection englobe également des capteurs non imageurs ainsi que la détection de l'énergie émise (Canada, n.d.).

Les sept constituants fondamentaux suivants forment l'infrastructure de base de la télédétection :

- **Source d'énergie/illumination** : Nécessité d'une source d'énergie pour éclairer l'objet ou fournir un rayonnement électromagnétique.
- **Rayonnement/énergie et atmosphère** : Le rayonnement interagit avec les particules atmosphériques lors de son trajet vers l'objet d'étude, et une interaction supplémentaire peut se produire lorsqu'il atteint l'objet.
- **Objet d'étude** : Lorsque l'énergie atteint l'objet, son interaction dépend des caractéristiques de l'objet et du rayonnement.
- **Capteur enregistreur de rayonnement** : Un capteur capture le rayonnement émis ou réfléchi par l'objet d'étude à distance.
- **Système de traitement des données** : Les données collectées par le capteur sont envoyées à un centre de traitement pour être converties en une image utilisable.
- **Analyse et interprétation** : Les images traitées sont analysées et interprétées visuellement ou numériquement pour obtenir des informations sur l'objet d'étude.
- **Application pratique** : L'objectif final est d'exploiter les informations obtenues pour améliorer la compréhension de l'objet, découvrir des éléments inconnus ou résoudre des problèmes pratiques (Commission, 2025).

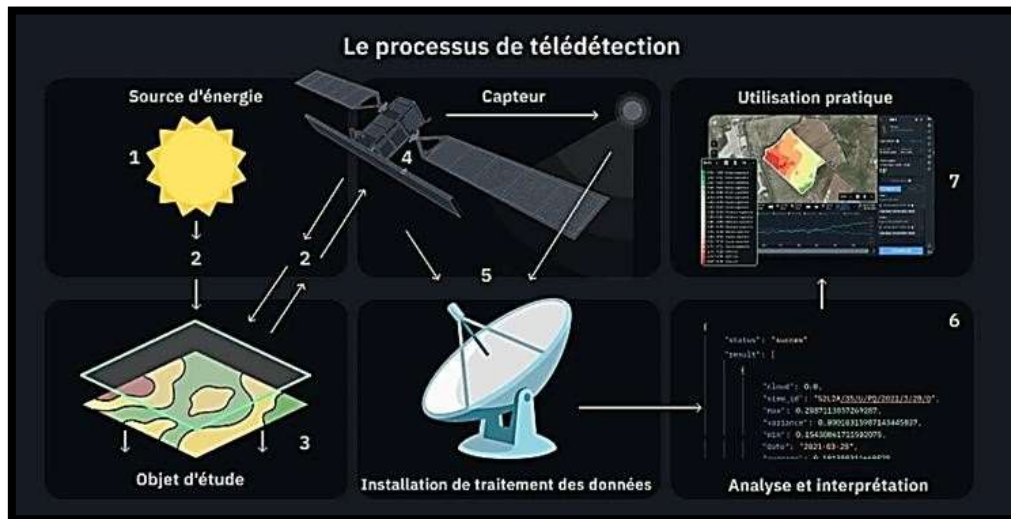


Figure 1: Éléments de la télédétection (EOS, 2025)

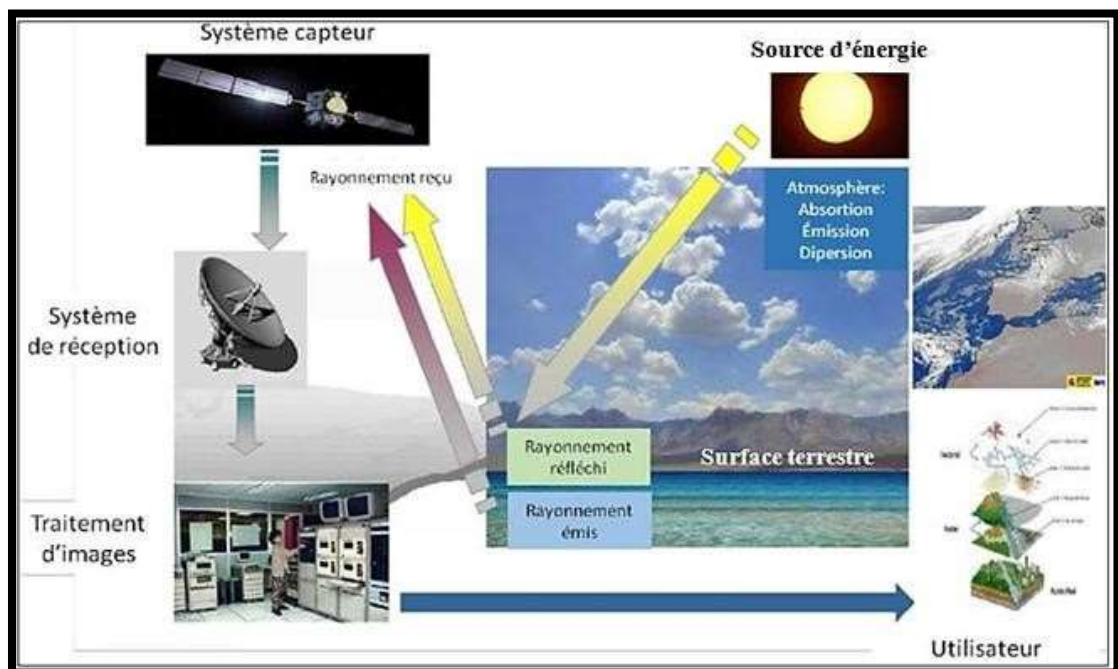


Figure 2: Schéma général de fonctionnement du système de télédétection optique satellitaire (Togo, n.d.)

3 Les domaines d'application de la télédétection:

Le premier grand domaine d'application de la télédétection a été **l'étude de l'atmosphère (météorologie et climatologie)**. L'intérêt de la télédétection dans ce domaine est d'assurer une couverture globale et très fréquemment répétée de la planète entière ; par contre la résolution spatiale n'est pas primordiale pour les applications météorologiques. Les satellites en orbite géostationnaire, à 36000 km de la Terre, permettent d'obtenir une image

couvrant près d'un cinquième de la surface terrestre toutes les demi-heures ; cinq satellites de ce type assurent une couverture globale de l'atmosphère terrestre, à l'exception des pôles. Ce système est complété par des satellites en orbite polaire, à 900 km d'altitude, qui offrent plus de précision.

Les capteurs utilisés permettent d'observer les nuages et leur déplacement, de mesurer des températures ou le contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère. Parallèlement au système opérationnel de veille météorologique, la météorologie est un domaine très actif de la recherche en télédétection ; des capteurs encore expérimentaux, utilisant les micro-ondes, effectuent de véritables sondages de l'atmosphère et mesurent la composition de la stratosphère (ozone) ou les termes du bilan radiatif. Le traitement des données par les physiciens a pour but d'obtenir des paramètres géophysiques susceptibles d'être intégrés dans des modèles numériques de prévision météorologique ou de l'évolution climatique future.

- **En océanographie**, la télédétection offre l'avantage de permettre une vision synoptique de vastes régions qu'il est impossible d'obtenir par les moyens traditionnels (bateaux). Pour certaines études à petite échelle, les données des satellites météorologiques sont largement utilisées en océanographie (températures de surface de l'océan) ; pour les études côtières, ce sont les satellites de télédétection terrestre, équipés de capteurs à haute résolution, qui sont les plus utiles. Des satellites spécialisés à vocation océanographique ont volé dans un passé récent (Nimbus, Seasat) ou volent depuis le début des années 90 (ERS-1 de l'Agence Spatiale Européenne, TOPEX-Poseidon). Les types de capteurs utilisés pour l'océanographie sont très variés. Les radiomètres utilisant le rayonnement visible analysent la couleur de l'océan, qui permet de mesurer la production biologique (plancton) et la turbidité ; les radiomètres infrarouge ou microonde mesurent la température de surface de la mer. La répartition des températures ou des turbidités est un indice des courants océaniques. Les radars embarqués sur des avions ou certains satellites ont l'avantage d'être insensibles aux nuages ; ils permettent d'observer les phénomènes ondulatoires présents sur l'océan, les vagues en particulier. Enfin, certains types particuliers de capteurs, radars-altimeètres ou diffusiomètres sont utilisés pour mesurer avec une très grande précision l'altitude de la surface de la mer qui est un reflet de la dynamique océanique (courants généraux), ou la vitesse du vent sur la mer. Parmi les applications océanographiques de la télédétection, citons enfin l'étude des glaces de mer en régions polaires.

- **Les applications terrestres** de la télédétection sont extrêmement variées. La photographie aérienne, sous toutes ses formes, est encore, sans doute pour peu de temps, le

moyen le plus usuel de télédétection ; les photographies aériennes sont de plus en plus utilisées sous forme numérique de façon à permettre leur correction géométrique (orthophotos) et leur intégration dans les Systèmes d'Information Géographique. En télédétection spatiale, ce sont surtout les radiomètres optiques à haute ou très haute résolution qui sont utiles pour les applications terrestres. Depuis 1972, les progrès dans ce domaine sont remarquables : on est passé d'une résolution de 80 m (MSS de Landsat), à 30m (Thematic Mapper) et à 20 et 10 m (HRV de SPOT). En géologie ou pour l'étude de la végétation, les radars imageurs, surtout aéroportés, sont aussi très utilisés. Le champ des utilisations de la télédétection ne cesse de s'élargir : cartographie, géologie et prospection minière, mais aussi surveillance des cultures ou du couvert forestier, urbanisme, aménagement, génie civil, etc... Le traitement de l'imagerie satellitaire numérique est une discipline en constant développement, et la baisse du coût des matériels informatiques a entraîné une augmentation rapide du nombre des utilisateurs.

Domaines	Exemples d'applications
Géosciences	Géologie, pédologie, géomorphologie...
Météorologie	Vitesses des vents, précipitations, températures, détection des cyclones, orages...
Océanographie	Couleur de l'eau, turbidité, hauteur des vagues, courant marin, Phytoplancton, pollution marine...
Foresterie	Couverture forestière, santé des forêts, impacts après ouragans...
Cadastre / Urbanisme	Couverture du sol, urbanisation, contrôle des autorisations (piscines, Zones bâties...)
Agriculture	Identification des plantations, évaluation de la production...
Environnement	Etudes d'impact, détection des changements...
Biologie / Ecologie	Classification des types de végétaux, étude du corail, cartographie des habitats
Télécommunication	Carte de répartition des antennes de téléphonie mobile...

Hydrologie	Comportements de l'eau à la surface du sol et dans le sol, cycle de l'eau...
Archéologie	Cartographie des sites archéologiques
Santé	Prévision des épidémies, relations avec les changements globaux...
Humanitaire	Pré-alerte de famines : réfugiés (camps)...
Catastrophes environnementales	Feux de forêts, éruptions volcaniques, sécheresses, marées noires...
Changements globaux	Désertification, variation climatiques, compositions l'atmosphère.

Tableau 1: Domaines d'application de la télédétection .

4 Importance de la télédétection pour l'étude de la végétation

- **Observation à large échelle et couverture spatiale étendue :** Contrairement aux études au sol qui sont souvent ponctuelles et limitées, la télédétection permet d'acquérir des données sur de vastes étendues géographiques, qu'il s'agisse de forêts entières, de régions agricoles, ou même de l'échelle continentale. Ceci offre une perspective globale et permet d'étudier les patrons de végétation et les changements à des échelles impossibles à atteindre par des méthodes traditionnelles.
- **Acquisition répétée et suivi temporel :** Les satellites et les aéronefs peuvent acquérir des données de manière régulière et fréquente. Cette capacité de suivi temporel est essentielle pour comprendre la dynamique de la végétation, comme les cycles saisonniers (phénologie), la croissance, les réponses aux événements climatiques (sécheresses, inondations), et les changements à long terme (déforestation, reforestation, expansion agricole).
- **Accès à des informations spectrales riches :** Les capteurs en télédétection enregistrent le rayonnement électromagnétique réfléchi ou émis par la surface terrestre dans différentes longueurs d'onde, y compris des portions invisibles à l'œil humain (infrarouge proche, infrarouge moyen, etc.). Ces informations spectrales révèlent des propriétés biophysiques et biochimiques de la végétation (teneur en chlorophylle,

biomasse, teneur en eau, stress) qui ne peuvent pas être facilement évaluées par d'autres méthodes.

- **Objectivité et standardisation des données :** Les données de télédétection sont acquises de manière objective et standardisée par les capteurs. Cela permet une comparaison plus aisée des données dans le temps et l'espace, réduisant les biais potentiels associés aux observations subjectives sur le terrain.
- **Réduction des coûts et de l'effort sur le terrain :** Bien que la télédétection nécessite des compétences spécifiques pour l'analyse des données, elle peut considérablement réduire les coûts et l'effort associés aux campagnes de terrain intensives, en particulier dans les zones difficiles d'accès ou dangereuses.
- **Fourniture d'informations pour la modélisation et la prédiction :** Les données de télédétection sur la végétation sont des intrants précieux pour de nombreux modèles écologiques, climatiques et agricoles. Elles permettent d'améliorer la compréhension des processus biophysiques, de simuler les changements futurs et de prendre des décisions éclairées en matière de gestion des ressources naturelles.

5 Les indices de végétation

5.1 Définition et utilité

L'indice de végétation est un paramètre important de l'analyse du développement des cultures. Parmi les nombreux avantages des indices de végétation en télédétection, la précision des données et le contrôle à distance sont les principaux moteurs de l'adoption de la technologie. Les avancées des capteurs permettent aux satellites d'observation de la Terre de collecter constamment de nouvelles données pour alimenter les recherches et améliorer l'analyse existante en télédétection. En adoptant les dernières innovations en matière d'indices de végétation, les entreprises disposant déjà d'un logiciel basé sur cet indice, ainsi que celles qui envisagent de lancer de nouveaux produits, peuvent considérablement augmenter la demande pour leurs produits liés à l'agriculture.

Comme leur nom l'indique, les indices de végétation sont liés à l'étude du couvert végétal, qui constitue l'un des premiers axes de recherche dans le cadre de l'évaluation et de

la gestion des ressources naturelles par l'application des techniques de télédétection, qui étaient à l'époque des images satellites obtenues à partir du lancement de la série LANDSAT. Ils sont liés à un ensemble d'opérations algébriques, qui sont effectuées sur les valeurs numériques des différents pixels, en utilisant deux ou plusieurs bandes appartenant au même point. Ils peuvent être définis comme le paramètre obtenu à la suite de la combinaison de deux ou plusieurs valeurs de réflectance à différentes longueurs d'onde, avec lequel une caractéristique spécifique de la culture peut être mise en évidence, comme l'estimation de la perte de constituants biochimiques de la chlorophylle ou de l'eau ou la détection de changements dans les pigments foliaires ou dans la fluorescence de la chlorophylle. Il est établi que l'indice idéal est sensible au couvert végétal, insensible à la luminosité et à la couleur du sol et peu affecté par les perturbations atmosphériques, les facteurs environnementaux et les géométries d'éclairage et d'observation (Tucker, 1979.).

Les indices de végétation sont généralement utilisés pour :

- **Estimer la biomasse et la productivité primaire nette (PPN) :** Ils permettent de mesurer la quantité de biomasse produite par la végétation, un paramètre essentiel pour l'agriculture et les études écologiques.
- **Surveiller la santé de la végétation :** Ces indices permettent de détecter les zones affectées par des stress abiotiques (sécheresse, températures extrêmes) ou biotiques (maladies, infestations).

Les indices de végétation sont calculés à partir de la réflectance de la lumière dans plusieurs bandes spectrales spécifiques, particulièrement la bande visible (bleu, vert, rouge) et le proche infrarouge (NIR).

- **Suivre la dynamique de la couverture végétale :** Identifier les changements saisonniers de la végétation, la croissance des cultures agricoles ou l'impact des phénomènes climatiques (sécheresse, inondations, etc.).

Les indices de végétation sont très utilisés d'une part, pour identifier et suivre la dynamique de la végétation, mais aussi pour estimer certains paramètres biophysiques caractéristiques des couverts végétaux, comme la biomasse, l'indice de surface foliaire, la fraction de rayonnement photosynthétique actif, etc.

L'intégration d'analyses satellitaires peut augmenter la valeur actuelle des applications agricoles, ainsi que résoudre certains problèmes actuels. En particulier, en incorporant des indices de végétation dans leurs produits, les fournisseurs de logiciels peuvent profiter des avantages suivants :

- Disponibilité d'analyses de haut niveau.
- Possibilité d'élargir leur service.
- Accès à différentes sources d'images en un seul endroit.
- Réduction des dépenses internes.
- Valeur ajoutée de leurs produits.

Les nombreux avantages des indices de végétation en télédétection contribuent également à améliorer l'expérience du client. L'imagerie satellitaire par rapport aux autres données aériennes permet :

- Réduire les coûts d'exploitation des drones, de traitement des données et d'interprétation.
- Couvrir plus grands territoires par rapport à l'imagerie aérienne.
- Réduire les dépenses d'inspection du champ : les observations supplémentaires effectués par véhicule aérien sans pilote sont plus coûteuses que les visites satellites régulières.
- Obtenir des analyses de données dans un délai plus court dans un format préféré.
- Surveiller les champs malgré des rafales de vent.

En utilisant des images satellites, les fournisseurs de logiciels agricoles peuvent augmenter considérablement leur pool de données aériennes tout en économisant du temps et des ressources, tandis que les utilisateurs finaux peuvent accéder plus rapidement à plus de données. Les indices de végétation en télédétection sont ainsi utiles pour une analyse à distance de haut niveau de l'état des cultures. En cas de problème, les agriculteurs peuvent se concentrer uniquement sur les zones repérées au lieu de devoir inspecter l'ensemble du champ (Sentinel Hub, 2023.).

5.2 Principaux Indices de végétation

Il existe plusieurs indices de végétation, chacun étant conçu pour des applications spécifiques. Parmi les plus utilisés, on trouve

5.2.1 Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI)

Le NDVI ou indice de végétation par différence normalisée n'est pas un nouveau concept, et il est utilisé depuis 1973, aidant les scientifiques à évaluer et à surveiller la santé des plantes en un rien de temps. Aujourd'hui, le NDVI est devenu l'indice de végétation le plus couramment utilisé en télédétection, en particulier avec les récents progrès de l'observation de la Terre et des technologies de drones.

Il est calculé à partir de la différence entre la réflectance dans la bande proche infrarouge (NIR) et la réflectance dans la bande rouge (RED), normalisée par la somme des deux. La formule est la suivante :

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

- NIR est la réflexion dans le proche infrarouge,
- RED est la réflexion dans la bande rouge.

Interprétation des données NDVI :

L'obtention des données NDVI peut se faire de plusieurs manières. Les méthodes les plus courantes incluent :

Satellites : des images satellitaires à haute résolution fournissent des données NDVI sur de vastes zones.

Drones : équipés de capteurs spécialisés, ils offrent une flexibilité et une précision accrues pour les exploitations de taille moyenne.

Capteurs embarqués : montés sur des tracteurs ou des pulvérisateurs, ils permettent une collecte de données en temps réel.

L'interprétation des données NDVI nécessite une certaine expertise. Voici un tableau récapitulatif des valeurs NDVI et de leur signification générale :

- L'indice NDVI varie entre -1 et 1.
- Les valeurs positives, généralement comprises entre 0,2 et 0,8, indiquent la présence de végétation. Plus la valeur est élevée, plus la végétation est dense et en bonne santé.

Valeur NDVI	Interprétation
-1 à 0	Absence de végétation (eau, neige, roche)
0 à 0,2	Sol nu ou végétation très clairsemée
0,2 à 0,4	Végétation peu dense ou en stress
0,4 à 0,6	Végétation moyennement dense et saine
0,6 à 0,8	Végétation dense et très saine
0,8 à 1	Végétation extrêmement dense (rare en conditions naturelles)

Tableau 2: Interprétation de NDVI 20/04/2025

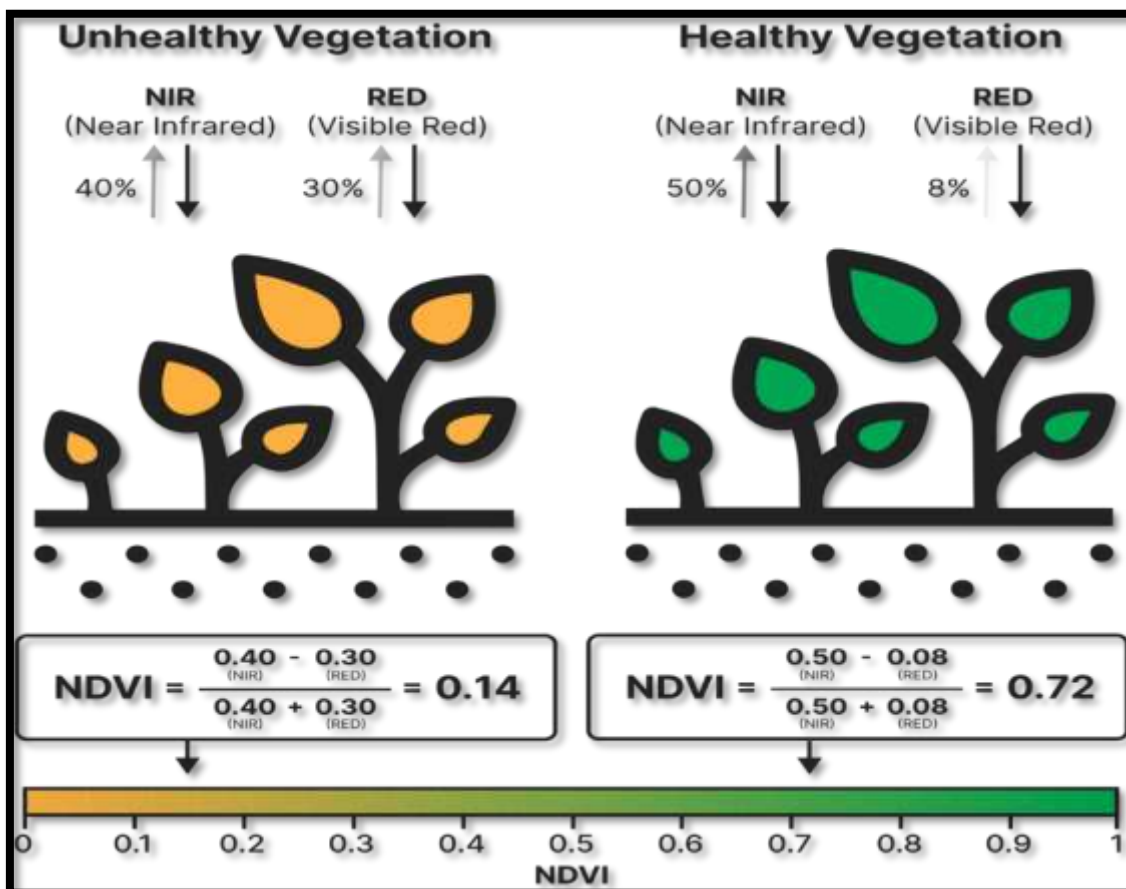


Figure 3: Présentation de NDVI 08/04/2025 (*fity.club, n.d.*)

En d'autres termes, il aide à détecter et à quantifier la présence de végétation verte vivante en fonction de la façon dont les objets interagissent avec la lumière. Pour comprendre l'état de santé de la plante, il faut comparer les valeurs d'absorption et de réflexion de la lumière rouge et NIR (proche infrarouge). C'est ici que NDVI entre en scène.

En termes mathématiques, la comparaison des signaux lumineux rouge et proche infrarouge peut aider à différencier les plantes saines des plantes malades ou à distinguer les non-plantes des plantes.

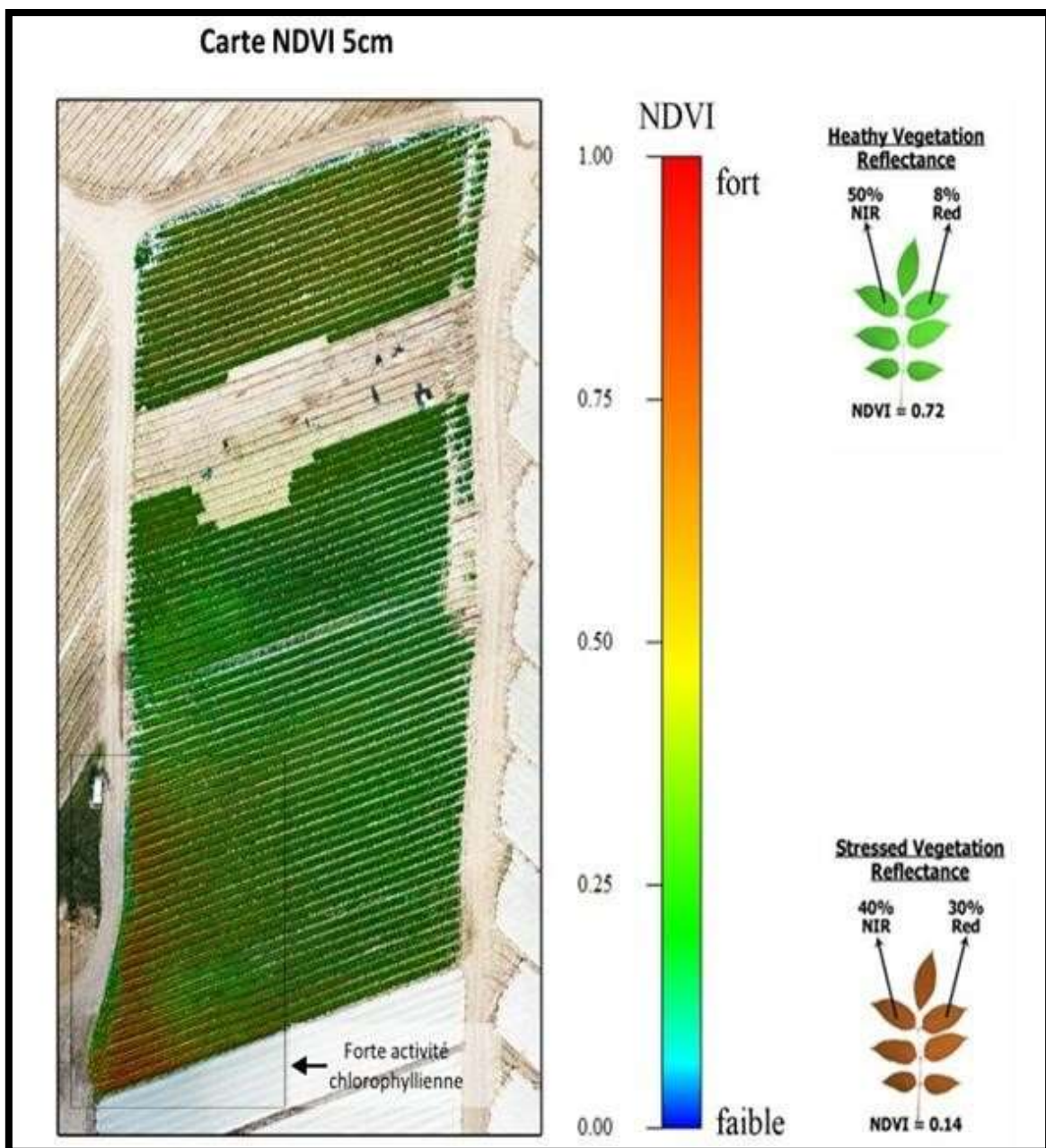


Figure 4: Carte de NDVI 5cm (*modernagriculturefarm, n.d.*)**5.2.2 Indice de Végétation à Ajustement de Sol (SAVI)**

L'indice de végétation SAVI a été développé pour réduire l'impact de la luminosité du sol. Son créateur, Huete, a introduit un facteur d'ajustement du sol (L) dans l'équation de l'indice NDVI afin de corriger les effets indésirables dus au bruit du sol (couleur du sol, humidité du sol, variabilité du sol entre les régions, etc.) qui peuvent affecter les résultats.

Le SAVI est défini par la formule :

$$SAVI = \frac{(NIR - RED)(1 + L)}{(NIR + RED + L)}$$

- NIR est la réflexion dans le proche infrarouge,
- RED est la réflexion dans la bande rouge,
- L est un facteur d'ajustement du sol (généralement, L = 0.5).

Interprétation des données SAVI :

Les valeurs du SAVI sont interprétées de manière similaire à celles du NDVI :

- Valeurs proches de 1 : Indiquent une forte densité de végétation saine.
- Valeurs proches de 0 : Correspondent à des zones avec peu ou pas de végétation.
- Valeurs négatives ou proches de -1 : Indiquent des zones non végétalisées, comme des sols nus, des eaux ou des zones urbaines (EOS, 2024).

Valeur SAVI	Interprétation
< 0	Zones non végétalisées (eau, neige, zones urbaines denses) ou sol nu avec des propriétés spectrales inhabituelles.
0 – 0,1	Sol nu ou végétation très clairsemée. Forte influence de la brillance du sol.
0,1-0,2	Végétation clairsemée ou en début de croissance. Influence modérée de la brillance du sol.

0,2-0,4	Couverture végétale modérée. Peut représenter des prairies, des cultures en début de saison ou des forêts peu denses. L'influence du sol est réduite.
0,4-0,6	Végétation saine et modérément dense. Représente typiquement des prairies productives, des cultures en croissance active ou des forêts avec une canopée plus fermée
0,6-0,8	Végétation dense et saine. Caractéristique des forêts denses, des cultures à pleine maturité ou des zones de végétation luxuriante.
> 0.8	Végétation très dense et potentiellement saturée. Peut indiquer une biomasse végétale très élevée, mais dans certains cas, des valeurs très élevées peuvent être affectées par des effets atmosphériques ou de canopée.

Tableau 3: Interprétation de SAVI 20/04/2025

Quand l'utiliser :

L'indice de végétation SAVI est un outil précieux pour l'analyse des cultures jeunes et des régions arides avec une végétation clairsemée et des surfaces de sol exposées.



GIF 1: La différence de SAVI

5.2.3 L'Indice de Végétation Amélioré (EVI)

L'indice de végétation amélioré (EVI) est calculé de la même façon que le NDVI mais utilise des longueurs d'onde de la lumière supplémentaires pour corriger les imprécisions du

NDVI, notamment les variations de l'angle d'incidence solaire, les conditions atmosphériques comme les distorsions de la lumière réfléchiée par les particules dans l'air ainsi que les signaux de la couverture du sol au-dessous de la végétation. L'EVI est conçu pour améliorer la sensibilité dans les régions à forte végétation et pour compenser les effets atmosphériques comme la pollution et l'absorption par l'eau. La formule de l'EVI est la suivante :

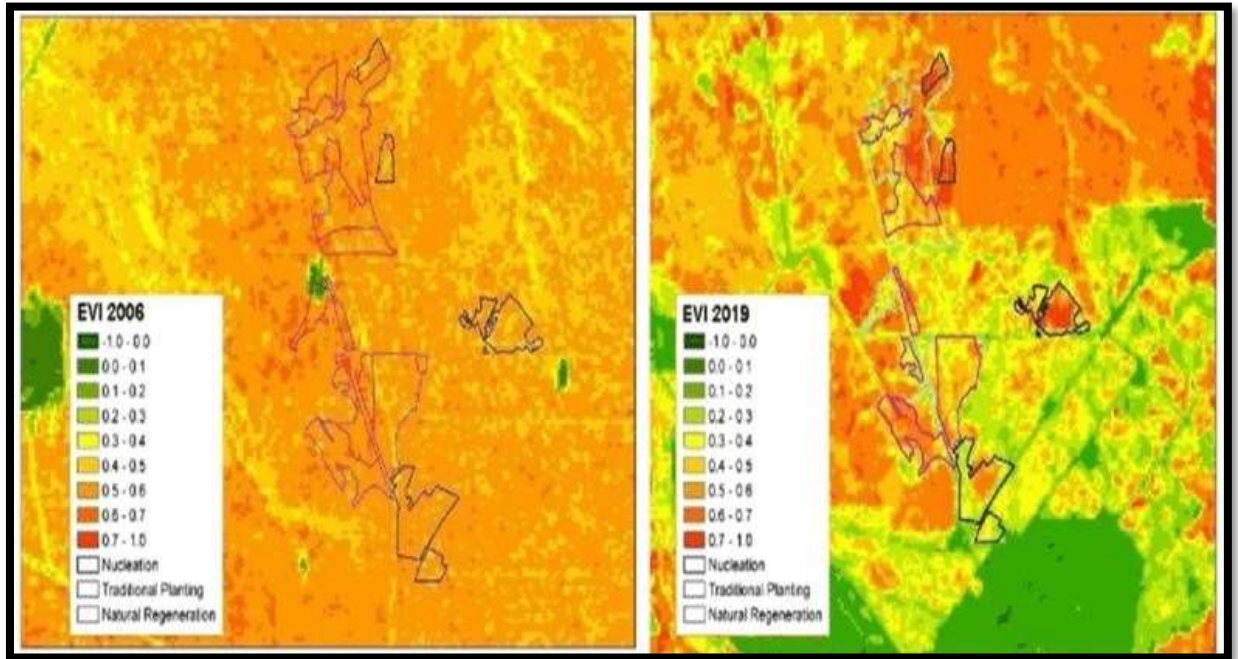
$$EVI = G \times NIR - \frac{(NIR - RED)}{(NIR + C_1 \times RED - C_2 \times BLUE + L)}$$

- NIR : Réflexion dans la bande proche infrarouge,
- RED : Réflexion dans la bande rouge,
- BLUE : Réflexion dans la bande bleue (ajoutée pour améliorer la correction atmosphérique),
- G : Facteur de gain (généralement fixé à 2.5),
- C1 et C2 : Paramètres de correction pour les effets atmosphériques (souvent fixés à 6 et 7.5 respectivement),
- L : Valeur de compensation du sol (généralement fixée à 1)

Interprétation des données de EVI

- **Valeurs proches de 1 ou plus** : Indiquent une forte densité de végétation saine.
- **Valeurs proches de 0** : Indiquent des zones à faible couverture végétale ou des surfaces non végétalisées, comme des sols nus.
- **Valeurs négatives** : Indiquent des zones comme des étendues d'eau ou des surfaces non végétalisées (paysages urbains, etc.).

L'indice de végétation EVI est utilisé pour analyser les zones de la Terre présentant de grandes quantités de chlorophylle, telles que les forêts tropicales. Il est préférable d'utiliser l'indice de végétation EVI dans des régions à faible relief, évitant ainsi les effets topographiques minimales, notamment les zones montagneuses.



**Figure 5: Les valeurs de l'indice amélioré de végétation (EVI) pour chaque pixel
08/04/2025**

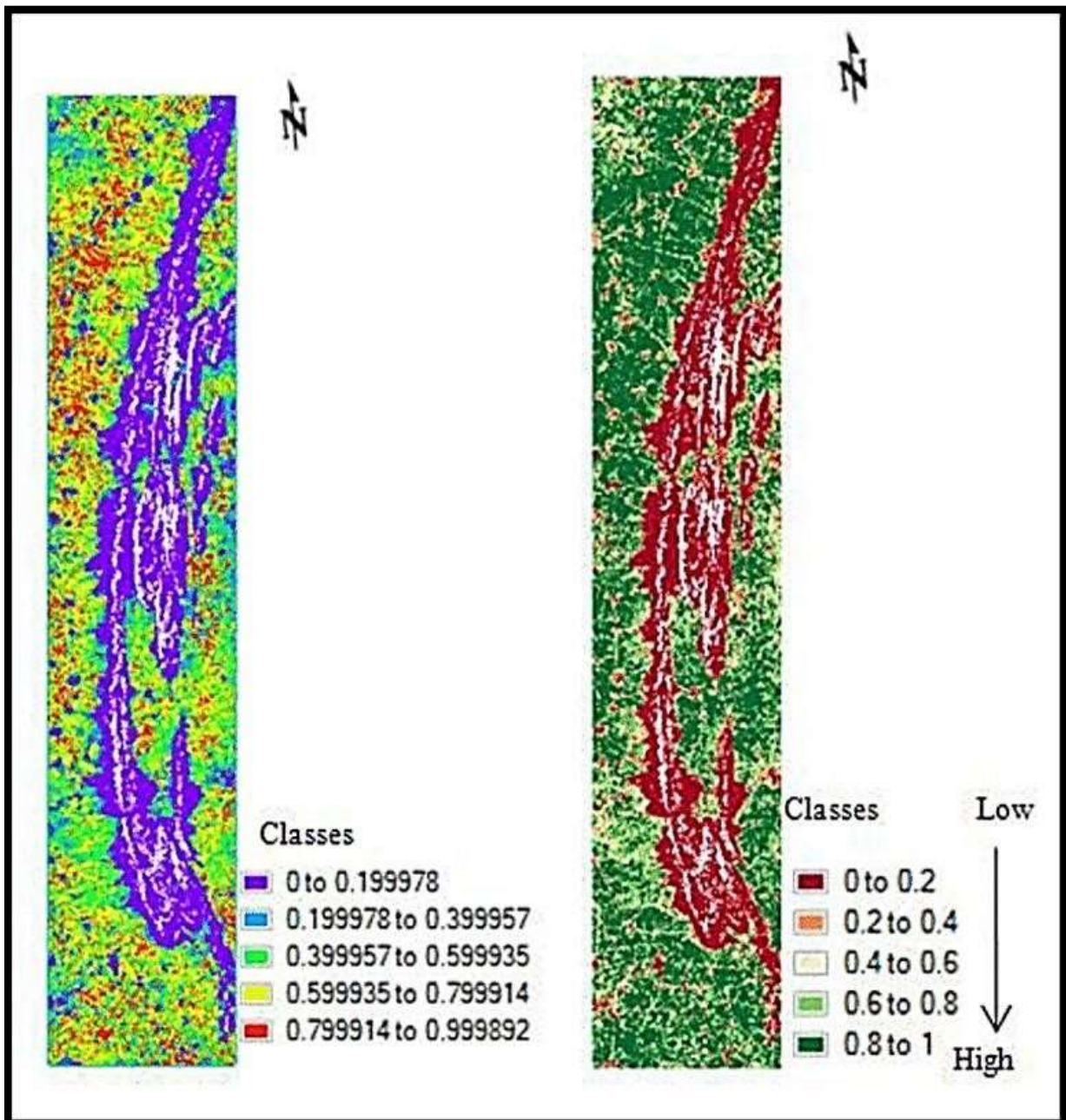


Figure 6: Indique (a) la carte de l'indice amélioré de végétation (EVI) (b) la carte de l'indice normalisé de différence de végétation (NDVI) 08/04/2025 (*researchgate, n.d.*)

5.2.4 Indice D'eau De Différence Normalisée (NDWI)

L'indice d'eau par différence normalisée (NDWI) est utilisé pour détecter les bassins d'eaux ouvertes sur l'image satellitaire : le corps hydrique «se démarque» du sol et de la végétation (ResearchGate, n.d.).

L'indice d'eau par différence normalisée (indice NDWI) a été proposé par McFeeters en 1996. Aujourd'hui, il est utilisé principalement pour détecter et surveiller de faibles

changements de la teneur en eau aux bassins d'eau. En utilisant les avantages du NIR (proche infrarouge) et du GREEN (vert visible), l'indice d'eau par différence normalisée (indice NDWI) permet d'améliorer la détection des bassins d'eau sur les images satellitaires. L'inconvénient de cet indice consiste en ce qu'il est sensible aux structures bâties, ce qui peut conduire à la surestimation des bassins d'eau (ResearchGate, n.d.).

L'équation pour le calcul de NDWI :

$$NDWI = \frac{(GREEN - NIR)}{(GREEN + NIR)}$$

Le vert visible maximise la capacité de réflexion de la surface de l'eau. Le proche infrarouge maximise la capacité de réflexion élevée de la végétation terrestre et des éléments du sol et minimise la capacité de réflexion faible des bassins d'eau.

Les résultats de la résolution de l'équation pour l'indice NDWI sont les bassins d'eau et les valeurs négatives (ou nulles) pour le sol et la végétation terrestre (Publication, n.d.).

Interprétation des données de NDWI

Les valeurs de l'indice NDWI pour les bassins d'eau sont supérieures à 0,5. L'indice NDWI pour la végétation prend les valeurs beaucoup plus faibles, ce qui permet de distinguer plus facilement la végétation et les bassins d'eau. L'indice NDWI pour les éléments bâtis prend les valeurs positives comprises entre 0 et 0,2.

Valeur NDWI	Interprétation
0,2 – 1	Surface de l'eau
0.0 – 0,2	Inondation, haute humidité
-0,3 – 0.0	Sécheresse modérée, surfaces non aqueuses
-1 – -0.3	Sécheresse, surfaces non aqueuses

Tableau 4: Interpretation de NDWI

5.2.4.1 Utilisation De L'indice NDWI

Chaque fois qu'il est nécessaire de détecter un bassin d'eau, de préciser son contour sur la carte et de surveiller les changements de sa clarté, l'indice NDWI est appliqué. Au-delà du spectre visible vers l'infrarouge, l'eau ne réfléchit pas la lumière. Grâce à cette propriété de l'eau, NDWI utilise avec succès pour délimiter les bassins d'eau sur les cartes de terrain et surveiller la turbidité de l'eau.

5.2.4.2 NDWI : Visualisation De L'indice

Les données extraites de l'image satellitaire à l'aide de l'indice NDWI sont visualisées sous forme des cartes : on utilise de diverses palettes et des graphiques pour montrer l'évolution temporelle des valeurs de l'indice. Les valeurs plus élevées proches de +1 sont généralement affichées en bleu et correspondent soit à l'haute teneur en eau, soit à la surface d'eau, tandis que les valeurs plus basses, jusqu'à -1, sont les signes de la sécheresse, à moins que la zone de l'intérêt soit une surface non aqueuse (EOS, 2024).

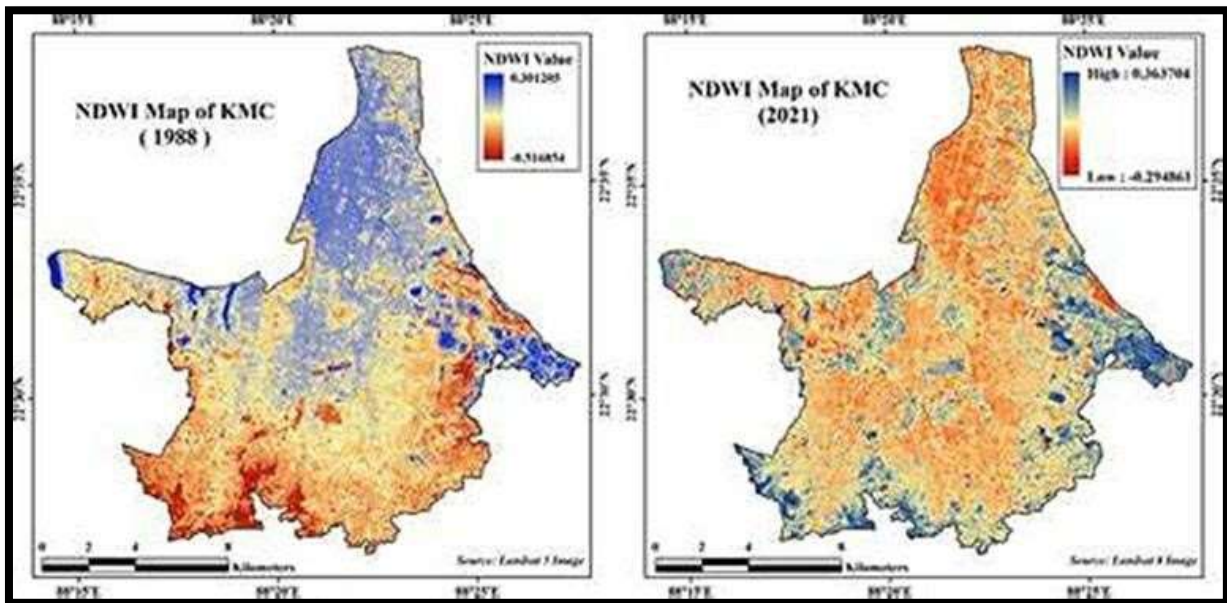


Figure 7: NDWI carte dans 1988 (a) and dans 2021 (c) 20/04/2025 (researchgate, n.d.)

5.3 Capteurs utilisés

- Landsat (notamment les séries Landsat 7 et 8) fournit des mesures de température de surface à une résolution de 30 m.

- MODIS (sur les satellites Terra et Aqua) fournit des données globales à une résolution de 1 km.
- Sentinel-3 (avec son capteur SLSTR) fournit des images à une résolution de 300 m.

5.4 Pourquoi ces indices sont importants ?

Tous ces indices sont essentiels pour comprendre les changements environnementaux en temps réel. Par exemple, le NDWI nous aide à suivre la disponibilité de l'eau, le NDVI nous montre l'état des cultures, le NDBI aide à surveiller l'urbanisation et le NDMI nous alerte sur les conditions d'humidité. En combinant ces indices, nous pouvons obtenir une vue d'ensemble complète des éléments clés de notre environnement, ce qui nous aide à prendre des décisions éclairées pour la gestion des ressources naturelles, la planification urbaine et l'agriculture (ResearchGate, n.d.).

Ces outils font partie intégrante de l'analyse des images satellites et sont utilisés pour mieux comprendre notre planète et répondre aux défis liés à l'environnement.

5.5 La comparaison des différents indices de végétation

Les indices de végétation sont extrêmement importants pour l'analyse du couvert végétal à l'aide d'images de télédétection. Peut-être que l'indice de végétation le plus populaire, le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), a conservé sa grande acceptation universelle entre autres en raison de sa facilité de calcul et de son efficacité générale. L'indice est basé sur la différence entre le proche infrarouge (NIR) et les bandes rouges, permettant ainsi l'évaluation de la vigueur photosynthétique dans la végétation. Cependant, les limites sont étendues, comme les effets de saturation sur la couverture végétale à très haute densité et une sensibilité accrue dans des conditions de sol nu qui peuvent incliner le résultat dans des zones de couverture végétale clairsemée (EOS, 2025).

Pour faire face à ces inconvénients, certains indices ont été développés, comme le SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index). Le SAVI intègre un facteur d'ajustement du sol, atténuant ainsi un effet négatif dans les zones semi-arides ou à couverture végétale clairsemée. Néanmoins, l'application de ce paramètre L, réglable par l'utilisateur, peut introduire une certaine subjectivité dans les analyses (Gao, 1996).

L'EVI (Enhanced Vegetation Index) représente une autre avancée par rapport au NDVI impliquant la correction atmosphérique et l'inclusion de longueurs d'onde bleues. Cela rend l'EVI moins sensible aux effets du sol et moins sujette à la saturation dans des environnements très denses, tels que les forêts ou les cultures matures. Néanmoins, l'indice nécessite des capteurs qui ont plus de trois bandes spectrales, ce qui limite ses applications dans certains cas (Huete, 1988).

Enfin, le NDWI (Normalized Difference Water Index) est un indice complémentaire important même s'il n'évalue pas directement la végétation. Il est utilisé pour évaluer l'humidité des feuilles et détecte ainsi le stress hydrique dans les plantes. Il a été démontré qu'il est très utile pour la gestion agricole et l'évaluation des ressources en eau lorsqu'il est calculé à partir de bandes vertes et du proche infrarouge (Gao, 1996).

En résumé, chacun de ces indices – NDVI, SAVI, EVI et NDWI – a des forces particulières et sert des objectifs particuliers selon la nature de l'environnement recherché et les objectifs d'analyse. Le NDVI demeure l'indice de choix pour une application générale, tandis que le SAVI est plus approprié dans les régions où les niveaux de sol sont élevés. L'EVI est mieux adaptée aux environnements denses qui nécessitent une analyse à fine échelle, et le NDWI est essentiel pour surveiller les contraintes hydriques. Ensemble, ils peuvent même fournir une image plus complète et précise de la santé de la végétation sur le terrain (Gitelson, A. A., & Merzlyak, M. N., 1996).

6 Application des indices de végétation dans la télédétection

Les indices de végétation en télédétection sont des outils mathématiques dérivés de données spectrales captées par des satellites ou des capteurs aériens, permettant d'évaluer la santé, la densité et la vigueur de la végétation. Ils exploitent les propriétés de réflexion de la lumière dans certaines bandes spectrales, notamment le rouge et l'infrarouge proche (NIR). Leur principe repose sur le contraste entre l'absorption de la lumière rouge par la chlorophylle et la forte réflexion de l'infrarouge proche par les tissus foliaires. Parmi les plus utilisés, l'NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) reste le plus répandu, calculé selon la formule $(\text{NIR} + \text{Rouge}) / (\text{NIR} - \text{Rouge})$, avec des valeurs variantes entre -1 et +1. Des indices dérivés, comme l'EVI (Enhanced Vegetation Index) ou le SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), corrigent les effets atmosphériques ou les interférences liées au sol nu, tandis que le NDWI (Normalized Difference Water Index) évalue l'humidité des feuilles.

Ces indices trouvent des applications variées à travers plusieurs domaines. **En agriculture**, ils permettent de surveiller les cultures pour détecter des stress hydriques, nutritionnels ou dus aux ravageurs, en identifiant des anomalies dans les valeurs d'indices. Ils sont également utilisés dans l'agriculture de précision pour optimiser l'irrigation, l'apport d'engrais ou les traitements phytosanitaires en cartographiant les parcelles. Par ailleurs, la corrélation entre les indices et la biomasse végétale aide à prédire les rendements agricoles, tout en suivant les stades phénologiques des plantes, comme la germination ou la floraison.

En foresterie, les indices de végétation servent à cartographier les forêts, en estimant leur densité, leurs espèces et leur état de santé. Ils sont cruciaux pour détecter des dégradations dues à des incendies, des abattages illégaux, des maladies ou des invasions biologiques. En combinant ces données avec d'autres paramètres, ils permettent aussi d'estimer la biomasse forestière et le stockage de carbone, tout en évaluant la régénération naturelle ou les efforts de reboisement

Dans le domaine de **l'environnement**, ces indices sont utilisés pour analyser la désertification et la dégradation des sols, en observant les tendances de couverture végétale sur le long terme. Ils aident à surveiller les effets des sécheresses via des indicateurs comme le VCI (Vegetation Condition Index) et à étudier les impacts du changement climatique sur les saisons végétales, notamment le décalage des périodes de croissance. Ils contribuent également à la conservation de la biodiversité en cartographiant les habitats naturels et en suivant l'évolution des écosystèmes sensibles.

En aménagement urbain, ils permettent d'évaluer la qualité et l'étendue des espaces verts en milieu urbain, tout en contribuant à la lutte contre les îlots de chaleur via l'analyse de la relation entre végétation et température de surface. Dans la gestion des risques, les indices comme le NBR (Normalized Burn Ratio) sont utilisés pour détecter la végétation sèche avant les feux de forêt ou pour évaluer les dommages après des catastrophes telles que des inondations ou des tempêtes.

Cependant, ces outils présentent des limites. L'NDVI, par exemple, perd de sa sensibilité en zones de très haute densité végétale, où les valeurs se saturent. Les effets atmosphériques, comme les nuages ou la vapeur d'eau, peuvent altérer les mesures, tout comme la résolution spatiale ou temporelle des capteurs, qui varie selon les satellites (ex. MODIS quotidien vs. Sentinel-2 à 10 mètres de précision). De plus, une même valeur d'indice peut

refléter des situations différentes, comme un sol humide comparé à une végétation clairsemée, nécessitant une interprétation contextuelle.

Les perspectives futures incluent la fusion de données avec des capteurs radar (comme Sentinel-1) ou Lidar pour une analyse tridimensionnelle des écosystèmes, ainsi que l'intégration de l'intelligence artificielle pour améliorer la classification automatique et les prévisions à partir de séries temporelles. Les capteurs hyperspectraux, capables de détecter des stress spécifiques (ex. carences en nutriments), ouvrent également de nouvelles possibilités.

Des exemples concrets illustrent leur utilisation mondiale. La FAO exploite l'NDVI dans le cadre du projet FEWS NET pour surveiller les sécheresses en Afrique, tandis que Sentinel-2 fournit des données à haute résolution pour l'agriculture européenne. MODIS, quant à lui, permet une surveillance globale des saisons végétales et des phénomènes de sécheresse (Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., & Deering, D.W. , (1973)).

Donc, les indices de végétation restent des outils essentiels pour une gestion durable des ressources naturelles, avec des applications croissantes dans l'agriculture, la foresterie, la conservation et la gestion des risques. Malgré leurs défis, leurs évolutions technologiques et leur intégration à des méthodes avancées renforcent leur pertinence face aux enjeux climatiques et à la sécurité alimentaire mondiale (Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., & Deering, D.W. , (1973)).

7 Relation entre les indices de végétation et la Température de Surface Terrestre (LST)

7.1 Définition et estimation de la Température de Surface Terrestre

7.1.1 Qu'est-ce que la Température de Surface Terrestre ?

La Température de Surface Terrestre (LST) représente la température de la couche supérieure du sol ou de la canopée végétale. Contrairement à la température de l'air, qui est mesurée à une certaine hauteur au-dessus de la surface, la LST est une température radiative captée par les capteurs thermiques des satellites. Elle donne des informations sur la chaleur émise par la surface du sol ou de la végétation (EOS, 2025).

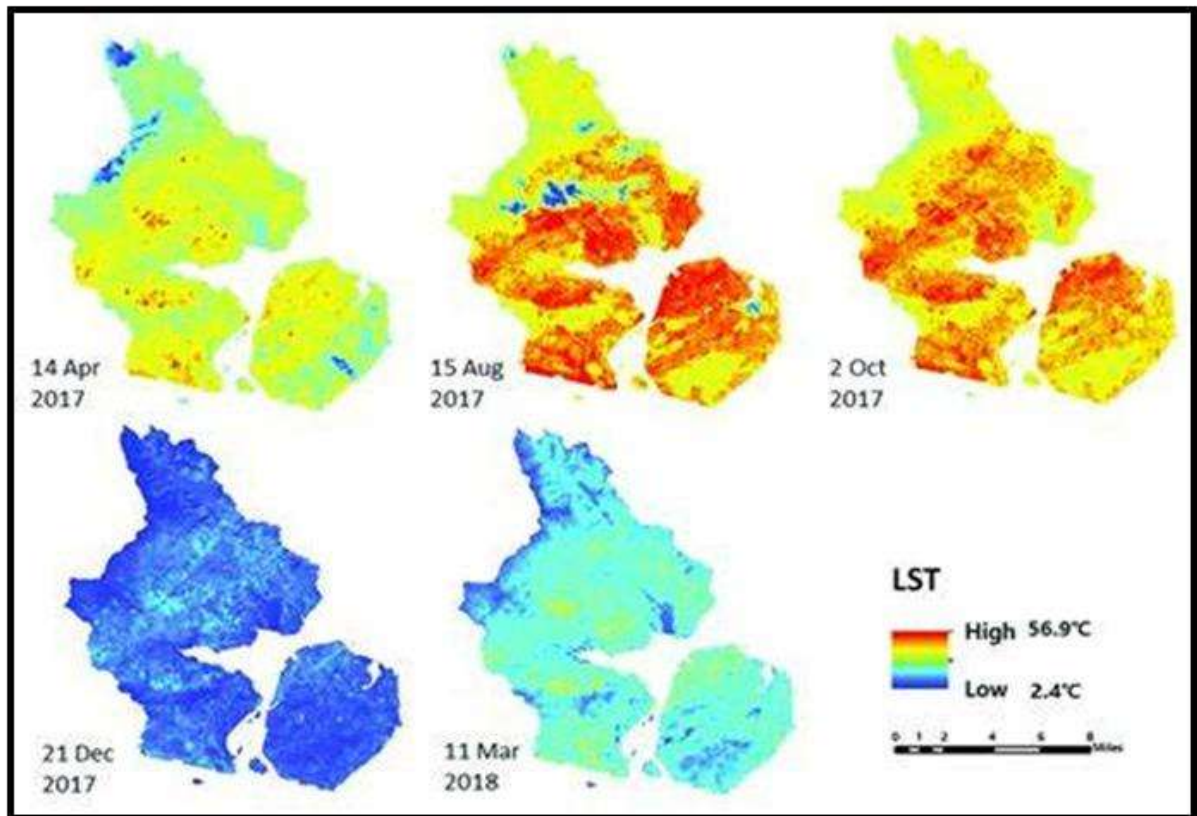


Figure 8: Présentation de LST dans Différentes années (*researchgate, n.d.*)

La LST est un indicateur important dans plusieurs domaines, notamment :

- **Le suivi climatique** : la LST permet de suivre les variations thermiques à la surface de la Terre, en lien avec le climat.
- **L'agriculture et la gestion de l'eau** : elle est utilisée pour estimer les conditions de sécheresse et le stress hydrique des cultures.
- **L'étude des îlots de chaleur urbains** : la LST aide à analyser les zones urbaines et leur capacité à accumuler et réémettre de la chaleur.
- **Les changements environnementaux** : elle permet de suivre les impacts du changement climatique sur les écosystèmes (Wan, Z., Zhang, Y., Zhang, Q., & Li, Z.-L., (2004).).

7.1.2 Comment la LST est mesurée par satellite ?

La température de surface est mesurée à l'aide de capteurs thermiques présents sur des satellites. Les satellites tels que Landsat, MODIS, et Sentinel-3 sont particulièrement utilisés pour cela. Ces capteurs collectent des données dans les bandes thermiques du spectre électromagnétique, souvent dans la gamme des longueurs d'onde infrarouge.

La formule de la température de surface (LST) est généralement calculée à partir de la radiance thermique mesurée par les satellites. Cette radiance est convertie en température en utilisant la loi de Planck pour le rayonnement thermique, en particulier à travers l'approche de la conversion radiance-température.

La formule classique pour convertir la radiance en température de surface est la suivante :

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L(\lambda) + 1}\right)}$$

T : Température de surface (en Kelvin).

K_1 et K_2 : Coefficients de calibration, spécifiques à chaque capteur et bande thermique (ces valeurs sont fournies par le fabricant du satellite, par exemple, Landsat).

$L(\lambda)$: Radiance thermique mesurée dans la bande thermique du capteur (en $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$).

Conversion en Celsius : Si nécessaire, la température en Kelvin peut être convertie en degrés Celsius en soustrayant 273,15.

$$T(^{\circ}C) = T(K) - 273.15$$

La température de surface est mesurée à l'aide de capteurs thermiques présents sur des satellites. Les satellites tels que Landsat, MODIS, et Sentinel-3 sont particulièrement utilisés pour cela. Ces capteurs collectent des données dans les bandes thermiques du spectre électromagnétique, souvent dans la gamme des longueurs d'onde infrarouge.

- Landsat (notamment les séries Landsat 7 et 8) fournit des mesures de température de surface à une résolution de 30 m.
- MODIS (sur les satellites Terra et Aqua) fournit des données globales à une résolution de 1 km.
- Sentinel-3 (avec son capteur SLSTR) fournit des images à une résolution de 300 m (Coll, 2005).

7.1.3 Pourquoi la LST est-elle importante ?

La LST est essentielle pour :

- **Évaluer la santé de la végétation** : Une température de surface élevée peut indiquer un stress thermique ou hydrique, particulièrement dans les zones agricoles.
- **Estimer la perte d'humidité** : Les zones avec une température de surface élevée, combinée à un NDVI faible, peuvent signaler un sol sec et une végétation stressée, avec une faible capacité de transpiration.
- **Surveiller les changements environnementaux** : La LST fournit des informations précieuses pour l'étude des effets du changement climatique et de l'urbanisation (Coll, 2005).

7.2 Relation théorique entre Indice de Végétation (ou IV) et LST

La relation entre NDVI (ou d'autres indices de végétation) et LST repose sur l'influence de la végétation sur la température de la surface terrestre. Voici les principales interactions :

7.2.1 L'effet de la végétation sur la Température terrestre

- **Effet de rafraîchissement de la végétation** : Les zones avec une couverture végétale dense (valeurs élevées de NDVI) ont généralement une température de surface plus faible.

Cela est dû à plusieurs facteurs :

- **Ombrage** : Les plantes créent de l'ombre sur le sol, réduisant la quantité de radiation solaire directe absorbée par la surface.

• **Evapotranspiration** : La végétation, notamment les forêts et les zones agricoles, évapore l'eau du sol et transpire par les feuilles. Ce processus consomme de l'énergie, ce qui a un effet de refroidissement local sur la température de la surface.

7.2.2 L'effet du sol nu et de la végétation clairsemée sur la Température terrestre

Surface nue et végétation clairsemée : Les zones avec peu de végétation ou de la végétation clairsemée (valeurs faibles de NDVI) ont tendance à présenter des températures de surface plus élevées. Cela est dû au fait que :

- Le sol nu ou les zones de végétation clairsemée absorbent plus de chaleur du soleil, ce qui augmente la température de la surface.
- Moins de végétation signifie moins d'évapotranspiration et moins de capacité à rafraîchir la surface

Donc Les surfaces nues ou faiblement végétalisées (NDVI faible) ont des LST plus élevées.

7.2.3 Relation inverse entre Indice de végétation normalisé NDVI et Land Surface Temperature

En général, une relation inverse est observée entre le NDVI et la LST :

- Augmentation du NDVI → Diminution de la LST : Plus il y a de végétation (NDVI élevé), plus la température de surface est faible.
- Diminution du NDVI → Augmentation de la LST : Moins il y a de végétation (NDVI faible), plus la température de surface est élevée (Coll, 2005).

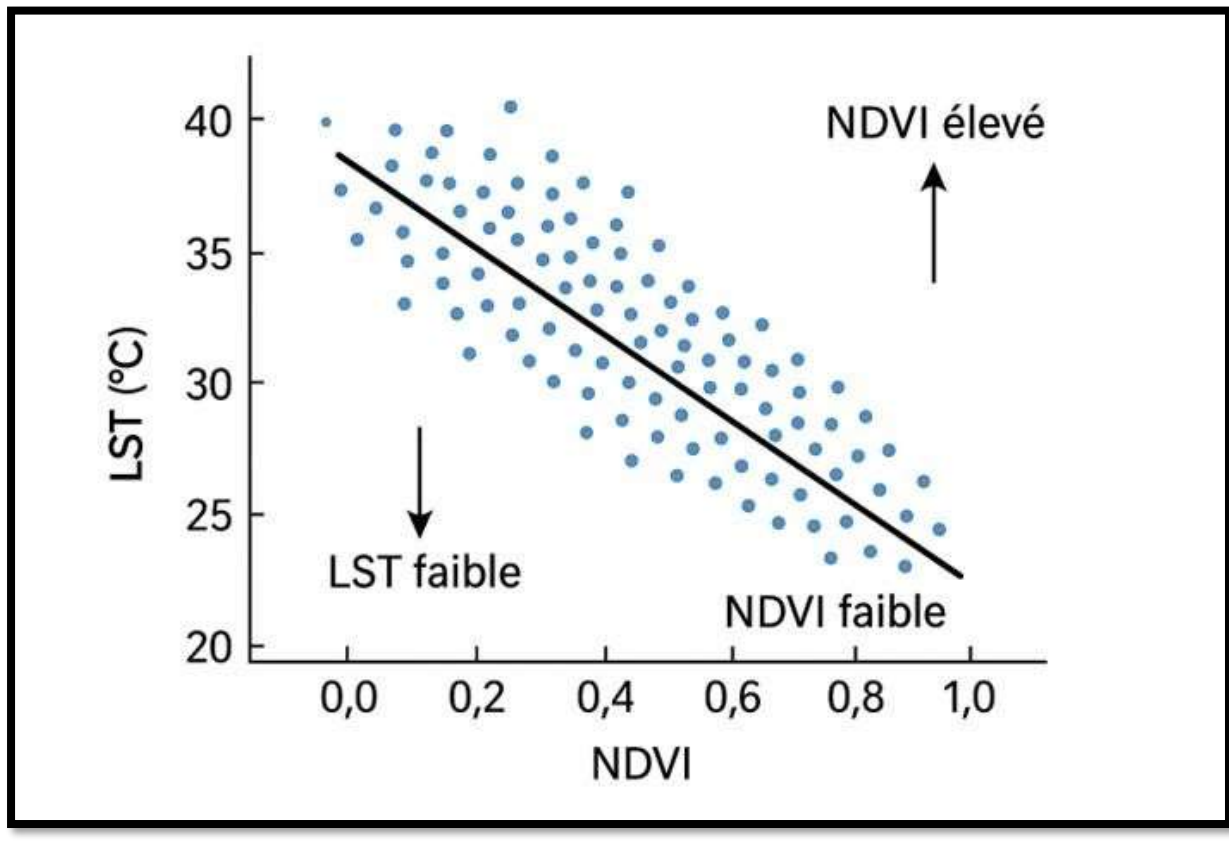


Figure 9: Relation inverse entre NDVI et LST (Jiang, 2001)

Cette image confirme Scientifiquement l'utilité de croiser les données NDVI et LST pour surveiller l'état de la végétation et diagnostiquer les déséquilibres thermiques liés au climat ou à l'activité humaine.

L'image présente une relation inverse entre l'indice de végétation (NDVI) et la température de surface terrestre (LST), illustrée par un nuage de points où chaque point représente une observation géospatiale. Plus le NDVI est élevé (indiquant une végétation dense et active), plus la température de surface est basse. Ce phénomène s'explique par le refroidissement naturel lié à l'évapotranspiration, processus par lequel les plantes dissipent de la chaleur via la transpiration de l'eau. À l'inverse, les zones avec un NDVI faible (sols nus, zones arides ou urbaines) montrent des températures de surface plus élevées, faute de végétation régulatrice.

Cette relation est utile dans le domaine de la télédétection environnementale, notamment pour:

- La détection du stress hydrique des plantes,
- La cartographie des sécheresses,

- La gestion des ressources en eau et des systèmes agricoles.

CONCLUSION

L'observation et l'analyse de la végétation à travers les outils de la télédétection représentent aujourd'hui un pilier indispensable pour relever des défis environnementaux, agricoles et climatiques majeurs. En fournissant des données spatialisées régulières, objectives et accessibles à grande échelle, la télédétection permet de surmonter les limites des méthodes traditionnelles d'observation in situ, tout en offrant une capacité unique à surveiller les dynamiques végétales sur des territoires vastes ou difficiles d'accès. Les indices de végétation, tels que le NDVI, le SAVI, l'EVI ou le NDRE, constituent des indicateurs quantitatifs clés pour évaluer la densité, la vigueur et la santé des couverts végétaux. Ces paramètres, dérivés des réflexions spectrales dans les bandes du rouge et de l'infrarouge proche, sont largement appliqués dans des domaines variés : de l'agriculture de précision à la gestion des risques environnementaux, en passant par la cartographie des phénomènes de désertification ou la détection précoce des sécheresses.

Cependant, l'étude de la végétation ne peut être dissociée de l'analyse thermique de la surface terrestre (LST), qui joue un rôle central dans les processus biogéochimiques et énergétiques. La température de surface influence directement l'évapotranspiration, le stress hydrique des plantes et les échanges d'énergie entre le sol, la végétation et l'atmosphère. L'association des indices de végétation et des données LST ouvre ainsi des perspectives prometteuses pour modéliser les interactions complexes au sein des systèmes terrestres. Par exemple, une corrélation négative entre le NDVI et la LST peut révéler une régulation thermique efficace par la végétation dense, tandis qu'une divergence pourrait signaler un stress hydrique ou une dégradation des sols.

Ce chapitre, structuré en deux sections, vise à explorer ces enjeux avec une approche méthodique et critique. La première partie propose une synthèse exhaustive des fondements théoriques, des méthodologies de calcul et des applications pratiques des principaux indices de végétation, en soulignant leurs forces, leurs limites et leurs adaptations contextuelles (par exemple, le SAVI pour les zones à faible couvert végétal, l'EVI pour corriger les effets atmosphériques). La seconde partie s'attache à analyser les liens entre ces indices et la température de surface terrestre, en s'appuyant sur des études récentes qui démontrent comment

cette synergie améliore la compréhension des mécanismes écologiques, des dynamiques microclimatiques et des impacts du changement climatique.

En intégrant une revue critique des avancées scientifiques et technologiques, ce travail cherche à établir un cadre conceptuel et opérationnel pour exploiter pleinement le potentiel des données de télédétection dans la gestion durable des écosystèmes. Il met également en avant l'importance d'une approche interdisciplinaire, combinant données satellitaires, modélisations numériques et validations in situ, pour répondre aux besoins croissants de surveillance environnementale et de prise de décision éclairée. Ainsi, cette synthèse théorique et méthodologique posera les bases des analyses approfondies développées dans les chapitres ultérieurs, tout en contribuant à enrichir les outils d'aide à la décision pour les acteurs de l'agriculture, de l'aménagement du territoire et de la lutte contre les crises climatiques.

CHAPITRE 02 : Etude de la zone

INTRODUCTION

Dans le cadre de ce mémoire consacré à **l'apport de la télédétection dans l'extraction et l'analyse des indices de végétation de 1990 à 2022**, la commune de Chlef constitue un choix de zone d'étude hautement pertinent. Située au nord-ouest de l'Algérie, cette commune, chef-lieu de la wilaya de Chlef, s'étend sur une superficie d'environ 222 km² et se trouve au cœur de la vallée du Cheliff, l'une des régions agricoles les plus importantes du pays.

Ce territoire se caractérise par une diversité paysagère remarquable, alternant entre plaines fertiles, collines et formations montagneuses périphériques. Ces caractéristiques physiques, conjuguées à un climat méditerranéen à tendance semi-aride, influencent fortement la dynamique de la couverture végétale (Alger., 2007).

La commune est traversée par l'oued Cheliff, principal cours d'eau de la région, qui joue un rôle essentiel dans le soutien de l'activité agricole locale grâce à l'irrigation. Il constitue également un indicateur des fluctuations hydrologiques, ayant un impact direct sur la dynamique de la végétation.

Le choix de la période 1990–2022 pour cette étude repose sur plusieurs arguments scientifiques et techniques. Dès les années 1990, les satellites comme **Landsat 5**, puis **Landsat 7**, **Landsat 8**, et **Sentinel-2** ont permis l'acquisition régulière de données multispectrales adaptées à l'analyse de la végétation via des indices tels que le **NDVI**. Cette période couvre aussi des événements environnementaux majeurs ayant influencé la couverture végétale de la commune de Chlef, des efforts de **reboisement**, et les impacts croissants du **changement climatique**. En allant jusqu'à 2022, l'étude bénéficie des données les plus récentes, permettant d'analyser les tendances actuelles et de proposer des recommandations pour une gestion durable de la végétation.

Cette période offre ainsi une base solide pour une analyse approfondie et pertinente des dynamiques de végétation dans la commune de Chlef.

1 LE CHOIX DE CHLEF POUR ZONE ETUDE

Le choix de la wilaya de Chlef comme zone d'étude pour ce mémoire s'explique par plusieurs raisons à la fois géographiques, socio-économiques et scientifiques.

Tout d'abord, la wilaya de Chlef présente une grande diversité géographique, combinant des plaines fertiles, des reliefs montagneux et un littoral maritime. Cette variété de milieux physiques offre un terrain d'étude riche et pertinent, notamment pour analyser les dynamiques d'occupation du sol, la gestion des ressources naturelles et les problématiques liées à l'aménagement du territoire (Chlef., (2015)).

Ensuite, sur le plan socio-économique, Chlef est l'une des principales régions agricoles d'Algérie grâce à la plaine du Cheliff. Ce potentiel agricole, couplé à des défis réels de gestion de l'eau, de pression foncière et d'urbanisation, en fait un cas d'étude idéal pour comprendre les interactions entre développement économique et gestion durable du territoire (INRAA., (2016).).

Par ailleurs, la wilaya est particulièrement exposée à des risques naturels majeurs tels que les inondations et les séismes. Ces aléas représentent des enjeux importants en matière de prévention, d'urbanisme et de planification territoriale, ce qui renforce la pertinence du choix de cette région pour un travail de recherche axé sur la gestion des risques et la résilience territoriale ((CGS)., (2004)).

2 PRESENTATION DE LA COMMUNE DE CHLEF

2.1 Cadre géographique

2.1.1 Contexte général

La commune de Chlef, chef-lieu de la wilaya du même nom, est située dans la partie nordouest de l'Algérie. Elle se trouve à environ 200 kilomètres à l'ouest de la capitale Alger, au cœur de la vaste plaine du Cheliff, la plus grande plaine agricole du pays, s'étendant sur plus de **300 km de longueur**. La commune est délimitée par les monts de l'Ouarsenis au sud et par les hauteurs de la Dahra au nord, ce qui lui confère une position géographique stratégique dans l'organisation du territoire national ((MATE, (2022).)

Sur le plan topographique, le territoire est caractérisé par des terrains majoritairement plats, avec une altitude moyenne de **114 mètres** au-dessus du niveau de la mer (ONS, 2023). La plaine fertile est traversée par l'oued Cheliff, le plus long fleuve d'Algérie, s'étendant sur environ **700 km** de long. Ce fleuve est crucial pour l'irrigation des terres agricoles de la région, bien qu'il soit aussi à l'origine de risques d'inondation, particulièrement en période de fortes précipitations (ANRH, (2023).)

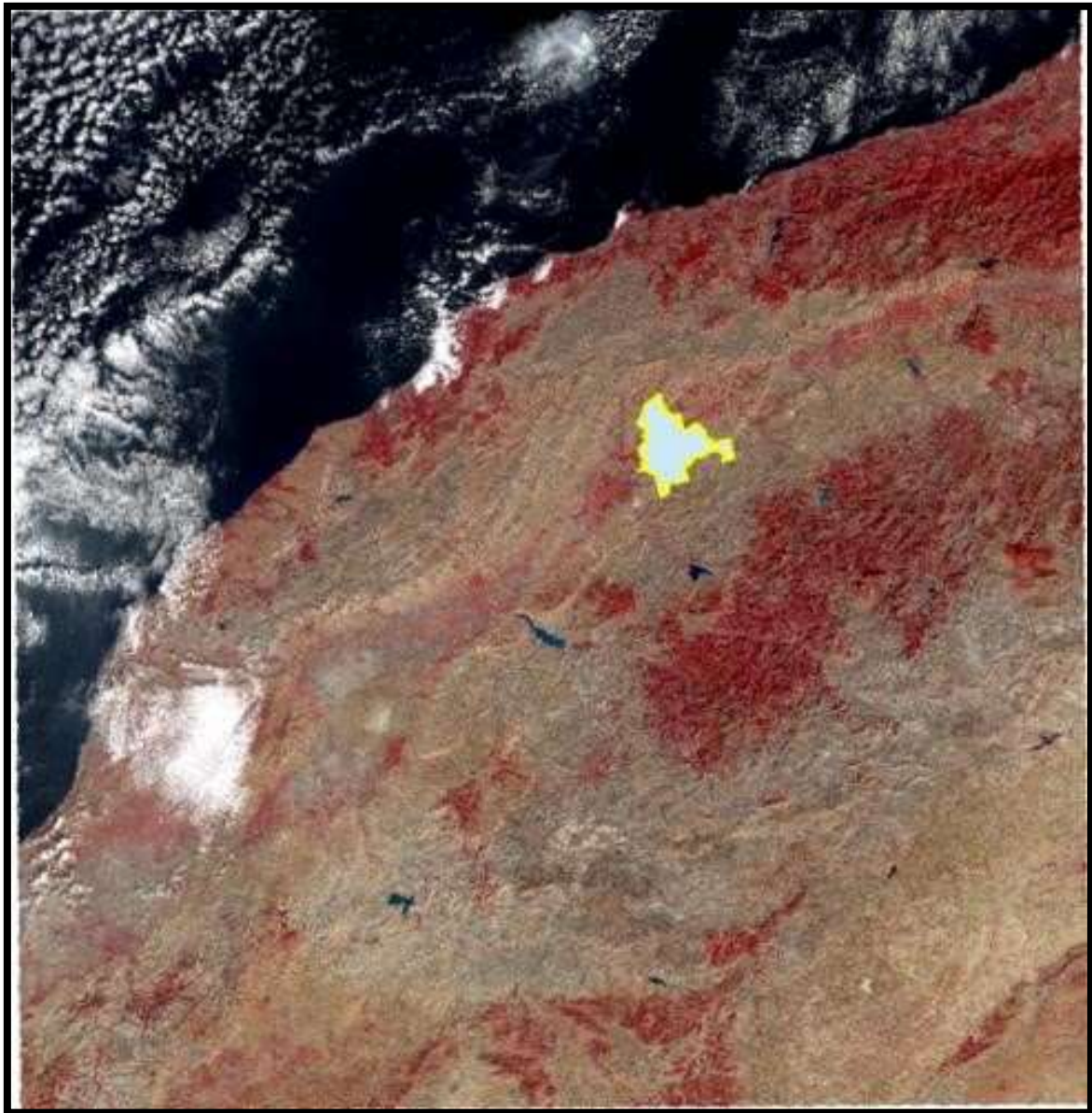


Figure 10: Zone d'Etude

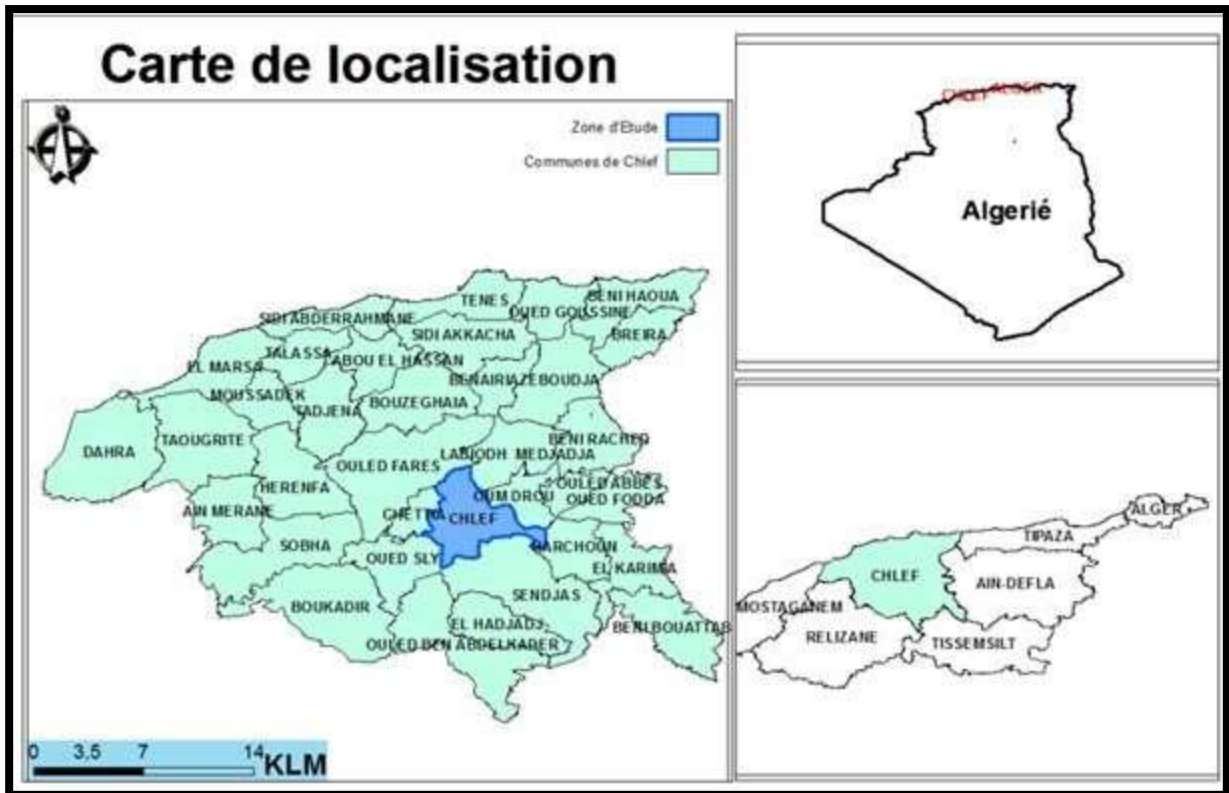


Figure 11: carte de localisation (*Ministère de l'Aménagement du Territoire, 2020.*)

2.1.2 Contexte régional de la commune de Chlef

La commune de Chlef est située dans la wilaya de Chlef, dans le nord-ouest de l'Algérie, au cœur de la plaine du Cheliff. Cette région est l'une des plus fertiles du pays, ce qui en fait un centre agricole important pour la production de céréales, d'agrumes, d'oliviers, et de légumes (MADR, 2023) La wilaya de Chlef s'étend sur une superficie d'environ 4 975 km² et est limitée au nord par la mer Méditerranée, au sud par la wilaya de Tissemsilt, à l'est par Tipaza et Aïn Defla, et à l'ouest par Mostaganem et Relizane (ONS, 2023)

2.2 La topographie de la commune de chlef

La commune de Chlef présente une topographie contrastée entre la plaine centrale du Cheliff, à relief très peu marqué, et les collines qui bordent la commune au sud. L'altitude varie de 80 m à 500 m, avec une pente globale faible à modérée. Cette morphologie influence fortement l'occupation du sol, avec des zones agricoles concentrées dans la plaine et des zones naturelles ou semi-rurales sur les hauteurs.

La commune de Chlef présente une topographie variée, dominée par :

a. La plaine du Cheliff (zone centrale)

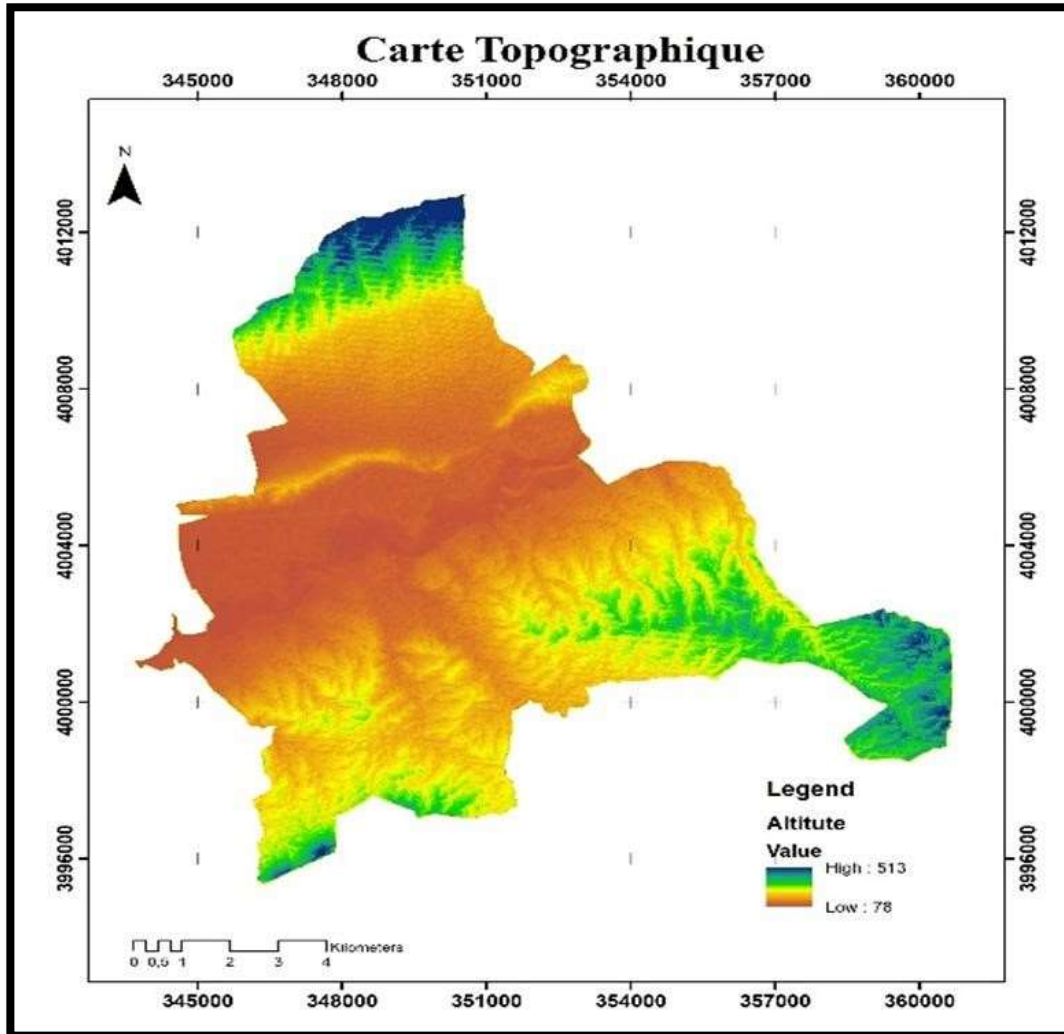
- **Altitude** : entre **80 m et 120 m**
- **Relief** : très plat à légèrement ondulé
- **Nature** : plaine alluviale fertile, formée par les dépôts de l'oued Cheliff
- **Utilisation** : agriculture intensive, urbanisation et infrastructures
- **Pente** : généralement inférieure à **3 %**

b. Les collines périphériques (au sud et sud-est de la commune)

- **Altitude** : de **200 m à plus de 500 m**
- **Relief** : modérément accidenté
- **Nature** : formations marneuses et calcaires
- **Utilisation** : pâturages, oliviers, zones forestières
- **Pente** : entre **10 % et 20 %**, localement plus dans certains ravins

c. Cours d'eau et vallons

- Oued Cheliff traverse la commune d'est en ouest.
- D'autres petits oueds saisonniers contribuent au modelé du terrain.



2.3 La pente de la commune de Chlef

La pente de la commune de Chlef varie selon la topographie, qui est principalement constituée de la plaine du Cheliff entourée de reliefs collinaires au sud et au nord.

Zone	Altitude approximative	Type de pente	Valeur estimée
Vallée du Cheliff (centre)	80 m – 100 m	Très faible à faible pente	< 5 %
Quartiers périphériques	100 m – 200 m	Faible à moyenne	5 % à 10 %
Reliefs sud (vers Oued Fodda, El Karimia, etc.)	Jusqu'à 400 – 500 m	Moyenne à forte	10 % à 20 %, localement plus

Tableau 5: Presentation des pentes

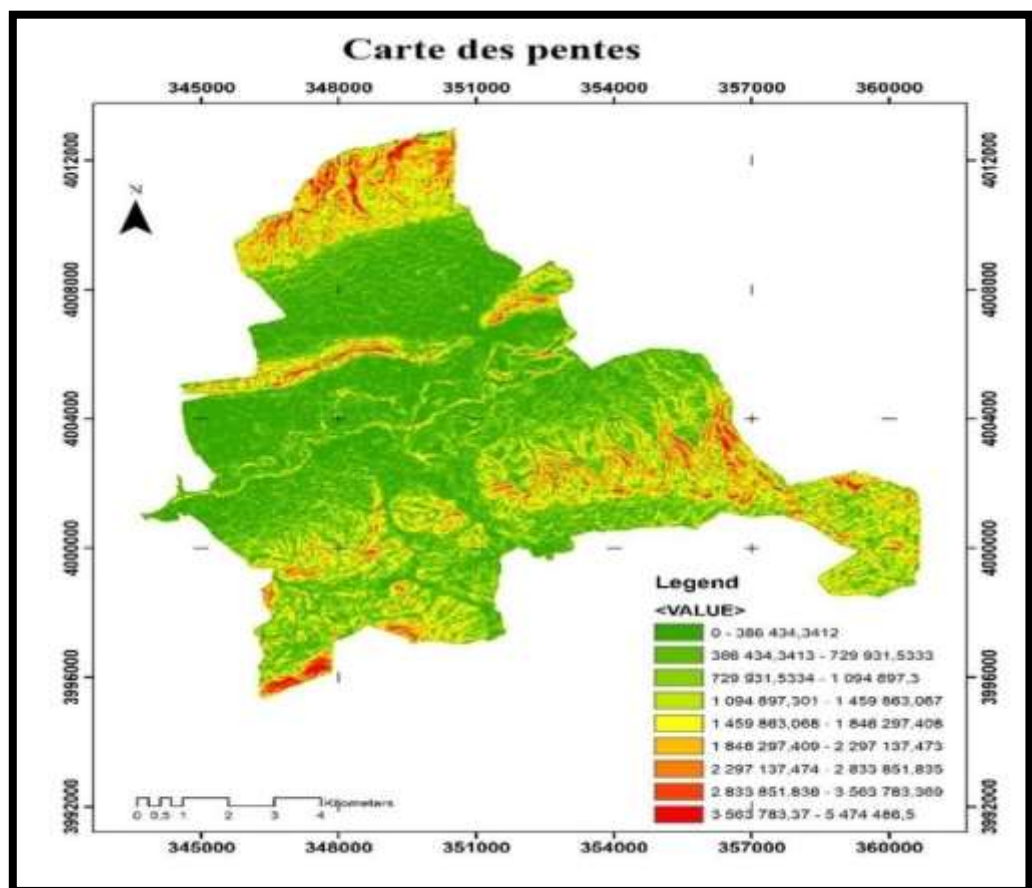


Figure 12: Carte des pentes

2.4 Climatologie

La commune de Chlef bénéficie d'un climat méditerranéen typique, mais avec des éléments de semi-aridité en raison de sa proximité avec des zones plus sèches au sud. Ce climat présente deux saisons principales distinctes : un **hiver doux et humide**, et un **été chaud et sec**.

Station climatologique	Latitude	Longitude
Chlef	36,22° N	1,33° E

Tableau 6: Ces coordonnées correspondent à la station météorologique de la ville de Chlef.

2.5 Température

La **variation de température** de la commune de Chlef suit les caractéristiques typiques d'un climat méditerranéen avec des saisons distinctes. La température varie fortement entre l'été et l'hiver, ce qui est souvent observé dans les régions du nord de l'Algérie.

« Cette analyse s'appuie sur les données fournies par l'Office National de la Météorologie (2020) ainsi que sur l'Atlas climatique de l'INCT (2015), qui confirment que la commune de Chlef présente les caractéristiques typiques d'un climat méditerranéen. »

Variations saisonnières

○ *Été (Juin - Août)*

- **Température diurne** : Les températures peuvent atteindre **35°C à 40°C** pendant la journée, surtout en juillet et août, les mois les plus chauds.
- **Température nocturne** : Les nuits restent relativement fraîches, avec des températures entre **20°C et 25°C**, grâce à la brise marine venant de la Méditerranée.
- **Amplitude thermique (diurne et nocturne)** : Il peut y avoir une différence de **10°C à 15°C** entre le jour et la nuit en été.

○ *Hiver (Décembre - Février)*

- **Température diurne** : En hiver, les températures sont plus fraîches avec des valeurs variantes entre **12°C et 16°C** en moyenne.
- **Température nocturne** : Les températures peuvent descendre jusqu'à **5°C**, mais il est rare que la température passe sous 0°C.
- **Précipitations** : L'hiver est aussi la saison la plus pluvieuse, avec des pluies régulières qui affectent la température, la rendant plus humide.

○ *Printemps (Mars - Mai) et Automne (Septembre - Novembre)*

- **Températures** : Ces deux saisons offrent des températures plus modérées, généralement entre **18°C et 25°C**. Les transitions entre l'été et l'hiver sont marquées par une augmentation et une diminution progressive des températures.

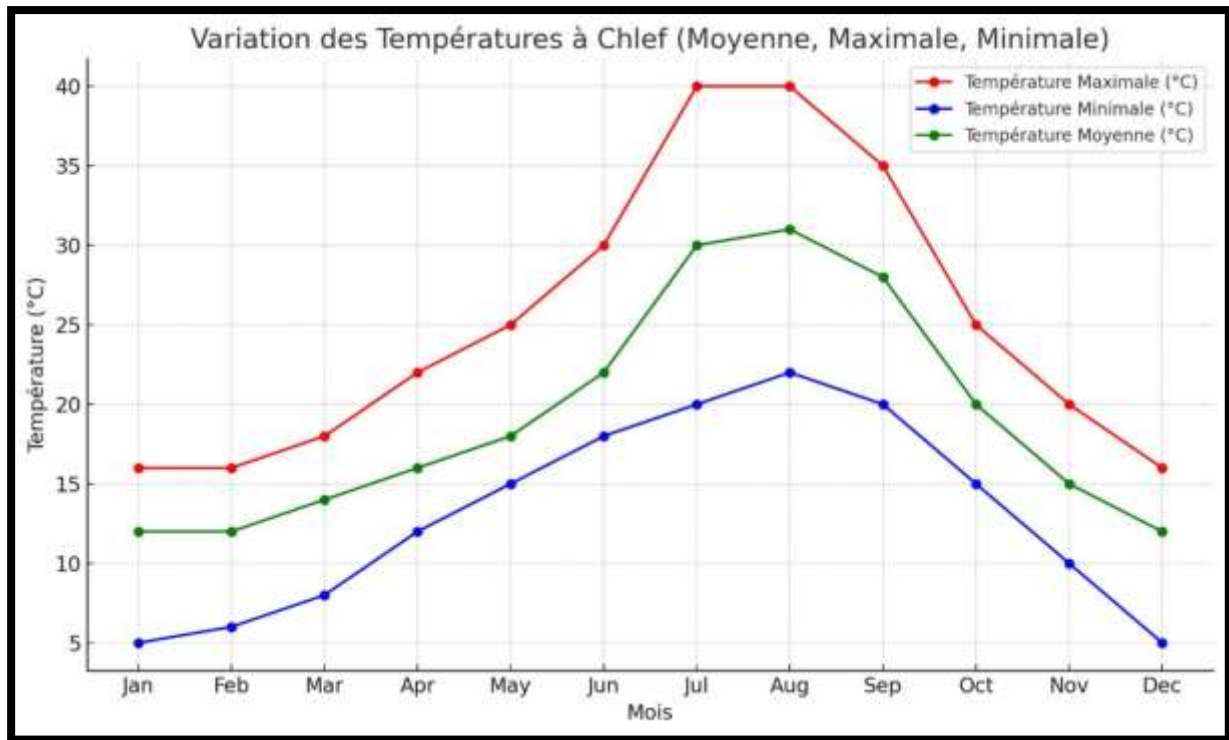
2.5.1 Les températures mensuelles moyennes

Voici un aperçu de la température moyenne mensuelle à Chlef, basée sur les tendances saisonnières typiques :

Mois	Température Maximale (°C)	Température Minimale (°C)	Température Moyenne (°C)
Janvier	16°C	5°C	12°C
Février	16°C	6°C	12°C
Mars	18°C	8°C	14°C
Avril	22°C	12°C	16°C
Mai	25°C	15°C	18°C
Juin	30°C	18°C	22°C
Juillet	40°C	20°C	30°C
Août	40°C	22°C	31°C
Septembre	35°C	20°C	28°C
Octobre	25°C	15°C	20°C
Novembre	20°C	10°C	15°C

Décembre	16°C	5°C	12°C
----------	------	-----	------

Tableau 7: température de la commune de Chlef



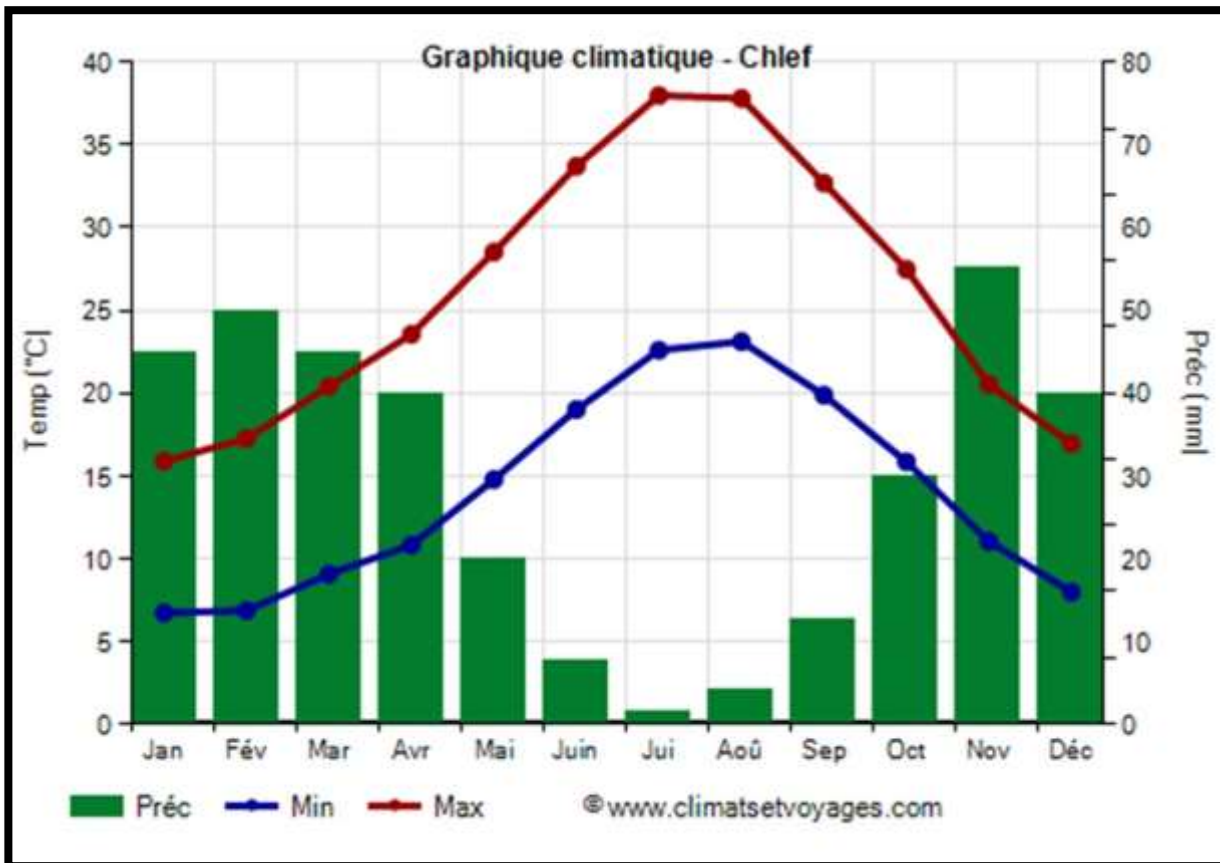
Graphe 1: la température moyenne

Le graphe 1 indique que la saison froide débute en Novembre et se termine en Avril, alors que la saison la plus chaude commence en Mai et finit en septembre.

2.6 Précipitations

La commune connaît des précipitations modérées à faibles, avec des valeurs annuelles comprises entre 450 et 600 mm. Les précipitations sont principalement concentrées durant la période hivernale (de novembre à mars), avec un maximum souvent atteint en janvier et février. Les mois d'été (de juin à septembre) sont particulièrement secs, avec pratiquement aucune pluie pendant cette période.

Les précipitations saisonnières favorisent une végétation méditerranéenne, mais la sécheresse estivale peut affecter la disponibilité des ressources en eau, notamment pour l'agriculture.



Graphe 2: Le mois le plus pluvieux

Cette figure montre un graphique climatique pour Chlef, en Algérie. Le graphique présente les données suivantes :

a. Température (°C)

- Ligne rouge (Max) : Indique les températures maximales moyennes tout au long de l'année.
- Ligne bleue (min) : affiche les températures minimales moyennes. • Les températures maximales atteignent 35-37 °C en juillet et août.
- Les températures minimales baissent en janvier et février, avec une moyenne de 6 à 8°C.

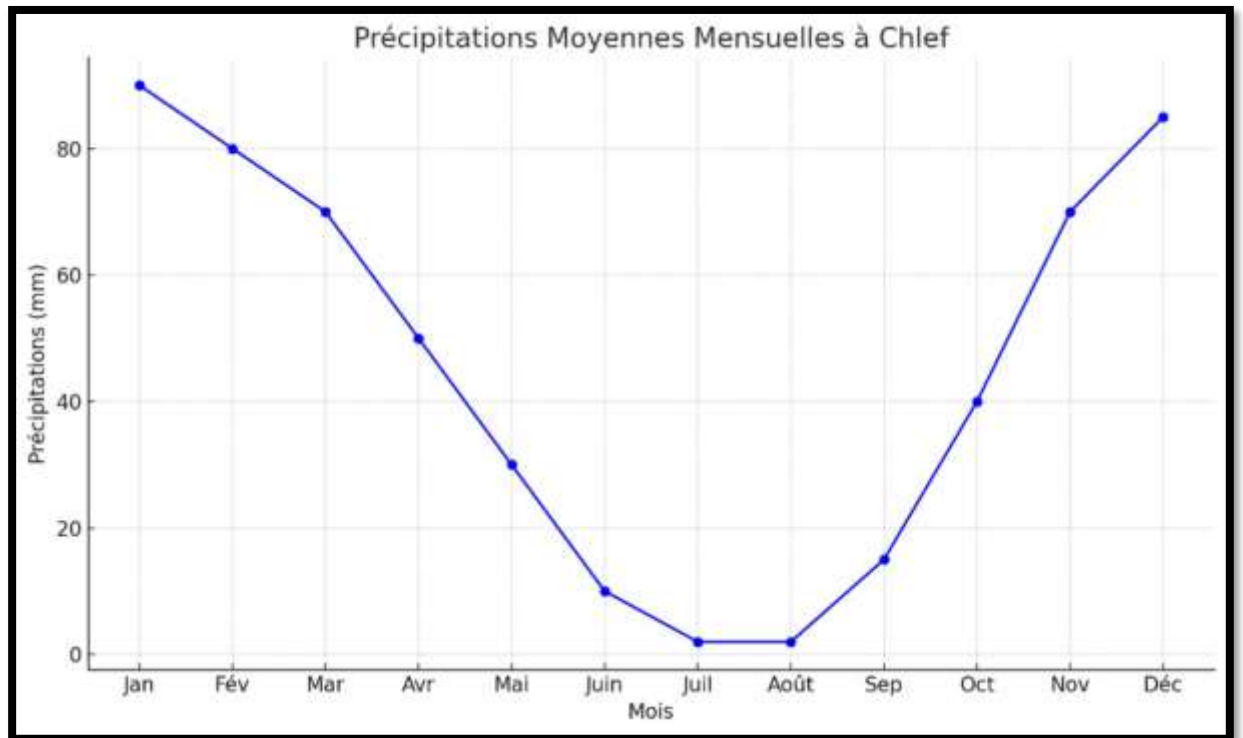
b. Précipitations (mm)

- Barres vertes : Représentent les précipitations mensuelles.
- Les précipitations sont les plus fortes en novembre et décembre (environ 70-80 mm).

Les mois les plus secs sont juillet et août, avec des précipitations minimales (près de 0-10 mm).

Ce graphique climatique indique un climat méditerranéen avec des étés chauds et secs et des hivers doux et humides typiques de la région.

c. Données approximatives (moyennes annuelles) pour Chlef



Graphe 3: Graphe de précipitation moyennes mensuelles à Chlef

Mois	Précipitations moyennes (mm)
Janvier	90 mm
Février	80 mm
Mars	70 mm

Avril	50 mm
Mai	30 mm
Juin	10 mm
Juillet	2 mm
Août	2 mm
Septembre	15 mm
Octobre	40 mm
Novembre	70 mm
Décembre	85 mm

2.7 Humidité

2.7.1 L'humidité relative dans la commune de Chlef

La commune de Chlef connaît une humidité relative qui varie de manière significative au fil des saisons, en raison de son climat méditerranéen à tendance semi-continentale. Les caractéristiques de l'humidité à Chlef sont fortement influencées par la proximité relative de la mer Méditerranée et par les variations saisonnières des températures et des précipitations. Selon les données climatiques disponibles entre 1990 et 2022 (ONM, Climate-Data.org), l'humidité relative moyenne annuelle à Chlef est d'environ 60 %, avec des écarts marqués entre la saison estivale et hivernale.

2.7.2 Répartition saisonnière de l'humidité

○ *Hiver(décembre-février) :*

L'humidité relative est la plus élevée de l'année, atteignant en moyenne **75 à 80 %**. Cela s'explique par des températures plus basses et des précipitations plus fréquentes, notamment sous l'effet des perturbations d'origine méditerranéenne.

○ **Printemps(mars-mai) :**

L'humidité commence à diminuer progressivement avec la montée des températures. Elle oscille autour de **60 à 65 %**, bien que les pluies du printemps puissent temporairement augmenter les niveaux d'humidité.

○ **Été(juin-août) :**

La période estivale est caractérisée par des conditions sèches et chaudes, ce qui fait baisser l'humidité relative à des niveaux autour de **40 à 45 %**, voire moins durant les vagues de chaleur. Cette baisse est accentuée par la présence de vents chauds et secs d'origine saharienne.

○ **Automne(Septembre-Novembre) :**

Avec le retour des précipitations et la baisse des températures, l'humidité augmente de nouveau pour atteindre des niveaux autour de **60 à 70 %**.

2.7.3 Variation journalière

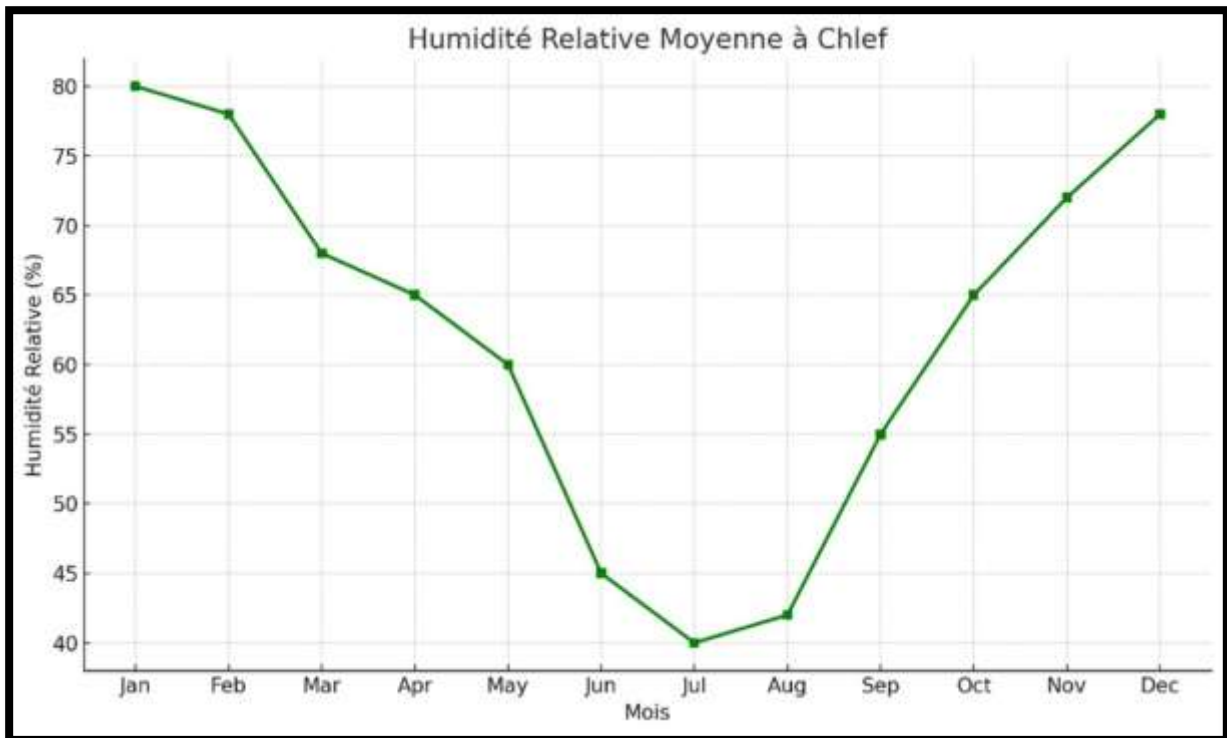
On observe également des variations d'humidité au cours de la journée :

- L'humidité est généralement plus élevée en début de matinée.
- Elle diminue durant l'après-midi lorsque la température de l'air augmente.

Voici le graphique de l'humidité relative moyenne à Chlef, mois par mois. Il illustre bien la tendance annuelle :

- Humidité élevée en hiver, • Baisse nette en été,

- Remontée progressive à l'automne.



Graphe 4: humidité relative Moyenne à chlef 1990-2022

2.8 VENTS

2.8.1 LA VITESSE MOYENNE DES VENTS DANS LA COMMUNE DE CHLEF

La commune de Chlef, située dans le nord-ouest de l'Algérie, bénéficie d'un climat méditerranéen à influence continentale, caractérisé par des hivers doux et humides, et des étés chauds et secs. Le régime des vents dans cette région est relativement modéré tout au long de l'année, avec des variations saisonnières notables.

D'après les données climatologiques disponibles auprès de l'Office National de la Météorologie (ONM) et de plateformes climatiques internationales telles que Climate-Data.org, la vitesse moyenne annuelle des vents à Chlef se situe entre **2,5 et 3,5 m/s**, soit environ **9 à 12,6 km/h**.

2.8.2 Répartition saisonnière

- *Hiver(décembre-février) :*

Les vents sont légèrement plus soutenus, avec une vitesse moyenne autour de **3,5 à 4 m/s**. Ces vents proviennent majoritairement du nord-ouest, apportant une certaine humidité depuis la Méditerranée.

○ *Printemps(mars-mai) :*

Durant cette saison, on observe une augmentation de la vitesse des vents, atteignant des moyennes de **4 à 5 m/s** en raison de la transition climatique et des phénomènes de dépression au niveau régional. Des vents d'origine saharienne peuvent également influencer la région, notamment avec les épisodes de sirocco.

○ *Été(juin-août) :*

En été, la vitesse moyenne des vents baisse légèrement, se situant autour de **2 à 3 m/s**. Cependant, des rafales ponctuelles plus fortes peuvent survenir lors des périodes de chaleur intense, provoquant des soulèvements de poussière.

○ *Automne(septembre-novembre) :*

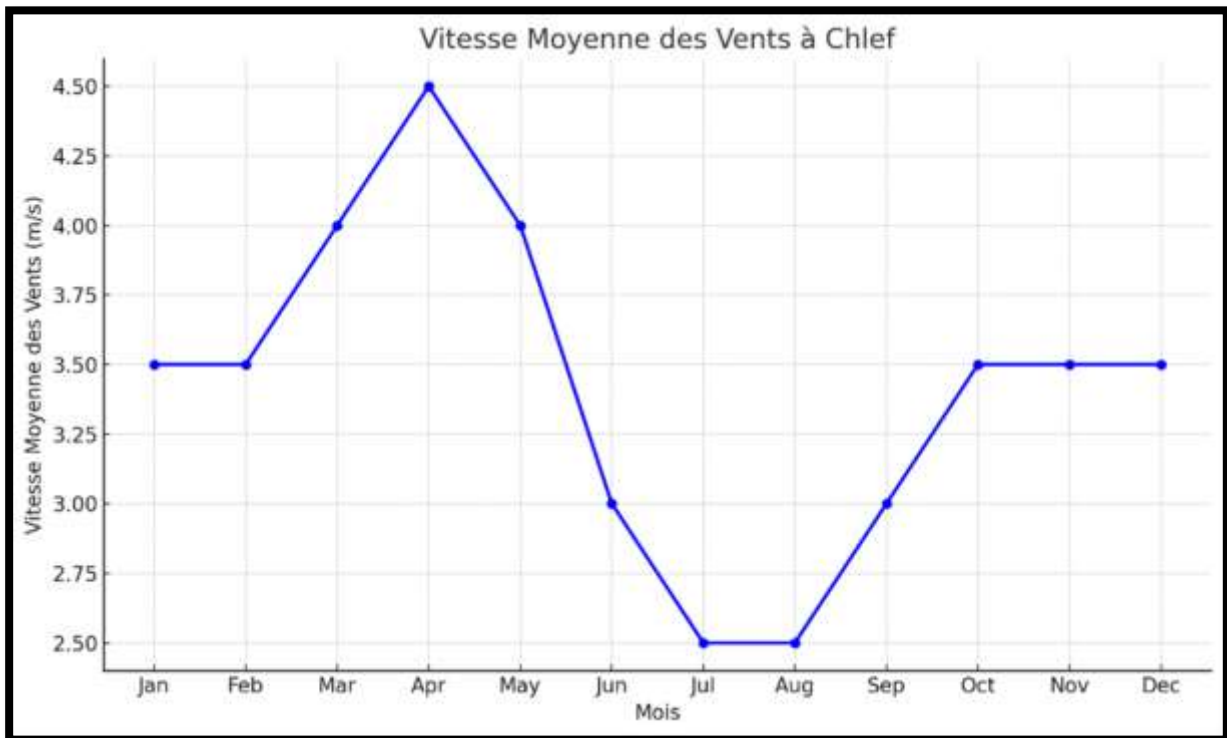
Les vents reprennent légèrement en intensité, atteignant des vitesses moyennes de **3 à 3,5 m/s**, accompagnant généralement le retour des perturbations méditerranéennes.

2.8.3 Direction dominante des vents

La direction prédominante des vents à Chlef est généralement nord-ouest à ouest, surtout en période hivernale. Toutefois, des vents du sud peuvent souffler de manière ponctuelle, notamment au printemps et au début de l'été, lors des intrusions d'air saharien.

2.8.3.1 2.8.4 Variabilité interannuelle

Il est important de noter que la vitesse des vents à Chlef présente une variabilité d'une année à l'autre, influencée par des phénomènes climatiques régionaux et globaux.



Graphe 5: Un graphique représentant la vitesse moyenne des vents à Chlef 1990-2022

2.9 Agricole

2.9.1 L'AGRONOMIE

L'agronomie dans la commune de Chlef joue un rôle crucial pour la région, en raison de son emplacement stratégique dans la plaine fertile du Cheliff, l'une des plus vastes et productives d'Algérie. La période d'étude choisie, allant de 1990 à 2022, permet de mieux comprendre l'évolution de cette activité agricole et son impact sur l'économie locale, en tenant compte des dynamiques de production et des défis rencontrés au fil des décennies. Voici un aperçu détaillé de la situation agricole de cette commune :

a. Caractéristiques des terres agricoles

- La commune bénéficie de terres arables très fertiles, grâce aux dépôts alluviaux de l'Oued Cheliff, ce qui en fait une région propice à une large gamme de cultures.
- La structure du sol est généralement argilo-limoneuse, offrant une bonne capacité de rétention d'eau tout en assurant un bon drainage, idéal pour diverses productions agricoles.
- Le climat méditerranéen avec des étés chauds et secs et des hivers doux favorise la production céréalière, l'arboriculture, et le maraîchage.



b. Principales cultures et productions

- **Céréales** : La culture de blé dur, blé tendre, et orge est prédominante. La plaine du Chelif est considérée comme le "grenier" de la région pour ces productions.
- **Maraîchage** : Grâce aux terres irriguées, la commune produit des légumes comme :
 - **Pommes de terre • Tomates • Carottes • Courgettes • Poivrons**
 - **Arboriculture fruitière** :
 - **Oliviers** : L'huile d'olive produite localement est d'une grande qualité.
 - **Agrumes** : Oranges, mandarines, et citrons, principalement pour le marché local.
 - **Fruits à noyau** : Pêches, abricots, et prunes, qui sont cultivés en pleine saison.
 - **Viticulture** : Bien que moins étendue que dans d'autres régions, la culture de la vigne est présente pour la production de raisins de table.

D'après les données de la Direction des Services Agricoles de Chlef (2019) et de l'Institut National de la Recherche Agronomique (2016), les principales productions agricoles de la

commune incluent des céréales telles que le blé dur et tendre, ainsi que l'orge, ce qui fait de la plaine du Cheliff le "grenier" de la région. Le maraîchage bénéficie des terres irriguées et inclut des légumes comme les pommes de terre, tomates, carottes, courgettes, et poivrons. L'arboriculture fruitière se distingue par la production d'olives de qualité, ainsi que d'agrumes (oranges, mandarines, citrons) et de fruits à noyau (pêches, abricots, prunes). La viticulture, bien que moins étendue, reste présente pour la production de raisins de table. Ces cultures sont réparties selon les zones les plus propices à chaque type de production, comme l'indiquent les études de la DSA (2019).

2.10 Systèmes d'irrigation

- L'irrigation est essentielle pour les cultures, surtout en été. La commune utilise des systèmes modernes comme l'irrigation goutte-à-goutte pour maximiser l'efficacité de l'utilisation de l'eau.
- L'Oued Cheliff et des barrages comme celui de Sidi Yacoub fournissent de l'eau pour l'irrigation. Cependant, la gestion durable des ressources en eau reste un défi en raison de la sécheresse récurrente.

L'irrigation est essentielle pour les cultures, surtout en été, et la commune de Chlef utilise des systèmes modernes comme l'irrigation goutte-à-goutte pour maximiser l'efficacité de l'utilisation de l'eau. Ces systèmes ont été progressivement introduits depuis les années 1990 (DSA, 2020). Les principales sources d'eau pour l'irrigation incluent l'Oued Cheliff ainsi que des barrages comme celui de Sidi Yacoub (MRE, 2018). Cependant, la gestion durable des ressources en eau demeure un défi majeur en raison de la sécheresse récurrente, comme l'indiquent les études sur la gestion des ressources hydriques dans la région (INRE, 2015).

2.11 Élevage

- En complément des cultures, l'élevage est également pratiqué :
- Bovins pour la production de lait et de viande.
- Ovins pour la viande.
- Volaille pour la production d'œufs et de poulets.
- L'élevage contribue de manière significative à l'économie locale, notamment avec des exploitations familiales.

Part de l'élevage dans l'activité agricole de la wilaya de Chlef est significative, bien que les données précises sur la superficie ou le nombre d'exploitations dédiées à l'élevage ne soient

pas toujours disponibles. Cependant, plusieurs sources indiquent que l'élevage est une composante essentielle de l'agriculture dans cette région.

2.11.1 Importance de l'élevage à Chlef

La wilaya de Chlef est reconnue pour sa vocation agricole, avec une superficie agricole totale (SAT) de 262 511 ha, représentant 64,39 % de la superficie totale de la wilaya. Cette superficie comprend des terres irriguées, des parcours et des pacages, essentiels pour les activités d'élevage.

Le secteur de l'élevage à Chlef englobe diverses activités, notamment l'élevage bovin, ovin et caprin, ainsi que l'aquaculture. La région est également un acteur majeur dans la production aquacole, représentant 65 % de la production nationale en 2021.

2.11.2 Estimations de la part de l'élevage

Bien que des données précises sur la part de l'élevage dans l'activité agricole de Chlef soient limitées, il est raisonnable de considérer que l'élevage représente une proportion significative de l'agriculture dans cette wilaya, en raison de l'importance des superficies consacrées aux pacages et parcours, ainsi que de la diversité des activités d'élevage pratiquées

2.12 RELIEF

Le relief de la commune de Chlef La commune de Chlef se situe au cœur de la plaine du Cheliff, dans la wilaya du même nom, au nord-ouest de l'Algérie. Cette région présente un relief relativement varié malgré la prédominance de la plaine, ce qui donne au paysage une richesse géomorphologique notable.

La plaine du Cheliff La commune est largement dominée par cette vaste plaine alluviale, qui s'étend sur plusieurs dizaines de kilomètres de long et de large. Cette plaine est le résultat de dépôts Fulvio-alluviaux du fleuve Cheliff, qui ont enrichi les sols en limons fertiles. Altitude moyenne : entre 100 m et 200 m au-dessus du niveau de la mer. Caractéristiques : surface relativement plane à légèrement ondulée, idéale pour l'agriculture intensive (céréales, maraîchage, arboriculture). Origine géologique : alluvions récentes du Quaternaire. La plaine est entrecoupée de terrasses fluviales qui témoignent des anciennes phases d'érosion et de dépôt du fleuve Cheliff.

Le fleuve Cheliff et ses terrasses Le Cheliff est le principal cours d'eau structurant du relief local. Il traverse la commune d'est en ouest, modelant les paysages alentours. Terrasses fluviales : succession de niveaux qui montrent les anciennes hauteurs du lit du fleuve. Ces terrasses offrent des terrains légèrement surélevés, utilisés en partie pour les cultures et les aménagements urbains. Les inondations saisonnières, bien que régulées aujourd'hui, ont également contribué à modeler la topographie locale.

Les contreforts montagneux Bien que la commune de Chlef elle-même soit majoritairement en plaine, elle est proche de deux ensembles montagneux importants qui influencent son relief : Le Dahra (au nord) Ce massif calcaire forme une barrière naturelle avec ses altitudes variantes entre 400 m et plus de 1000 m par endroits. Composition géologique : calcaires, marnes et grès. Importance : limite naturelle, rôle dans la régulation climatique locale et source de matériaux pour la construction. L'Ouarsenis (au sud de la wilaya) Bien que légèrement éloigné de la commune de Chlef proprement dite, ce massif a un impact indirect sur le relief et les flux hydriques. Altitude : jusqu'à 1 985 m au mont Sidi Amar. Il contribue à l'alimentation des nappes phréatiques et à la régulation du fleuve Cheliff.

Formations secondaires et microreliefs Buttes témoins : petites élévations isolées dans la plaine, vestiges d'anciens reliefs érodés. Petites cuvettes dépressionnaires : zones parfois marécageuses, utilisées pour certaines cultures ou pour des retenues d'eau. Talwegs et ravines : plus visibles dans les zones périphériques de la commune, marquant l'érosion pluviale.

Influence du relief sur l'occupation du sol Le relief joue un rôle essentiel dans l'organisation de l'espace : Zones plates : agriculture intensive, urbanisation, infrastructures. Pentec douces des terrasses : cultures arboricoles (oliviers, figuiers). Secteurs accidentés proches du Dahra : pâturages et forêts secondaires, zones de reboisement.



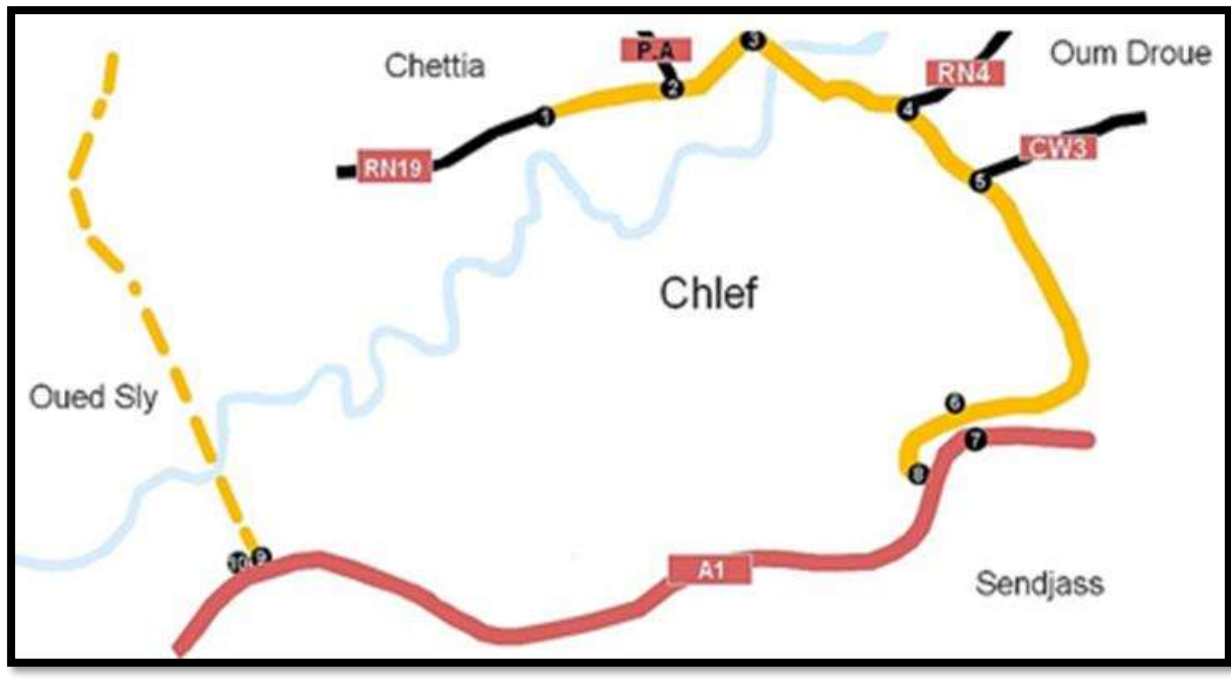
Figure 13: relief de Chlef (Bessaoud, (2014).)

3 L'autoroute et route principales à Chlef

La commune de Chlef est traversée par l'une des infrastructures routières majeures d'Algérie : l'Autoroute Est-Ouest.

3.1 L'Autoroute Est-Ouest (A1)

- Elle traverse la wilaya de Chlef d'est en ouest, reliant Chlef aux grandes villes du pays.
- **Vers l'est** : Relie Chlef à Alger, Blida, Bouira, etc.
- **Vers l'ouest** : Va vers Oran, Mostaganem, Tlemcen.
- C'est un axe vital pour le transport des marchandises agricoles, ce qui est très avantageux pour la commercialisation des produits de Chlef.



Graphe 6: route principale

4 Séisme

4.1 L'activité sismique dans la commune de Chlef

La commune de Chlef est située dans une zone à sismicité moyenne à forte, du fait de sa position sur la bordure nord de la plaque africaine, au niveau de la zone de convergence avec la plaque eurasiatique. Cette situation géotectonique la rend particulièrement vulnérable aux séismes.

4.2 Le séisme historique de Chlef (anciennement El Asnam) — 10 octobre 1980

- **Magnitude** : 7,3 sur l'échelle de Richter
- **Épicentre** : Près de la ville d'El Asnam (actuelle Chlef)
- **Bilan humain** : Environ 2 633 morts, plus de 8 000 blessés
- **Dommages matériels** : La quasi-totalité de la ville détruite, des milliers d'habitations effondrées, routes et infrastructures sévèrement endommagées.
- **Répliques** : Plusieurs répliques ont suivi le séisme principal, aggravant les dégâts et le traumatisme des habitants.

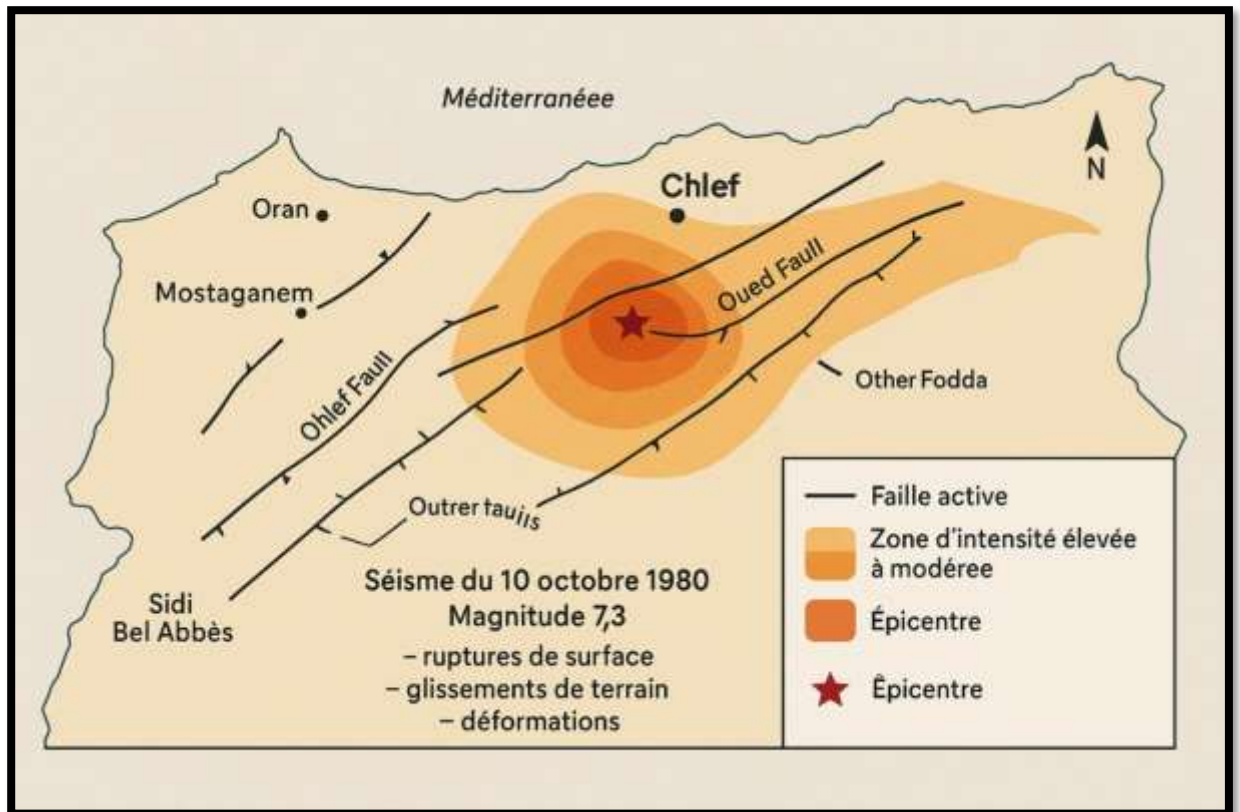


Figure 15: centre du tremblement

4.3 Causes géologiques

- Ce séisme est dû à l'activité des failles inverses actives dans la région.
- Le choc a provoqué un soulèvement du terrain et des déformations importantes du sol sur plusieurs kilomètres.

4.4 Conséquences et gestion post-sismique

- Reconstruction massive de la ville de Chlef avec des normes parasismiques plus strictes.
- Mise en place de plans de prévention des risques sismiques à l'échelle nationale.
- Renforcement de la surveillance sismologique dans la région.

4.5 Impacts sur l'aménagement du territoire

- Intégration du risque sismique dans la planification urbaine et rurale.
- Adaptation des infrastructures pour résister aux séismes.
- Sensibilisation de la population aux comportements à adopter en cas de séisme.

CONCLUSION

La commune de Chlef, par sa position géographique stratégique, la diversité de ses paysages et la richesse de ses ressources naturelles, constitue un terrain d'étude idéal pour évaluer l'évolution de la couverture végétale sur une longue période. L'analyse de cette zone permet non seulement de mieux comprendre les dynamiques environnementales locales, mais aussi de saisir les interactions complexes entre facteurs naturels et activités humaines.

Le choix de la période 1990–2022 se révèle pertinent au regard des avancées technologiques en télédétection et des profondes transformations qu'a connues la région.

CHAPITRE 03 : APPLICATION SUR LA COMMUNE DE CHELEF

Introduction

L'analyse des données satellitaires constitue un outil essentiel pour l'étude des dynamiques environnementales, notamment en ce qui concerne la surveillance de la couverture végétale, la détection des changements d'occupation du sol et l'évaluation de l'état des ressources naturelles. Dans ce contexte, les images Landsat, acquises par les capteurs Thematic Mapper (TM) et Operational Land Imager (OLI), offrent une série temporelle longue et fiable, remontant à plusieurs décennies. Ces données sont largement utilisées dans les études de télédétection grâce à leur résolution spatiale adaptée, leur gratuité et leur accessibilité.

Cependant, avant toute interprétation ou analyse quantitative, il est indispensable de réaliser un prétraitement rigoureux des images. Ce processus inclut notamment la correction radiométrique, étape fondamentale visant à transformer les valeurs numériques brutes (Digital Numbers – DN) en mesures physiques comparables telles que la réflectance ou la luminance. Cette correction permet de prendre en compte les effets atmosphériques, les variations de l'éclairement solaire ainsi que les caractéristiques propres au capteur. Elle garantit ainsi la fiabilité des résultats lors des analyses multi-temporelles, cruciales pour suivre l'évolution des paysages et des écosystèmes au fil des années.

Après cette phase de correction, les images traitées servent au calcul d'indices de végétation, tels que l'Indice de Végétation Normalisé (NDVI), l'Indice de Végétation Amélioré (EVI), l'Indice de Végétation Ajusté au Sol (SAVI) et l'Indice de Différence Normalisée de l'Eau (NDWI). Ces indicateurs sont largement utilisés pour évaluer la densité, la santé et la vigueur de la végétation, ainsi que la disponibilité de l'eau de surface. Ils constituent des outils précieux pour identifier les zones touchées par la dégradation écologique, le stress hydrique ou encore les variations d'occupation du sol liées à l'activité humaine ou aux changements climatiques.

Enfin, une classification supervisée est réalisée afin de cartographier les différents types d'occupation du sol (végétation, habitat, sol nu, eau, etc.). Cette méthode consiste à attribuer

une classe spécifique à chaque pixel de l'image à partir de régions d'intérêt (ROI) définies par un expert. Elle nécessite une intervention humaine mais offre une grande précision dans la reconnaissance des surfaces naturelles et anthropiques. Les logiciels utilisés incluent ArcGIS 10.6, QGIS, ENVI, ainsi que des plateformes comme USGS Earth Explorer pour le téléchargement des données et Google Earth Pro pour la visualisation géographique.

Ainsi, ce chapitre présente les différentes étapes de traitement des images Landsat : la correction radiométrique, le calcul des principaux indices de végétation, et la classification supervisée, en mettant en avant les méthodes et les outils employés pour atteindre ces objectifs. L'ensemble de ces opérations permet d'obtenir des produits cartographiques fiables et exploitables pour l'analyse spatio-temporelle de l'évolution de la végétation dans la région de Chlef.

1 Matériels et méthodes

1.1 Données Satellitaires (Landsat)

La télédétection fournit une méthode précise et efficace pour suivre les changements de couverture végétale dans le temps et l'espace. L'utilisation des images satellitaires, comme celles de Landsat, permet d'acquérir des données multispectrales qui permettent d'analyser l'état de la végétation sur de grandes surfaces. Ces données constituent une source d'information essentielle pour l'étude de la dynamique environnementale, en particulier dans les zones affectées par la dégradation écologique ou le changement climatique. Les indices de végétation, qui sont calculés à partir des différentes bandes de spectre fournies par Landsat, sont des outils largement utilisés pour évaluer l'indice de végétation normalisé (NDVI), l'indice de végétation amélioré (EVI) et d'autres paramètres liés à la densité et à la santé de la végétation. Ces indicateurs permettent de détecter les variations temporelles et spatiales de la biomasse terrestre, facilitant ainsi l'identification de phénomènes tels que le déboisement, la désertification ou encore les effets des pratiques agricoles.

Les analyses de tendances des indices de végétation, qui sont basées sur les séries temporelles de Landsat, permettent la visualisation des changements graduels ou soudains dans l'état de la végétation. Ainsi, la télédétection devient un outil crucial pour la planification environnementale et la gestion à long terme des ressources naturelles.

1.1.1 Caractéristiques

- **Résolution spatiale :**
 - **Landsat 8 (OLI - Operational Land Imager)** : 30 m pour les bandes multispectrales, 15 m pour la bande panchromatique.
 - **Landsat 5 (TM - Thematic Mapper)** : 30 m pour les bandes multispectrales.
- **Résolution temporelle** : 16 jours (acquisition répétée).
- **Plage spectrale** : 7 à 11 bandes selon le capteur.

1.1.2 Utilisation pour le suivi de la végétation

- **Longue série temporelle** : Permet une analyse des tendances sur plusieurs décennies (Landsat depuis 1972).

- **Détection des changements** : Comparaison multi-temporelle pour évaluer le dépérissement forestier progressif.
- **Identification des zones affectées par le stress hydrique et les incendies** grâce aux indices comme :
 - **NDVI, NDWI, SAVI, EVI** pour surveiller l'évolution du stress végétal.
- **Calculer la température terrestre** grâce à Land Surface Temperature **LST**.

Landsat permet une étude historique du phénomène sur plusieurs décennies. Une **approche multi-capteurs de Landsat** permettrait d'obtenir des résultats importants sur le changement de la végétation, la profondeur historique de **Landsat** et sa richesse spectrale en termes des bandes spectrales utilisées par capteur.

1.2 Logiciels utilisés

1.2.1 United States Geological Survey (USGS)

Les images satellitaires Landsat ont été obtenues gratuitement via la plateforme USGS (United States Geological Survey), qui permet un téléchargement direct des données en fonction de la zone géographique et de la période ciblée (voir les figures ci-dessous)

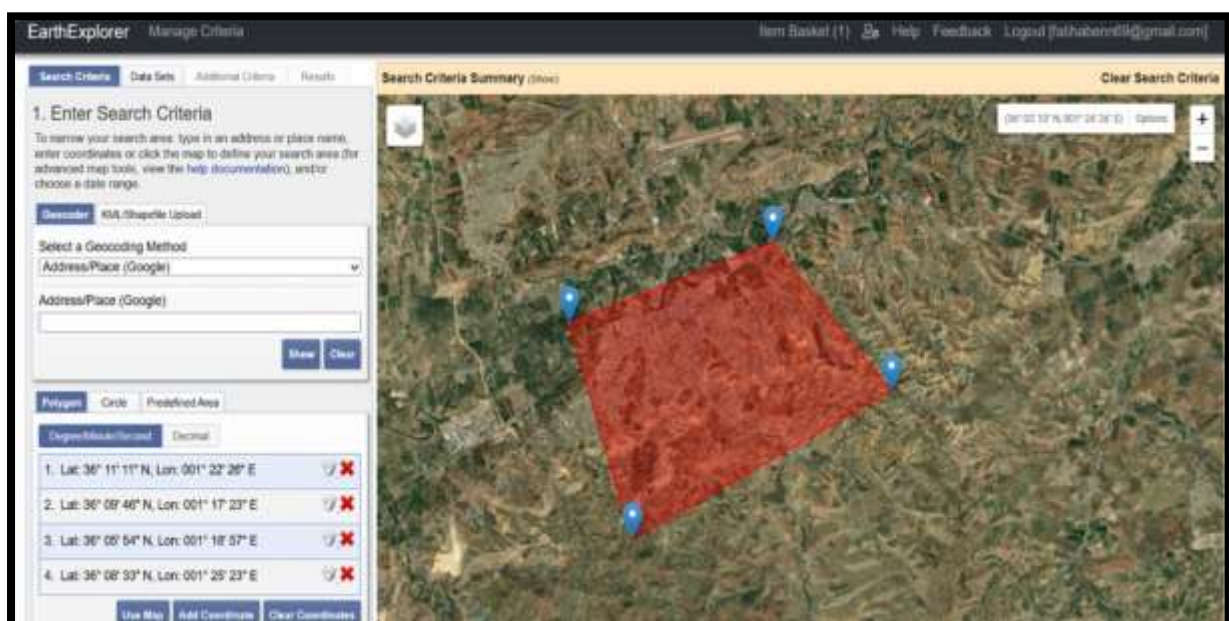
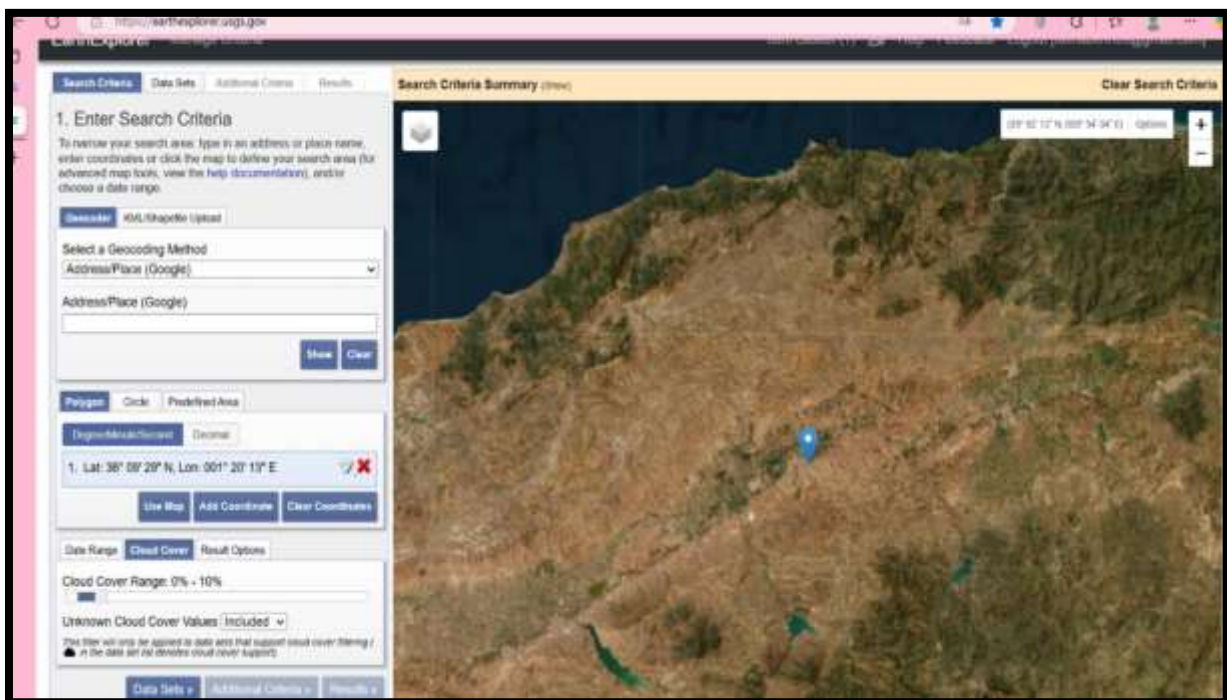


Figure 16: Etape de sélection de la zone d'étude



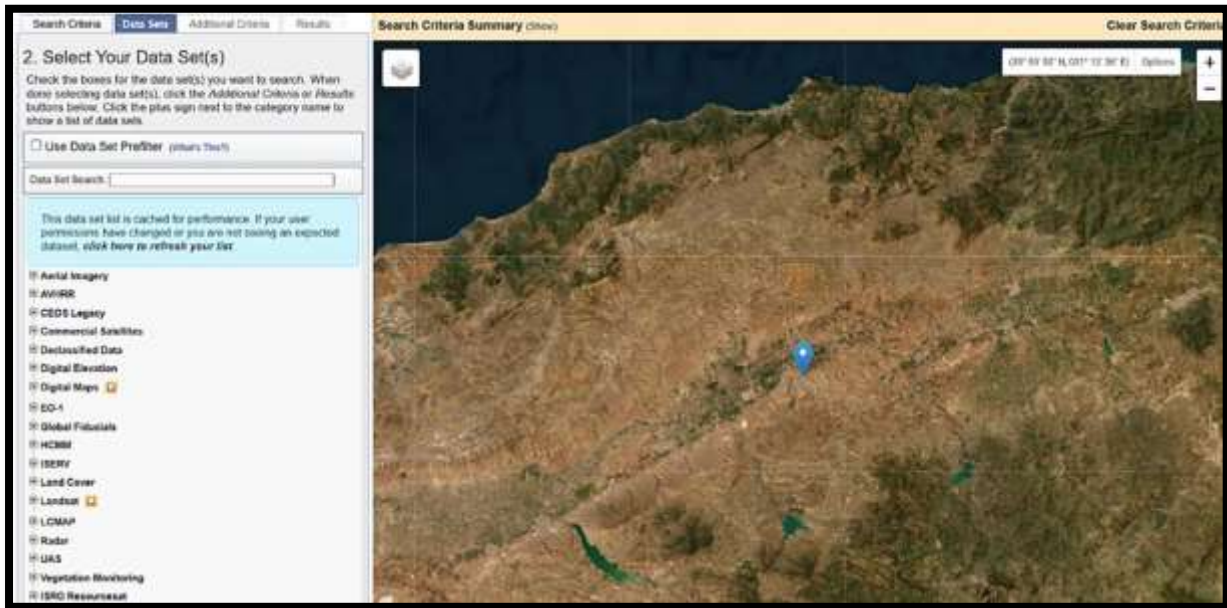


Figure 17: Choix des critères : La date et la couverture nuageuse

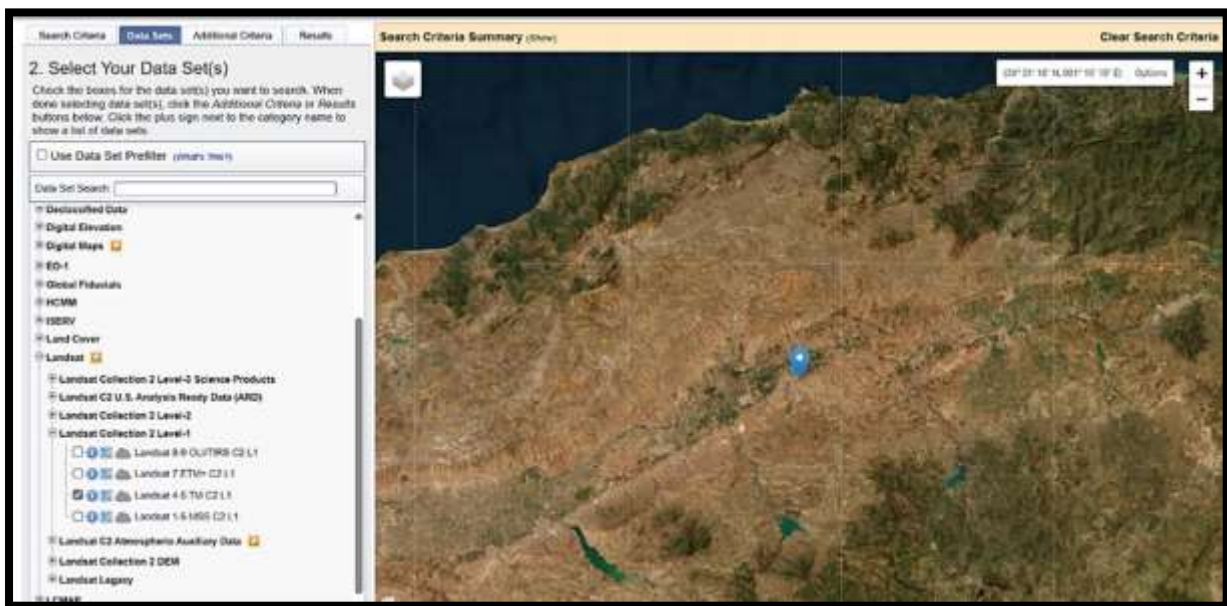




Figure 18: Choix des données Landsat (voir Landsat TM cocher dans la figure)

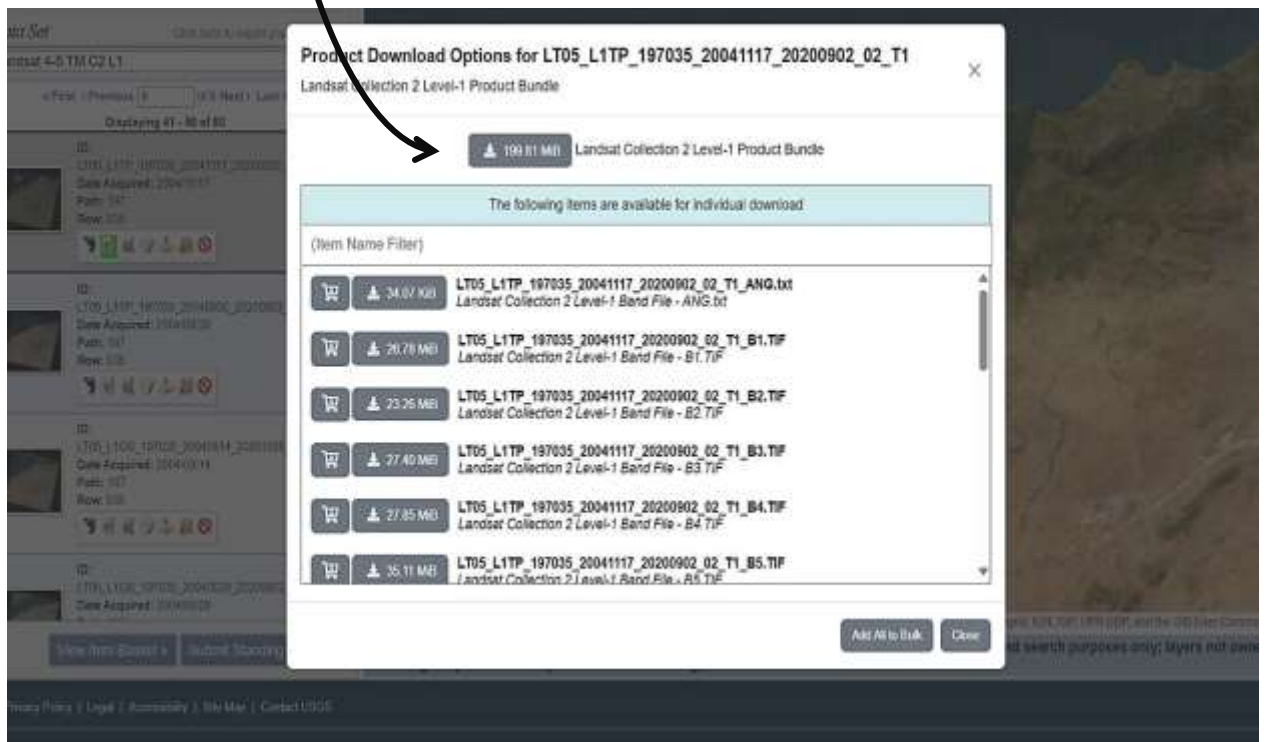
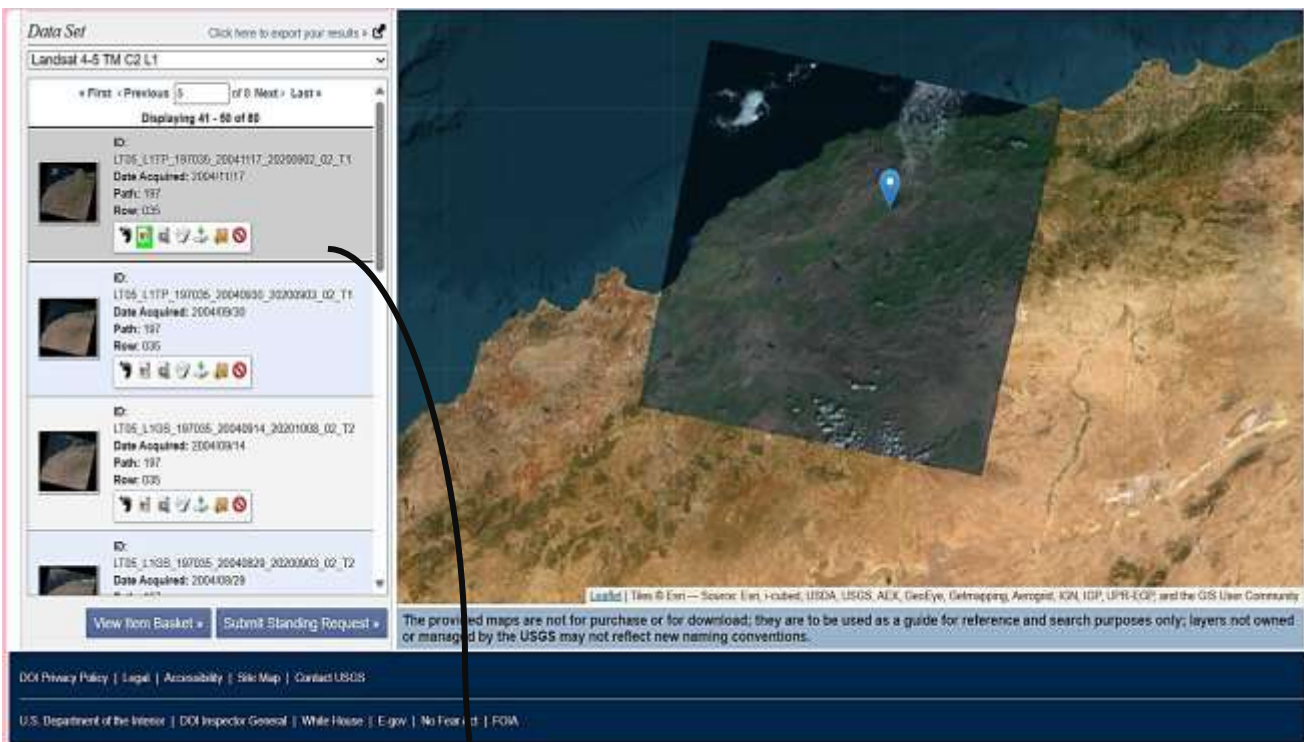


Figure 19: Sélection de l'image à télécharger

1.2.2 ARCGIS 10.6

ArcGIS est un système complet qui permet de collecter, organiser, gérer, analyser, communiquer et diffuser des informations géographiques. En tant que principale plateforme de développement et d'utilisation des systèmes d'informations géographiques (SIG) au monde, ArcGIS est utilisé par des personnes du monde entier pour mettre les connaissances géographiques au service du gouvernement, des entreprises, de la science, de l'éducation et des médias. ArcGIS permet la publication des informations géographiques afin qu'elles puissent être accessibles et utilisables par quiconque. Le système est disponible partout au moyen de navigateurs Web, d'appareils mobiles tels que des smartphones et d'ordinateurs de bureau. (<https://resources.arcgis.com/>)

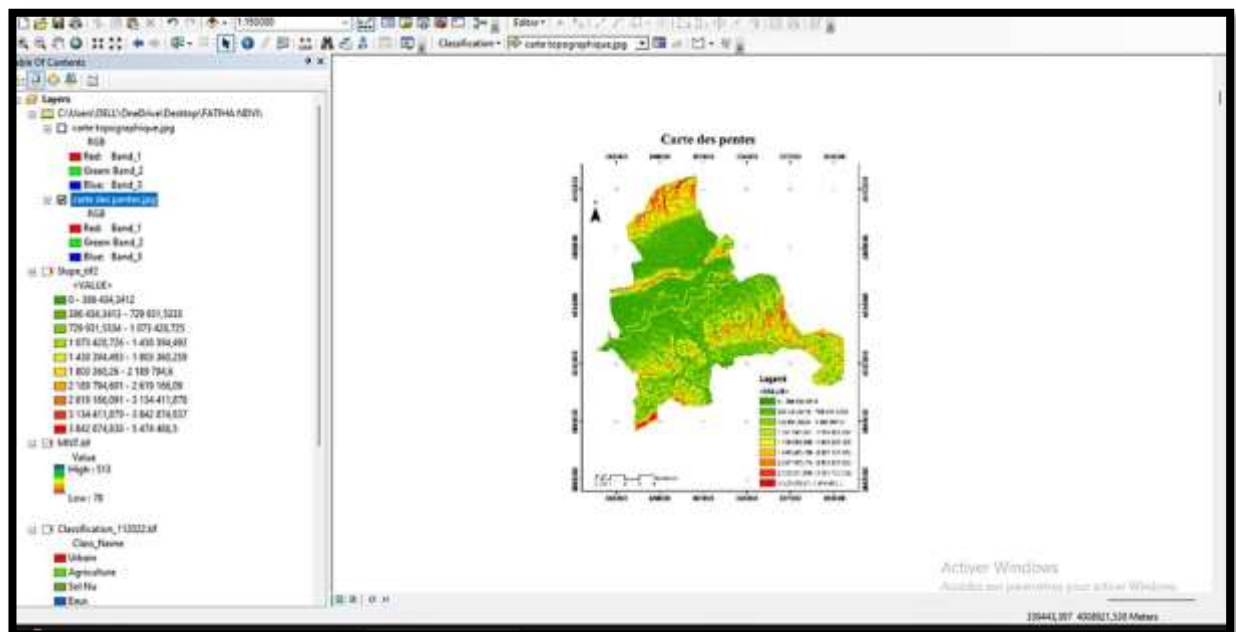


Figure 20: Utilisation de ARCGIS

1.2.3 Google Earth Pro

Google Earth Pro est un outil qui offre des images couvrant l'ensemble de la planète. Ces images sont capturées à différents moments au cours et sont continuellement mises à jour. La résolution varie selon les endroits. Google Earth permet à l'utilisateur d'observer les principales caractéristiques géographiques ainsi que les développements artificiels tels que les villes et les grandes routes. (Apport des SIG et de télédétection pour l'étude spatio-temporelle du Couvert forestier dans la région Nord-Chlef p36)



Figure 21: GOOGLE EARTH PRO CHLEF

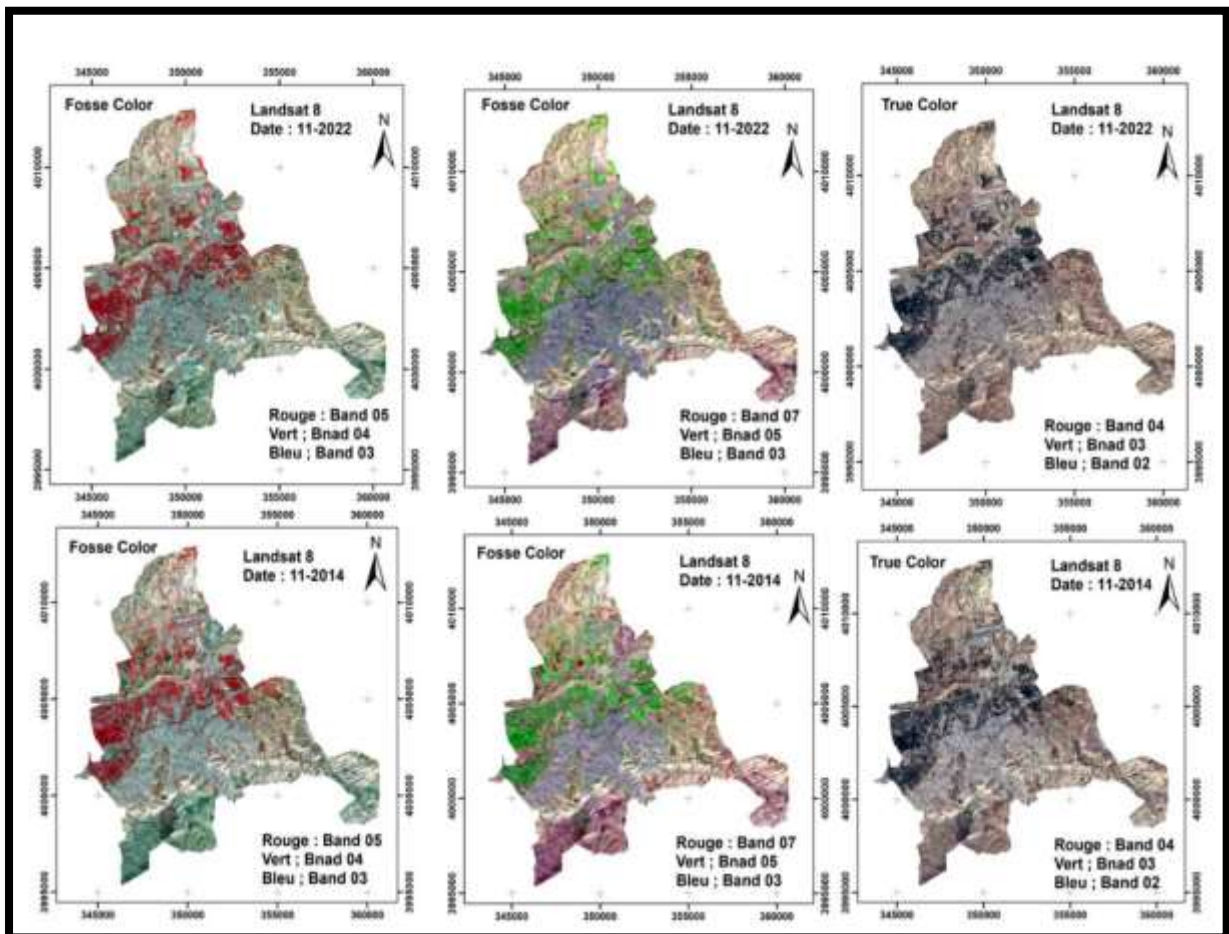


Figure 22: Les scènes captées par le satellite Landsat à différentes dates.

2 Correction radiométrique

2.1 Définition :

La correction radiométrique est une étape essentielle du prétraitement des images satellitaires. Elle vise à éliminer ou à réduire les effets des facteurs externes et internes qui influencent la qualité des données enregistrées par les capteurs. Ces facteurs peuvent inclure l'atmosphère, les conditions d'illumination solaire, l'altitude du site, ainsi que les caractéristiques propres au capteur (Chander et al., 2009).

2.2 Objectifs de la correction radiométrique

Le principal objectif de la correction radiométrique est de transformer les valeurs numériques brutes (Digital Numbers ou DN) en valeurs physiques comparables, telles que la **luminance** ou la **réflectance apparente**, voire la **réflectance de surface** (Song et al., 2001). Cette étape permet une comparaison fiable des images prises à différentes dates, sous différents angles solaires ou par différents capteurs.

2.3 Types de correction radiométrique

- **Correction des effets du capteur**

Cette correction permet d'ajuster les décalages dus à des erreurs électroniques ou à des variations dans les détecteurs du capteur. Cela comprend l'égalisation des bandes et la calibration radiométrique (Lillesand et al., 2015).

- **Correction atmosphérique**

Elle a pour but d'atténuer les effets de diffusion et d'absorption des rayonnements par les molécules et les aérosols présents dans l'atmosphère. Plusieurs méthodes existent :

- La méthode empirique **DOS (Dark Object Subtraction)**, qui suppose l'existence de pixels très sombres (valeurs proches de zéro), comme des plans d'eau ou des forêts denses (Chavez, 1988).
- L'utilisation de **modèles physiques** plus complexes comme 6S ou FLAASH, qui prennent en compte les paramètres atmosphériques (aérosols, vapeur d'eau, ozone).

- **Correction solaire**

La variation de l'angle d'élévation solaire peut fortement influencer les valeurs de radiance. Une correction prenant en compte l'**angle zénithal solaire** permet d'uniformiser les conditions d'illumination entre les différentes scènes (Richter & Schlöpfer, 2002).

- **Importance pour cette étude**

Dans le cadre de cette étude, les images Landsat utilisées ont été prétraitées par correction radiométrique afin d'assurer la cohérence des analyses temporelles.

3 Création des cartes d'indices

On utilise plusieurs indices pour renforcer notre classification afin d'avoir un bon résultat de classification, citant :

3.1.1 Calcul de l'indice NDVI à partir des images Landsat

L'indice NDVI, acronyme de Normalized Difference Vegetation Index, est un indicateur numérique utilisé pour analyser l'état de santé des végétaux à distance. Il repose sur la capacité des plantes à absorber et réfléchir différentes longueurs d'onde lumineuse.

□ Landsat 5 – Thematic Mapper (TM) (Période : 1990 – 2010) :

Pour les images acquises par le capteur Thematic Mapper (TM) du satellite Landsat 5 , le calcul du NDVI s'effectue avec les bandes suivantes :

- Bande 4 : Proche infrarouge (NIR) centrée à 0,83 µm.
- Bande 3 : Rouge (RED) centrée à 0,66 µm.

Formule utilisée :

$$NDVI = \frac{NIR(Bande4) - RED(Bande3)}{NIR(Bande4) + RED(Bande3)}$$

Cette formule permet d'analyser la densité et la vigueur de la végétation à partir des images Landsat 5, particulièrement utiles pour les études environnementales et agricoles.

□ Landsat 8 – Operational Land Imager (OLI) (Depuis 2013) :

Avec le satellite Landsat 8, équipé du capteur OLI (Operational Land Imager) , le calcul du NDVI utilise également deux bandes spectrales, mais avec des longueurs d'onde légèrement différentes :

- Bande 5 : Proche infrarouge (NIR) centrée à 0,865 μm .
- Bande 4 : Rouge (RED) centrée à 0,645 μm .

Formule utilisée :

$$NDVI = \frac{NIR(\text{Bande5}) - RED(\text{Bande4})}{NIR(\text{Bande5}) + RED(\text{Bande4})}$$

Grâce à une résolution spectrale améliorée, Landsat 8 offre une meilleure précision dans la détection de la couverture végétale, ce qui en fait un outil privilégié pour les analyses de suivi environnemental, agricole ou forestier.

3.1.2 Indice SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index)

L'indice SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) est couramment utilisé pour évaluer la couverture végétale, notamment dans les zones à faible densité végétale ou avec un fond de sol nu important. Contrairement au NDVI, le SAVI intègre un facteur de correction du sol (L) afin de minimiser son influence sur les résultats.

Selon le satellite utilisé, les bandes spectrales impliquées dans le calcul varient légèrement.

□ Landsat 5 – Thematic Mapper (TM) (Période : 1990 – 2010) :

Pour les images acquises par le capteur Thematic Mapper (TM) du satellite Landsat 5 , le calcul du SAVI s'effectue avec les bandes suivantes :

- Bande 4 : Proche infrarouge (NIR) centrée à 0,83 μm .
- Bande 3 : Rouge (RED) centrée à 0,66 μm .

Formule utilisée :

$$SAVI = \frac{(NIR(\text{Bande4}) - RED(\text{Bande3}))}{(NIR(\text{Bande4}) + RED(\text{Bande3}) + L)} \times (1 + L)$$

Où :

L Généralement fixé à 0,5 dans les études standard.

Cette formule permet d'analyser la densité et la vigueur de la végétation à partir des images Landsat 5, particulièrement utiles pour les études environnementales et agricoles dans des zones semi-arides ou avec un sol très présent.

□ Landsat 8 – Operational Land Imager (OLI) (Depuis 2013) :

Avec le satellite Landsat 8, équipé du capteur OLI (Operational Land Imager), le calcul du SAVI utilise également deux bandes spectrales, mais avec des longueurs d'onde légèrement différentes :

- Bande 5 : Proche infrarouge (NIR) centrée à 0,865 μm
- Bande 4 : Rouge (RED) centrée à 0,645 μm

Formule utilisée :

$$SAVI = \frac{(NIR(\text{Bande5}) - RED(\text{Bande4}))}{(NIR(\text{Bande5}) + RED(\text{Bande4}) + L)} \times (1 + L)$$

Grâce à une résolution spectrale améliorée, Landsat 8 offre une meilleure précision dans la détection de la couverture végétale, ce qui en fait un outil privilégié pour les analyses de suivi environnemental, agricole ou forestier, surtout lorsque le sol joue un rôle important dans la réflectance (Huete, n.d.).

3.1.3 Indice EVI (Enhanced Vegetation Index)

L'indice EVI (Enhanced Vegetation Index) est utilisé pour améliorer la détection de la végétation dense par rapport au NDVI. Il corrige les effets atmosphériques et est particulièrement utile dans les zones forestières ou à forte biomasse végétale.

□ Landsat 5 – Thematic Mapper (TM) (Période : 1990 – 2010) :

Pour les images acquises par le capteur Thematic Mapper (TM) du satellite Landsat 5, le calcul de l'EVI s'effectue avec les bandes suivantes :

Bande 4 : Proche infrarouge (NIR) centrée à 0,83 μm .

Bande 3 : Rouge (RED) centrée à 0,66 μm .

Bande 1 : Bleu (BLUE) centrée à 0,52 μm .

Formule utilisée :

$$EVI = G \times NIR - \frac{(NIR(\text{Bande4}) - RED(\text{Bande3}))}{(NIR(\text{Bande4}) + C_1 \times RED(\text{Bande3}) - C_2 \times BLUE(\text{Bande1}) + L)}$$

$G = 2.5$, $C_1 = 6$, $C_2 = 7.5$, $L = 1$.

Cette formule permet une meilleure analyse de la densité végétale dans les régions à haute couverture végétale, en réduisant les perturbations liées au sol et à l'atmosphère.

□ Landsat 8 – Operational Land Imager (OLI) (Depuis 2013)

Avec le satellite Landsat 8, équipé du capteur OLI (Operational Land Imager), le calcul de l'EVI utilise également trois bandes spectrales, mais avec des longueurs d'onde légèrement différentes :

Bande 5 : Proche infrarouge (NIR) centrée à 0,865 μm .

Bande 4 : Rouge (RED) centrée à 0,645 μm .

Bande 2 : Bleu (BLUE) centrée à 0,48 μm .

Formule utilisée :

$$EVI = G \times NIR(\text{Bande5}) - \frac{(NIR(\text{Bande5}) - RED(\text{Bande4}))}{(NIR(\text{Bande5}) + C_1 \times RED(\text{Bande4}) - C_2 \times BLUE(\text{Bande2}) + L)}$$

$G = 2.5$, $C_1 = 6$, $C_2 = 7.5$, $L = 1$.

Grâce à une résolution spectrale améliorée, Landsat 8 permet une meilleure précision dans la détection de la végétation dense, ce qui rend cet indice très pertinent pour les études forestières ou agricoles (Halos, S. H., and F. G. Abed., 2019.).

3.1.4 Indice NDWI (Normalized Difference Water Index)

L'indice NDWI (Normalized Difference Water Index) est couramment utilisé pour détecter les surfaces d'eau (lacs, rivières, marécages) à partir d'images satellites. Il repose sur la

différence de réflectance entre les bandes rouge et proche infrarouge. (Loaiza, D. M. 2023. Awesome Spectral Indices for Google Earth Engine.)

□ Landsat 5 – Thematic Mapper (TM) (Période : 1990 – 2010)

Pour les images acquises par le capteur Thematic Mapper (TM) du satellite Landsat 5 , le calcul du NDWI s’effectue avec les bandes suivantes :

Bande 3 : Rouge (RED) centrée à 0,66 µm.

Bande 5 : Proche infrarouge (NIR) centrée à 1,55–1,75 µm.

Formule utilisée :

$$NDWI = \frac{(RED(Bande3) - NIR(Bande5))}{(RED(Bande3) + NIR(Bande5))}$$

Cette formule permet de détecter efficacement les surfaces d’eau, utiles pour les études de cartographie hydrique, de suivi des inondations ou d’évolution des plans d’eau.

□ Landsat 8 – Operational Land Imager (OLI) (Depuis 2013)

Avec le satellite Landsat 8 , équipé du capteur OLI (Operational Land Imager), le calcul du NDWI utilise les bandes suivantes :

Bande 4 : Rouge (RED) centrée à 0,645 µm

Bande 5 : Proche infrarouge (NIR) centrée à 0,865 µm

Formule utilisée :

$$NDWI = \frac{(RED(Bande4) - NIR(Bande5))}{(RED(Bande4) + NIR(Bande5))}$$

Grâce à une meilleure résolution spatiale et spectrale, Landsat 8 améliore la précision de la détection des surfaces d'eau, notamment dans les environnements urbains ou naturels (Loaiza, 2023.).

3.1.5 Indice LST (Land Surface Temperature)

La température de surface terrestre (LST – Land Surface Temperature) est un paramètre essentiel en télédétection. Elle représente la température mesurée à la surface de la Terre (et non celle de l'air), souvent déduite à partir des données thermiques infrarouges captées par les satellites.

Cet indice joue un rôle crucial dans :

- Le suivi des îlots de chaleur urbains.
- La gestion de l'eau en agriculture.
- L'estimation de l'évapotranspiration.
- Les études climatiques et environnementales.

□ Landsat 5 – Thematic Mapper (TM) (Période : 1990 – 2010) :

Pour les images acquises par le capteur Thematic Mapper (TM) du satellite Landsat 5, le calcul du LST s'effectue avec les bandes suivantes :

- Bande 6 : bande thermique
- Étape 1 : Calcul de la radiance en sortie du capteur $L\lambda = ML \times Q_{cal} + AL$

Où :

- $L\lambda$: Radiance spectrale à la surface de capteur,
- ML : Facteur multiplicatif de calibration (0.037375),
- AL : Facteur additif de calibration (
- Q_{cal} : Valeur numérique du pixel (DN) dans bande 6.

- Étape 2 : Conversion de la radiance en température de brillance

$$Tb = \frac{K_2}{\frac{\ln(K_1 + 1)}{L\lambda}}$$

Où :

- Tb : Température de brillance (en Kelvin)
 - K₁ : Constante de Planck (gain spectral)
 - K₂ : Constante de Planck (température inverse)
 - ln : Logarithme népérien
- Étape 3 : (Optionnel) Conversion en degrés Celsius

$$T(^{\circ}C) = Tb - 273.15$$

□ Landsat 8 – Operational Land Imager (OLI) (Depuis 2013) :

Avec le satellite Landsat 8 , équipé du capteur OLI (Operational Land Imager) , le calcul du LST utilise les bandes suivantes :

Bandes thermiques :

Bande 10 : principale bande thermique (recommandée)

Bande 11 : bande supplémentaire (moins précise, mais parfois utilisée)

Étape 1 : Conversion du DN en radiance thermique

$$L\lambda = ML \times Qcal + AL$$

Où :

- $L\lambda$: Radiance spectrale (en $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$)
- ML : Facteur multiplicatif (pour Landsat 8 Bande 10 : 0.0003342)

- Q_{cal} : Valeur numérique du pixel (DN)
- AL : Facteur additif (pour Landsat 8 Bande 10 : 0.1)

Étape 2 : Calcul de la température de brillance (T_b)

$$T_b = \frac{K_2}{\frac{\ln(K_1 + 1)}{L\lambda}}$$

Où :

- T_b : Température de brillance (en Kelvin)
- K_1 : Constante de Planck pour la bande 10 = 774.89
- K_2 : Constante de Planck pour la bande 10 = 1332.67
- \ln : Logarithme népérien

Étape 3 : (Facultatif) Conversion en degrés Celsius

$$T(^{\circ}C) = T_b - 273.15$$

Après tout ça on va faire l'interprétation des résultats des indices de végétation et LST □

Landsat 8 – Operational Land Imager (OLI) (Depuis 2013) :

Avec le satellite Landsat 8 , équipé du capteur OLI (Operational Land Imager) , le calcul du LST utilise les bandes suivantes :

Bandes thermiques :

Bande 10 : principale bande thermique (recommandée)

Bande 11 : bande supplémentaire (moins précise, mais parfois utilisée)

Étape 1 : Conversion du DN en radiance thermique

$$L\lambda = ML \times Qcal + AL$$

Où :

- $L\lambda$: Radiance spectrale (en $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$)
- ML : Facteur multiplicatif (pour Landsat 8 Bande 10 : 0.0003342)
- $Qcal$: Valeur numérique du pixel (DN)
- AL : Facteur additif (pour Landsat 8 Bande 10 : 0.1)

Étape 2 : Calcul de la température de brillance (Tb)

$$Tb = \frac{K_2}{\frac{\ln(K_1 + 1)}{L\lambda}}$$

Où :

- Tb : Température de brillance (en Kelvin)
- K_1 : Constante de Planck pour la bande 10 = 774.89
- K_2 : Constante de Planck pour la bande 10 = 1332.67
- \ln : Logarithme népérien

Étape 3 : (Facultatif) Conversion en degrés Celsius

$$T(^{\circ}C) = Tb - 273.15$$

Après tous ça on va faire l'interprétation des résultats des indices de végétation et LST

4 Résultats et discussions

4.1 Interprétation de carte NDVI pour la commune de Chlef

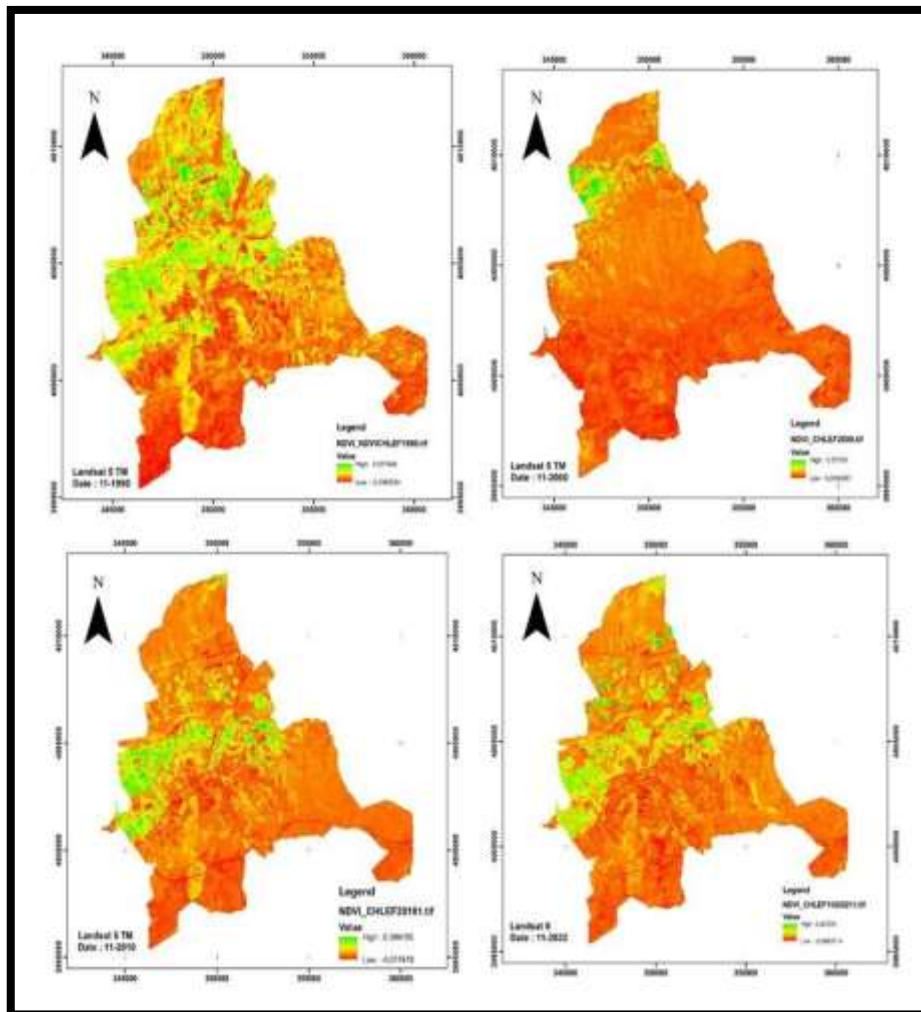


Figure 23: NDVI dans la commune de CHLEF

L'image montre une série de cartes NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) générées à partir de données Landsat (5TM, 8OLI) pour différentes années (De 1990 jusqu'à 2022) dans la commune de CHLEF. L'objectif est de comparer l'évolution de la végétation dans une zone spécifique au fil du temps. Voici une analyse détaillée des quatre cartes :

La figure est composée de quatre sous-cartes représentant chacune une carte NDVI pour un an différent. Les sous-cartes contiennent :

4.1.1 Structure générale de l'image

- En haut à gauche : une carte NDVI pour l'année 1990 ;
- En haut à droite : une carte NDVI pour l'année 2000 ;
- En bas à gauche : une carte NDVI pour l'année 2010 ;
- En bas à droite : une carte NDVI pour l'année 2022.
- Une légende indiquant les valeurs NDVI (Haute et basse)
- Les coordonnées géographiques (en UTM ou tout autre système de projection) en haut à droite ;
- Une flèche indiquant le nord ;
- Le nom de la source des images (Landsat 5 ou Landsat 8).

4.1.2 Échelle des couleurs NDVI

La couleur sur chaque carte illustre la densité de la végétation :

- Vert clair/vert foncé : Signifie une densité végétale élevée (NDVI élevé ~ 0.537548).
- Orange/jaune : Signifie une densité végétale faible (NDVI modéré).
- Rouge/marron : Signifie une quasi-absence de végétation (NDVI bas ~ -0.0365054).

4.1.3 Analyse par année

Carte de 1990 (En haut à gauche) :

Caractéristiques notables :

- La carte met en évidence une distribution inégale de la végétation.
- Les zones vertes (NDVI élevé) sont principalement situées dans certaines parties, surtout au nord-est de la zone examinée.

- Les régions rouges/marron (NDVI bas) couvrent une grande portion du territoire, signalant un faible indice de couverture végétale.

Analyse :

- En 1990, on dirait que la région présente une végétation limitée, avec des zones où la végétation est particulièrement dense, mais uniquement dans quelques endroits.
- Les zones marquées en rouge/marron peuvent représenter des sols nus, des régions bâties ou des surfaces non perméables.

Carte de l'année 2000 (En haut à droite) :

Caractéristiques notables :

- Cette carte montre une prédominance de l'orange et de l'orange foncé, signalant une densité globale de végétation faible.
- Il n'y a quasiment pas de zones vertes, à l'exception de quelques petites régions isolées.

Analyse :

- De 1990 à 2000, on a observé une baisse notable de la végétation dans cette région.
- Il pourrait s'agir de facteurs tels que la déforestation, l'urbanisation ou des modifications climatiques qui influencent la croissance des plantes.

Carte de l'année 2010 (en bas à gauche) :

Caractéristiques notables :

- Cette carte indique une légère amélioration par rapport à l'année 2000.

- On observe une visibilité accrue des zones vertes, particulièrement dans certaines régions de la commune.
- Les zones rouges et marron persistent, mais elles paraissent moins vastes que sur la carte de l'an 2000.

Analyse :

- De 2000 à 2010, une tendance positive vers une restitution partielle de la végétation a été observée.
- Cela pourrait être dû à des initiatives de restauration, des stratégies écologiques ou à des conditions météorologiques propices.

Carte de l'année 2022 (en bas à droite) :

Caractéristiques notables :

- Cette carte illustre une croissance notable des espaces verts comparativement aux années passées.
- Les zones en rouge/marron sont toujours là, mais leur superficie est nettement réduite.
- On observe une densité de végétation importante dans plusieurs régions, où les espaces verts sont particulièrement remarquables.

Analyse :

- De 2010 à 2022, on a observé une amélioration significative de la couverture végétale.

- Il pourrait s'agir du fruit de programmes de reforestation, de gestion durable des ressources naturelles ou d'une conjonction de facteurs environnementaux bénéfiques.

4.1.4 Comparaison dans le temps

1. 1990 : Végétation mixte, présentant des zones de couleurs vertes et rouges/marron.
2. 2000 : Observée une réduction significative de la végétation, dominée par des régions teintées d'orange/rouge.
3. 2010 : Une tendance positive vers un redémarrage partiel de la végétation.
4. 2022 : Amélioration notable de la couverture végétale, où prédominent les zones vertes.

4.1.5 Observation spécifique

Développement spatial :

- De 2010 à 2022, on observe une croissance progressive des espaces verts.

Au fil du temps, les régions rouges/marron ont diminué, signalant une diminution des zones dépourvues de végétation ou faiblement végétalisées.

Impact sur l'homme et l'environnement :

- Les modifications constatées pourraient être associées à des actions humaines telles que l'agriculture, l'urbanisation ou la déforestation entre 1990 et 2000.
- Les progrès notés après 2010 pourraient être attribuables à des politiques écologiques, des initiatives de reboisement ou à des conditions climatiques bénéfiques.

L'analyse des cartes NDVI montre une évolution complexe de la couverture végétale dans la commune de Chlef :

- Une perte de végétation entre 1990 et 2000, probablement due à des activités humaines et des conditions climatiques défavorables.
- Une stabilisation partielle entre 2000 et 2010, avec des signes de reprise.
- Une amélioration significative entre 2010 et 2022, indiquant une récupération écologique réussie.

4.1.6 Résumé final

- 1990 : Couverture végétale mixte, avec des zones vertes et rouges/marrons.
- 2000 : Perte importante de végétation, dominée par des zones oranges/rouges.
- 2010 : Stabilisation partielle, avec apparition de nouvelles zones vertes.
- 2022 : Amélioration significative, avec une forte densité de végétation dans de nombreuses zones.

4.1.7 Conclusion finale

L'analyse des cartes NDVI montre une évolution complexe de la couverture végétale dans la commune de Chlef :

- Une perte de végétation entre 1990 et 2000, probablement due à des activités humaines et des conditions climatiques défavorables.
- Une stabilisation partielle entre 2000 et 2010, avec des signes de reprise.
- Une amélioration significative entre 2010 et 2022, indiquant une récupération écologique réussie.

Ces résultats soulignent l'importance des actions humaines et des politiques environnementales pour inverser les effets néfastes sur l'écosystème. Il est essentiel de continuer à surveiller ces tendances pour garantir la pérennité de la végétation dans la région.

4.2 Interprétation de carte NDWI pour la commune de Chlef

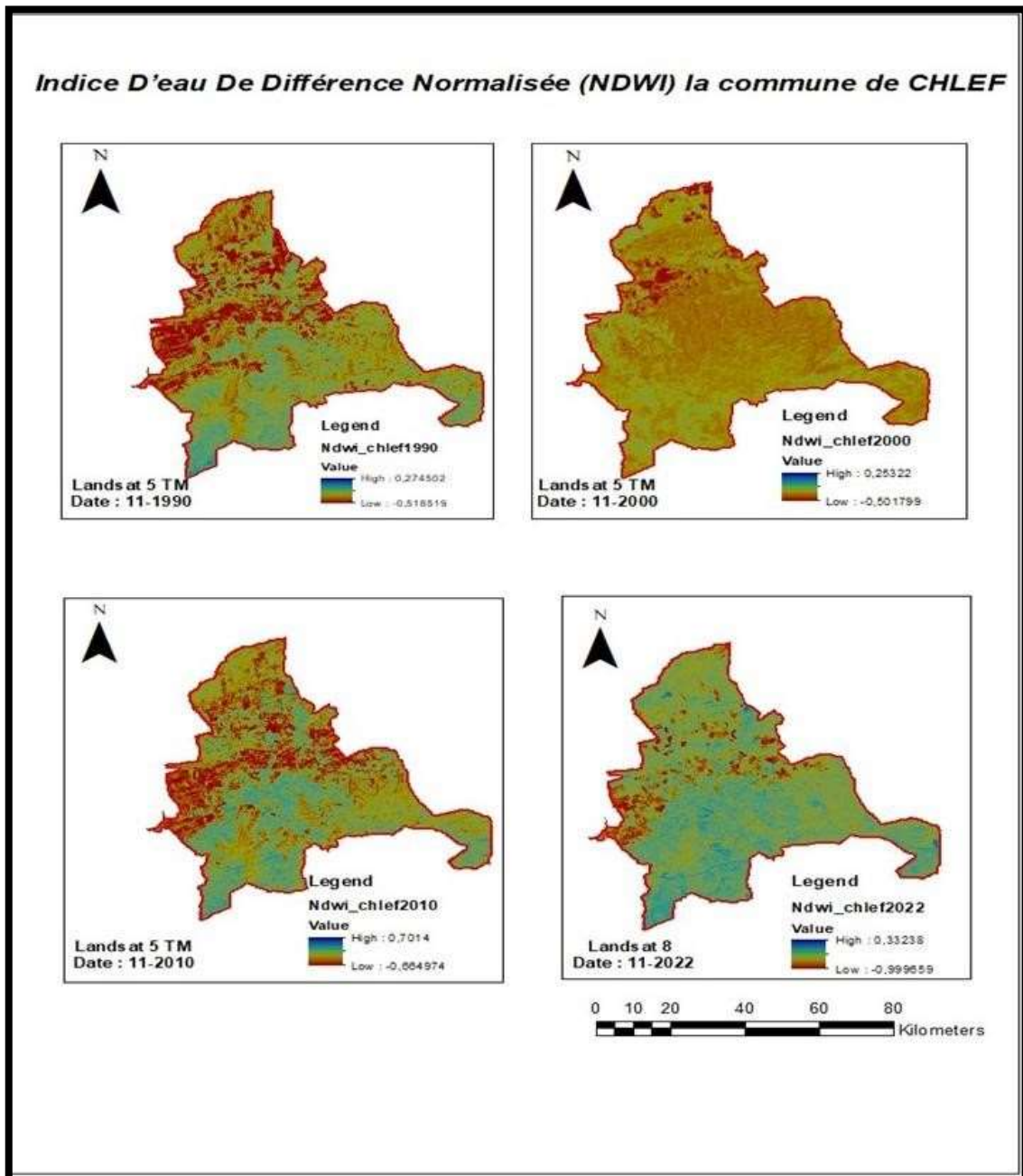


Figure 24: NDWI dans la commune de CHLEF

L'image montre une série de cartes NDWI (Normalized Difference Water Index) générées à partir de données Landsat (5TM, 8OLI) pour différentes années (De 1990 jusqu'à 2022) dans la commune de CHLEF fournies montrent l'évolution de la couverture en eau dans la zone spécifique au fil du temps. Voici une analyse détaillée des quatre cartes

Structure générale de l'image

L'image est divisée en quatre sous-cartes, chacune représentant une carte NDWI pour une année différente :

- Haut gauche : La carte NDWI pour l'année 1990 ;
- Haut droit : La carte NDWI pour l'année 2000 ;
- Bas gauche : La carte NDWI pour l'année 2010 ;
- Bas droit : La carte NDWI pour l'année 2022.
- Une légende indiquant les valeurs NDWI (haute et basse).
- Les coordonnées géographiques.
- Une flèche indiquant le nord.
- Le nom de la source des données (Landsat 5 TM ou Landsat 8).

4.2.1 Échelle de couleur NDWI

La couleur sur chaque carte représente la présence d'eau :

- Bleu clair/bleu foncé : Indique une forte présence d'eau (NDWI élevé).
- Vert/jaune : Indique une faible présence d'eau (NDWI modéré).
- Rouge/marron : Indique une absence ou très peu d'eau (NDWI bas).

4.2.2 Analyse par année

Carte de l'année 1990 (Haut gauche) :

Caractéristiques notables :

- La carte montre une distribution hétérogène de la présence d'eau.
- Les zones bleues (NDWI élevé, ~ 0.274502) sont concentrées dans certaines régions, notamment vers le sud-est de la zone d'étude.
- Les zones rouges/marrons (NDWI bas, ~ -0.518519) occupent une grande partie de la zone, indiquant une faible présence d'eau

Analyse :

- En 1990, la région semble avoir une couverture en eau limitée, avec des zones de fortes concentrations d'eau dans certaines parties seulement.

Les zones rouges/marrons peuvent correspondre à des sols nus, des zones urbanisées ou des surfaces imperméables.

Carte de l'année 2000 (Haut droit) :

Caractéristiques notables :

- Cette carte présente une dominante orange/orange foncé, indiquant une faible présence d'eau globale.
- Les zones bleues sont pratiquement inexistantes, sauf peut-être dans quelques petites zones isolées.

Analyse :

- Entre 1990 et 2000, il y a eu une diminution marquée de la présence d'eau dans la région.

Cela pourrait être lié à des facteurs tels que :

- Sécheresse : Effets du changement climatique ou réduction des précipitations.
- Utilisation intensive de l'eau : Extraction excessive pour l'agriculture ou l'industrie.
- Désertification : Perte progressive des réserves d'eau due à des conditions environnementales défavorables.

Carte de l'année 2010 (Bas gauche) :

Caractéristiques notables :

- Cette carte montre une légère amélioration par rapport à 2000.
- Des zones bleues apparaissent plus visibles, surtout dans certaines parties du territoire.
- Les zones rouges/marrons restent présentes mais semblent moins étendues que dans la carte de 2000.

Analyse :

- Entre 2000 et 2010, il y a eu une tendance positive vers une reprise partielle de la présence d'eau.

Cela pourrait être attribué à :

- Précipitations accrues : Conditions météorologiques favorables à la recharge des réservoirs d'eau.
- Gestion durable des ressources en eau : Adoption de pratiques pour limiter l'utilisation excessive de l'eau.
- Projets de restauration hydrique : Actions ciblées pour restaurer les cours d'eau ou les zones humides.

Carte de l'année 2022 (Bas droit) :

Caractéristiques notables :

- Cette carte montre une augmentation significative des zones bleues par rapport aux années précédentes.
- Les zones rouges/marrons sont encore présentes mais sont beaucoup moins étendues.
- Les zones bleues sont particulièrement visibles dans plusieurs parties de la région, indiquant une forte présence d'eau.

Analyse :

- Entre 2010 et 2022, il y a eu une nette amélioration de la couverture en eau.

Cela pourrait être le résultat de :

- Conditions climatiques favorables : Pluviosité accrue ou températures plus clémentes permettant une meilleure conservation de l'eau.
- Politiques environnementales renforcées : Mise en place de mesures pour protéger les écosystèmes aquatiques.
- Restauration des cours d'eau : Projets spécifiques pour revitaliser les rivières, les lacs ou les zones humides.
- Réduction de la consommation d'eau : Adoption de pratiques agricoles et industrielles plus efficaces en termes d'utilisation de l'eau.

4.2.3 Comparaison temporelle

En comparant les quatre cartes, on observe une évolution claire de la couverture en eau dans la région :

1. 1990 : Couverture en eau mixte, avec des zones bleues et rouges/marrons.
2. 2000 : Diminution marquée de la présence d'eau, dominée par des zones oranges/rouges.

3. 2010 : Tendance positive vers une reprise partielle de la présence d'eau.
4. 2022 : Amélioration significative de la couverture en eau, avec des zones bleues prédominantes.

4.2.4 Observation spécifique

Développement spatial :

- Les zones bleues ont tendance à se développer progressivement depuis 2010 jusqu'en 2022.
- Les zones rouges/marrons ont reculé au fil du temps, indiquant une réduction des surfaces nues ou peu humides.

Impact humain et environnemental :

- Les changements observés peuvent être liés à des activités humaines telles que l'exploitation excessive des ressources en eau entre 1990 et 2000.
- Les améliorations observées après 2010 pourraient être le résultat de politiques environnementales, de projets de restauration hydrique ou de conditions climatiques favorables.

4.2.5 Résumé final

- 1990 : Couverture en eau modérée, avec des zones humides visibles.
- 2000 : Diminution marquée de la présence d'eau, dominée par des zones sèches.
- 2010 : Stabilisation partielle, avec une légère reprise de la présence d'eau.
- 2022 : Amélioration significative de la couverture en eau, avec des zones humides plus étendues.

4.2.6 Conclusion finale

Les cartes NDWI montrent une évolution similaire à celle des cartes NDVI, avec une détérioration initiale suivie d'une amélioration significative après 2010. Cela suggère que les efforts de restauration écologique et les conditions climatiques favorables ont eu un impact positif sur à la fois la végétation et la disponibilité en eau dans la commune de Chlef. Ces résultats mettent en lumière l'importance de la gestion intégrée des ressources naturelles pour maintenir la durabilité des écosystèmes.

4.3 Interprétation de carte SAVI pour la commune de Chlef

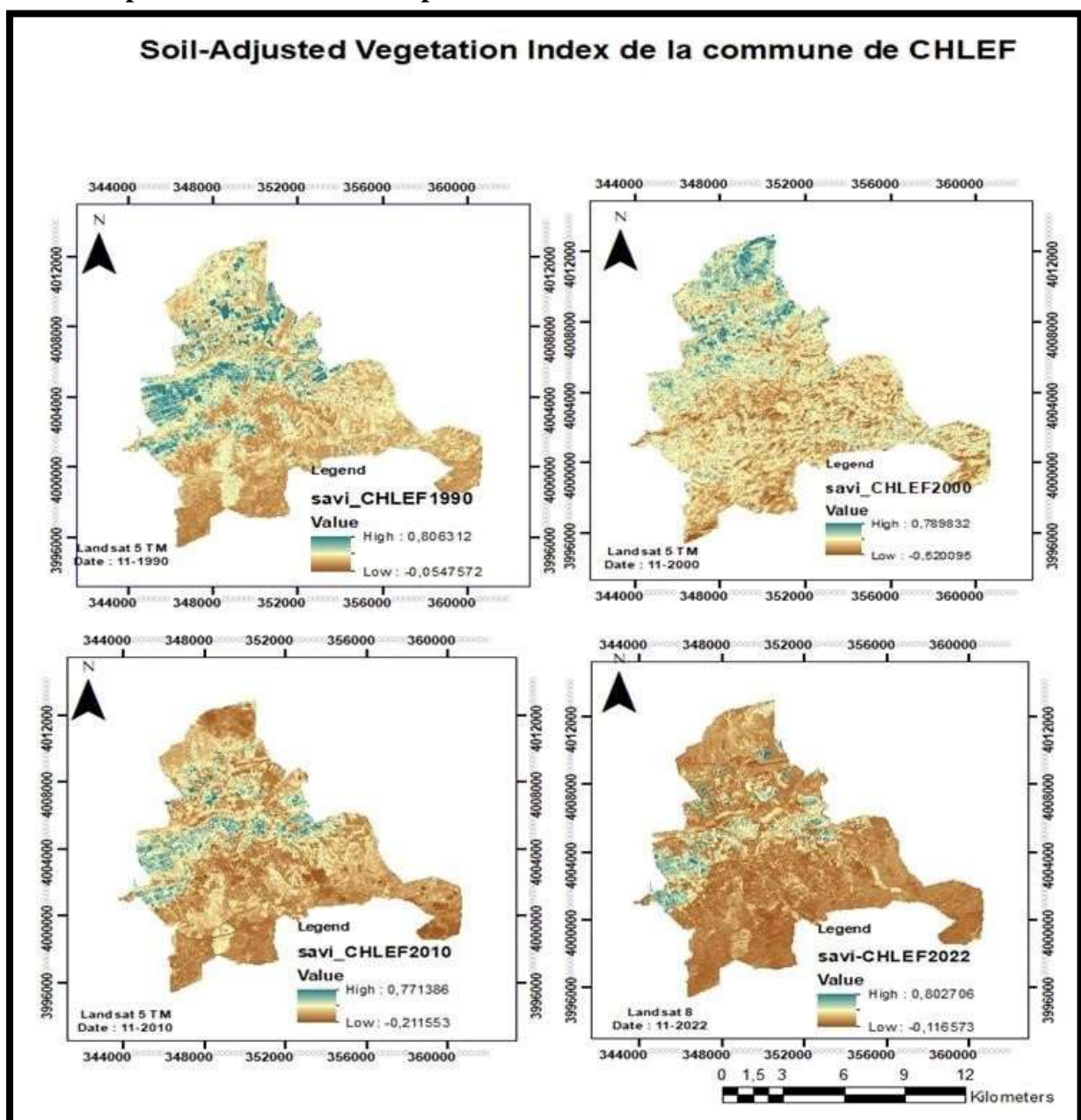


Figure 25: SAVI dans la commune de CHLEF

L'image montre une série de cartes SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index) générées à partir de données Landsat (Landsat 5TM et Landsat 8) pour différentes années (De 1990 jusqu'à 2022) dans la commune de CHLEF. L'objectif est de comparer l'évolution de la végétation dans une zone spécifique au fil du temps. Voici une analyse détaillée des quatre cartes :

4.3.1 Structure générale de l'image

L'image est segmentée en quatre sous-cartes, chaque carte SAVI correspondant à une année distincte :

- En haut à gauche : une carte SAVI pour l'année 1990 ;
- En haut à droite. : une carte SAVI pour l'année 2000 ;
- En bas à gauche : une carte SAVI pour l'année 2010 ;
- En bas à droite : une carte SAVI pour l'année 2022.

Chaque carte inclut :

- Une légende précisant les valeurs SAVI (élevée et basse).
- Les positions géographiques.
- Un indicateur directionnel pointant vers le nord.
- La dénomination de la source des données (Landsat 5 TM ou Landsat 8).

4.3.2 Échelle de couleur SAVI

Sur chaque carte, la couleur indique la densité de végétation ajustée au niveau du sol :

- Bleu clair/bleu foncé : Signale une densité végétale importante (SAVI élevé).
- Jaune/orange : Indique une densité de végétation faible (SAVI modéré).
- Brun/marron : Signifie une absence ou presque aucune végétation (SAVI faible).

4.3.3 Analyse par année

Carte de l'année 1990 (Haut gauche) :

Caractéristiques notables :

- La carte illustre une répartition inégale de la végétation.
- Les zones marquées par un indicateur de végétation élevé (SAVI ~ 0.806312) sont principalement situées dans certaines régions, en particulier dans le sud-est de la zone étudiée.

- Les régions brunes/marrons (SAVI bas ~ -0.0547572) couvrent une large portion de la zone, signalant une couverture végétale réduite.

Analyse :

- En 1990, on observe une couverture végétale apparemment restreinte dans la région, avec des zones où la végétation est particulièrement dense localisées uniquement dans certaines parties.
- Il se peut que les zones brunes/marrons représentent des terrains dégagés, des régions urbanisées ou des surfaces non perméables.

Carte de l'année 2000 (Haut droit) :

Caractéristiques notables :

- Cette carte présente une dominante jaune/orange, indiquant une faible densité de végétation globale.
- Les zones bleues sont pratiquement inexistantes, sauf peut-être dans quelques petites zones isolées.

Analyse :

- Entre 1990 et 2000, il y a eu une diminution marquée de la végétation dans la région.
- Cela pourrait être lié à des facteurs tels que :
- Déforestation : Destruction des zones boisées pour l'agriculture ou l'urbanisation.

-
- Désertification : Effets du changement climatique, sécheresse accrue ou érosion des sols.

Pratiques agricoles non durables : Utilisation excessive de pesticides, irrigation inefficace ou surexploitation des terres.

- L'absence presque totale de zones bleues suggère une détérioration significative de l'écosystème végétal.

Carte de l'année 2010 (Bas gauche) :

Caractéristiques notables :

- Cette carte montre une légère amélioration par rapport à 2000.
- Des zones bleues apparaissent plus visibles, surtout dans certaines parties du territoire.

Les zones brunes/marrons restent présentes mais semblent moins étendues que dans la carte de 2000.

Analyse :

- Entre 2000 et 2010, il y a eu une tendance positive vers une reprise partielle de la végétation. Cela pourrait être attribué à :
- Efforts de réhabilitation : Projets de reforestation ou de restauration des sols.
- Politiques environnementales : Mise en place de mesures pour protéger les espaces naturels.
- Conditions climatiques favorables : Pluviométrie accrue ou températures plus clémentes.

-
- Malgré cette amélioration, la majorité de la zone reste encore affectée par une faible densité végétale.

Carte de l'année 2022 (Bas droit) :

Caractéristiques notables :

Cette carte montre une augmentation significative des zones bleues par rapport aux années précédentes.

- Les zones brunes/marrons sont encore présentes mais sont beaucoup moins étendues.
- Les zones bleues sont particulièrement visibles dans plusieurs parties de la région, indiquant une forte densité de végétation.

Analyse :

- Entre 2010 et 2022, il y a eu une nette amélioration de la couverture végétale.
- Cela pourrait être le résultat de :
 - Projets de reforestation : Actions ciblées pour restaurer les forêts et les zones boisées.
 - Gestion durable des ressources naturelles : Adoption de pratiques agricoles respectueuses de l'environnement.
 - Sensibilisation et politiques environnementales renforcées : Engagement local et national pour préserver les écosystèmes.
 - Conditions climatiques favorables : Une pluviosité accrue ou des conditions météorologiques plus propices à la croissance végétale.

4.3.4 Comparaison temporelle

•
En comparant les quatre cartes, on observe une évolution claire de la couverture végétale dans la région :

1. 1990 : Couverture végétale mixte, avec des zones bleues et brunes/marrons.
2. 2000 : Diminution marquée de la végétation, dominée par des zones oranges/brunes.
3. 2010 : Stabilisation partielle, avec apparition de nouvelles zones bleues.
4. 2022 : Amélioration significative, avec une forte densité de végétation dans de nombreuses zones.

4.3.5 Observation spécifique

Développement spatial :

- Les zones bleues ont tendance à se développer progressivement depuis 2010 jusqu'en 2022.
- Les zones brunes/marrons ont reculé au fil du temps, indiquant une récupération écologique réussie.

Impact humain et environnemental :

- Les changements observés peuvent être liés à des activités humaines telles que l'agriculture, l'urbanisation ou la déforestation entre 1990 et 2000.
- Les améliorations observées après 2010 pourraient être le résultat de projets de reforestation, de gestion durable des ressources naturelles ou de conditions climatiques favorables.

4.3.6 Résumé final

- 1990 : Végétation modérée, avec une couverture mixte.
- 2000 : Forte baisse de la végétation.
- 2010 : Début de reprise, stabilisation partielle.
- 2022 : Amélioration notable de la couverture végétale.

4.3.7 Conclusion finale

Les cartes SAVI montrent une évolution similaire à celle des cartes NDVI et NDWI, avec une détérioration initiale suivie d'une amélioration significative après 2010. Cela suggère que les

efforts de restauration écologique et les conditions climatiques favorables ont eu un impact positif sur la végétation dans la commune de Chlef. Ces résultats mettent en lumière l'importance de la gestion intégrée des ressources naturelles pour maintenir la durabilité des écosystèmes.

4.4 Interprétation de carte EVI pour la commune de Chlef

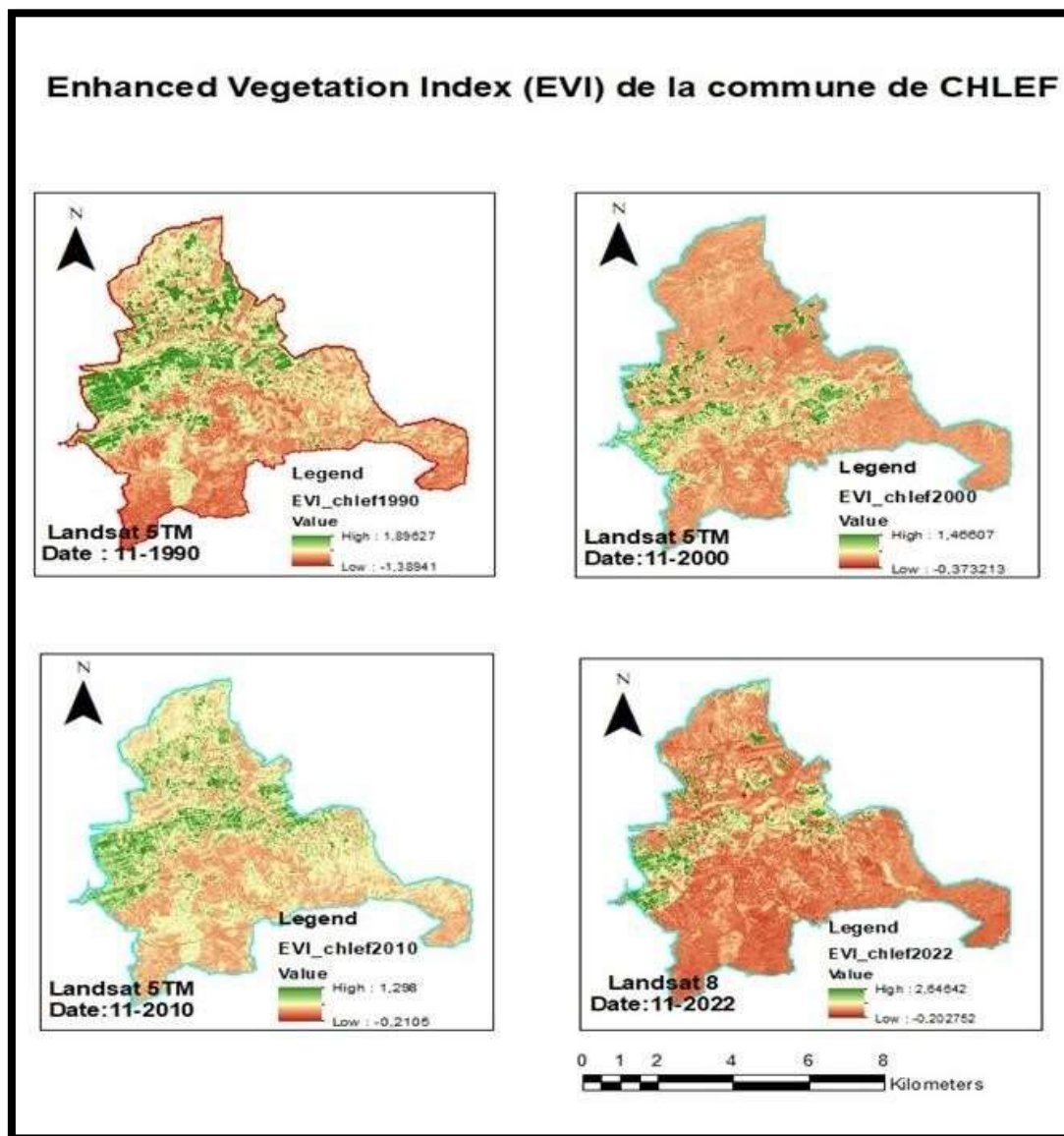


Figure 26: EVI dans la commune de CHLEF

L'image montre une série de cartes EVI (Enhanced Vegetation Index) générées à partir de données Landsat (Landsat 5TM et Landsat 8) pour différentes années (De 1990 jusqu'à 2022) dans la commune de CHLEF. Le but de ces cartes est de mesurer la densité et la santé de la végétation en corrigeant les interférences atmosphériques et du sol, afin d'obtenir une

estimation plus précise de la couverture végétale à partir d'images satellites. Voici une analyse détaillée des quatre cartes :

4.4.1 Structure générale de l'image

L'image est divisée en quatre sous-cartes, chacune représentant une carte EVI pour une année différente :

- Haut à gauche : La carte EVI pour l'année 1990 ;
- Haut droit : La carte EVI pour l'année 2000 ;
- Bas gauche : La carte EVI pour l'année 2010 ;
- Bas droit : La carte EVI pour l'année 2022.
- Une légende indiquant les valeurs EVI (haute et basse).
- Les coordonnées géographiques.
- Une flèche indiquant le nord.
- Le nom de la source des données (Landsat 5 TM ou Landsat 8).

4.4.2 Échelle de couleur EVI

Sur chaque carte, la couleur indique l'épaisseur de la végétation :

- Vert clair/vert foncé : Signale une végétation très dense (EVI élevé).
- Orange/jaune : Signale une densité de végétation faible (EVI modérée).
- Rouge/marron : Signale une absence ou presque aucune végétation (EVI faible).

4.4.3 Analyse par année

Carte de l'année 1990 (Haute gauche) Caractéristiques

notables :

- La carte illustre une répartition inégale de la végétation.

- Certaines régions, en particulier dans le sud-est de la zone d'étude, présentent une concentration élevée de zones vertes (EVI élevé, ~ 1.896527).
- Les régions marquées en rouge/marron (EVI faible, ~ -1.38941) représentent une vaste portion de la zone, signifiant une couverture végétale peu dense. données jusqu'à octobre 2023.

Analyse :

- En 1990, la région semble présenter une végétation peu abondante, avec des zones où la végétation est particulièrement dense dans certaines parties seulement.
- Les régions marquées en rouge/marron peuvent représenter des terrains dénudés, des zones bâties ou des surfaces non perméables.

Carte de l'année 2000 (Haut droit)

Caractéristiques notables :

- Cette carte affiche une prédominance de l'orange et orange foncé, signalant une densité globale de végétation faible.
- Il n'y a pratiquement pas de zones vertes, sauf peut-être dans quelques petites régions isolées.

Analyse :

- De 1990 à 2000, la végétation dans la région a subi une réduction notable.

Cela pourrait être lié à des facteurs tels que :

- Déforestation : Éradication des forêts pour faire place à l'agriculture ou à l'urbanisation.
- Désertification : Conséquences du réchauffement climatique, augmentation de la sécheresse ou dégradation des sols.
- Agriculture non durable : Usage abusif de pesticides, systèmes d'irrigation inefficaces ou épuisement excessif des sols.
- L'absence presque totale de zones vertes indique une dégradation importante de l'écosystème végétal.

Carte de l'année 2010 (Bas à gauche) :

Caractéristiques notables :

- Cette carte présente une petite amélioration par rapport à l'année 2000.
- On observe une visibilité accrue des espaces verts, notamment dans certaines régions spécifiques.
- Les régions rouges/marron persistent, mais paraissent moins vastes comparées à la carte de l'an 2000.

Analyse :

De 2000 à 2010, une tendance ascendante vers une régénération partielle de la végétation a été observée.

Cela pourrait être attribué à :

- Démarches de réhabilitation : Programmes de reboisement ou de restauration des sols.
- Politiques écologiques : L'implémentation de dispositifs visant à sauvegarder les espaces naturels.

- Conditions météorologiques propices : Augmentation de l'humidité ou températures plus douces.
- En dépit de cette amélioration, la plupart de la région continue d'être touchée par une densité végétale faible.

Carte de l'année 2022 (Bas à droite)

Caractéristiques notables :

- Cette carte indique une croissance importante des zones vertes comparé aux années précédentes.
- Les zones rouge/marron persistent, mais leur superficie est grandement réduite.
- Plusieurs régions présentent des zones vertes bien visibles, illustrant d'une densité végétale élevée.

Analyse :

- De 2010 à 2022, on a observé une amélioration significative de la couverture végétale.

Cela pourrait être le résultat de :

- Démarches de reboisement : Efforts spécifiques pour la restauration des forêts et des régions forestières.
- Gestion durable des ressources naturelles : Mise en œuvre de méthodes d'agriculture écologiquement durables.
- Sensibilisation accrue et politiques environnementales renforcées : Engagement à l'échelle locale et nationale pour la sauvegarde des écosystèmes.
- Conditions météorologiques favorables : Un accroissement de la précipitation ou des conditions atmosphériques plus adéquates à la croissance des plantes.

4.4.4 Comparaison temporelle

En comparant les quatre cartes, on observe une évolution claire de la couverture végétale dans la région :

1. 1990 : Végétation mixte, présentant des zones de couleurs vertes et rouges/marron.
2. 2000 : Une baisse notable de la végétation est observée, avec des zones dominantes en orange/rouge.
3. 2010 : Stabilisation partielle, marquée par l'émergence de nouvelles zones vertes.
4. 2022 : Progrès notables, marqué par une densité végétale importante dans plusieurs régions.

4.4.5 Observations spécifiques

Évolution spatiale :

- L'expansion graduelle des espaces verts se constate depuis 2010 et se poursuit jusqu'en 2022.
- L'évolution dans le temps des zones rouges/marron, qui ont diminué, témoigne d'une réussite dans la restauration écologique.

Impact humain et environnemental :

- Il est possible que les modifications constatées soient attribuables à des actions humaines comme l'agriculture, l'urbanisation ou la déforestation entre 1990 et 2000.
- Les progrès notés après 2010 pourraient découler de programmes de reboisement, de gestion responsable des ressources naturelles ou d'un climat propice.

4.4.6 Résumé final

- 1990 : Couverture végétale modérée, avec des zones de bonne densité végétale (vert foncé) et des zones sèches (rouge/marron).
- 2000 : Net recul de la végétation, avec une dominance de zones à faible couverture (orange/jaune), liée probablement à la sécheresse ou à l'anthropisation.
- 2010 : Début de reprise, avec une stabilisation et l'apparition de nouvelles zones de végétation (vert clair).
- 2022 : Amélioration significative de la densité végétale, avec de grandes étendues en vert foncé, traduisant une récupération écologique notable.

4.4.7 Conclusion finale

Cette suite de cartes EVI dépeint une progression compliquée de la couverture végétale dans la municipalité de Chlef :

- Une diminution de la couverture végétale entre 1990 et 2000, vraisemblablement liée à des actions humaines et à un climat défavorable.
- Une stabilisation partielle s'est produite entre 2000 et 2010, accompagnée de signes de redressement.
- Une nette progression entre 2010 et 2022, signalant une réussite en matière de réhabilitation écologique.

Ces résultats mettent en évidence la nécessité des interventions humaines et des politiques environnementales pour remédier aux impacts défavorables sur l'écosystème. Il est crucial de maintenir une observation constante de ces tendances afin d'assurer la durabilité de la végétation dans cette zone.

4.5 Interprétation de carte LST pour la commune de Chlef

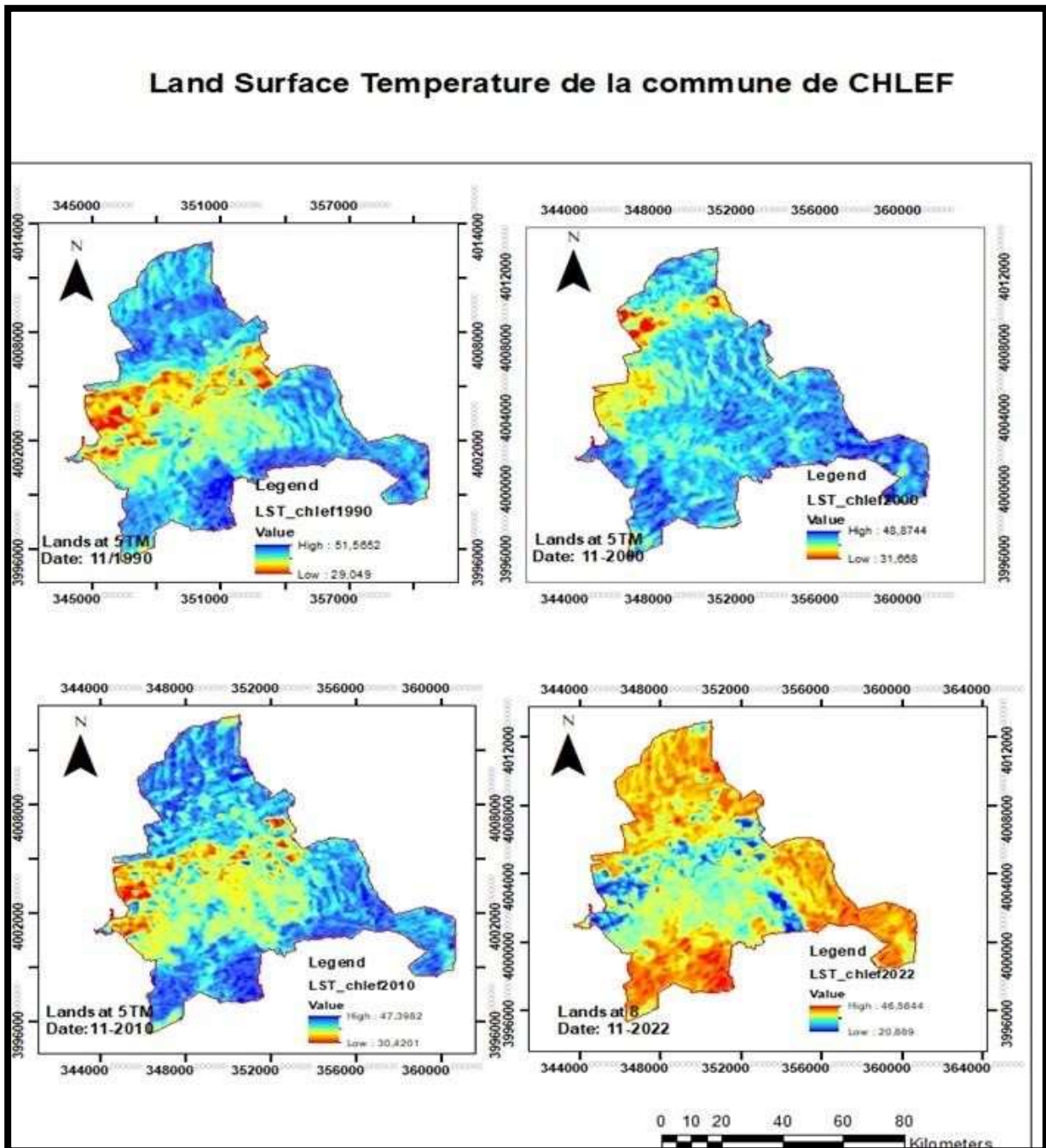


Figure 27: LST dans la commune de CHLEF

L'image montre une série de cartes LST (Land Surface Temperature) générées à partir de données Landsat (Landsat 5TM et Landsat 8) pour différentes années (De 1990 jusqu'à 2022) dans la commune de CHLEF. Les données fournies montrent l'évolution de la température de surface terrestre dans une zone spécifique au fil du temps. Voici une analyse détaillée des quatre cartes :

4.5.1 Structure générale de l'image

L'image est divisée en quatre sous-cartes, chacune représentant une carte LST pour une année différente :

- Haut gauche : La carte LST pour l'année 1990 ;
- Haut droit : La carte LST pour l'année 2000 ;
- Bas gauche : La carte LST pour l'année 2010 ;
- Bas droit : La carte LST pour l'année 2022 .
- Une légende indiquant les valeurs LST (haute et basse).
- Les coordonnées géographiques.
- Une flèche indiquant le nord.
- Le nom de la source des données (Landsat 5 TM ou Landsat 8).

4.5.2 Échelle de couleur LST

La couleur sur chaque carte représente la température de surface terrestre : • Bleu clair/bleu foncé : Indique des températures basses (LST faible).

- Jaune/orange/rouge : Indique des températures élevées (LST élevée).

4.5.3 Analyse par année

Carte de l'année 1990 (Haut gauche) :

Caractéristiques notables :

- La carte montre une distribution hétérogène de la température de surface.
- Les zones bleues (LST basse $\sim 29.049^{\circ}\text{C}$) sont concentrées dans certaines régions, notamment vers le sud-est de la zone d'étude.

- Les zones rouges/oranges (LST élevée $\sim 51.5652^{\circ}\text{C}$) occupent une grande partie de la zone, indiquant des températures élevées.

Analyse :

- En 1990, la région semble avoir des températures de surface variées, avec des zones plus fraîches dans certaines parties seulement.
- Les zones rouges/oranges peuvent correspondre à des surfaces imperméables (ex. urbanisation, sols nus), où la chaleur est accumulée et restituée rapidement.

Carte de l'année 2000 (Haut droit) :

Caractéristiques notables :

- Cette carte présente une dominante jaune/orange, indiquant des températures de surface globalement élevées.
- Les zones bleues sont pratiquement inexistantes, sauf peut-être dans quelques petites zones isolées.

Analyse :

- Entre 1990 et 2000, il y a eu une augmentation marquée des températures de surface dans la région.

Cela pourrait être lié à des facteurs tels que :

-
- Urbanisation accrue : Expansion des zones urbaines, augmentant la proportion de surfaces imperméables (effet îlot de chaleur urbain).
- Désertification : Perte progressive des couvertures végétales qui jouent un rôle de refroidissement naturel.

Changement climatique : Augmentation générale des températures dues aux effets du réchauffement global.

Carte de l'année 2010 (Bas gauche) :

Caractéristiques notables :

- Cette carte montre une légère amélioration par rapport à 2000.
- Des zones bleues apparaissent plus visibles, surtout dans certaines parties du territoire.
- Les zones rouges/oranges restent présentes mais semblent moins étendues que dans la carte de 2000.

Analyse :

- Entre 2000 et 2010, il y a eu une tendance positive vers une diminution partielle des températures de surface.

Cela pourrait être attribué à :

- Pratiques environnementales : Adoption de mesures pour limiter l'urbanisation incontrôlée ou pour restaurer les espaces verts.

-
- Conditions climatiques temporaires : Années plus fraîches ou pluvieuses ayant contribué à atténuer les températures.
- Malgré cette amélioration, la majorité de la zone reste encore affectée par des températures élevées. Carte de l'année 2022 (Bas droit)

Caractéristiques notables :

Cette carte indique une augmentation notable des zones rouges/oranges comparativement aux années antérieures.

- Les zones bleues demeurent visibles, mais leur étendue est considérablement réduite.
- Les températures maximales s'élèvent à des valeurs extrêmement élevées~48.5644°C.

Analyse :

- Du 2010 au 2022, une hausse marquée des températures de surface a été observée.

Cela pourrait être dû à :

- L'effet d'îlot de chaleur urbain intensifié : Extension incessante des zones urbanisées, avec un accroissement des surfaces non perméables.
- L'accélération du changement climatique : Les effets cumulés du réchauffement global conduisant à l'élévation des températures.
- Réduction de la couverture végétale : Disparition des espaces naturels capables de modérer la température par le biais de l'évapotranspiration.
- Effets météorologiques extrêmes : Périodes de canicule ou sécheresses prolongées.

4.5.3.1 4.5.4 Comparaison temporelle

•
Une analyse des quatre cartes révèle une progression évidente de la température de surface dans la zone :

1. 1990 : Des températures variées, comportant des régions froides et chaudes.
2. 2000 : Hausse notable des températures, dominée par des régions à forte chaleur.
3. 2010 : Stabilisation partielle, accompagnée de l'émergence de nouvelles zones froides.
4. 2022 : Hausse notable des températures, caractérisée par des valeurs particulièrement hautes.

4.5.4 Observation spécifique

Développement spatial :

- Les régions identifiées en rouge/orange semblent s'agrandir progressivement de 2000 à 2022.
- Au fil du temps, les zones marquées en bleu ont diminué, signalant une hausse générale des températures.

Impact humain et environnemental :

- Les modifications constatées peuvent être attribuées à des actions humaines comme l'urbanisation, la déforestation ou la transformation des sols.
- Les progrès temporaires (similaires à ceux de 2010) pourraient être attribués à des conditions météorologiques bénéfiques ou à des mesures environnementales locales.

Limites des données :

- Les valeurs LST diffèrent en fonction des sources de données (Landsat 5 TM comparé à Landsat 8). Il est essentiel de prendre en compte les disparités techniques entre ces satellites.
- Les images n'exposent pas de manière explicite les raisons des changements, mais elles offrent des indices puissants pour déceler les tendances spatio-temporelles.

4.5.5 Résumé final

- 1990 : Températures variées, avec des zones chaudes et froides.
- 2000 : Augmentation marquée des températures, dominée par des zones très chaudes.
- 2010 : Stabilisation partielle, avec une légère diminution des températures maximales.
- 2022 : Nouvelle augmentation significative des températures, atteignant des valeurs extrêmement élevées.

4.5.6 Conclusion finale

Les cartes LST montrent une tendance globale à l'augmentation des températures de surface terrestre dans la commune de Chlef, avec des pics particulièrement marqués après 2010. Ces résultats mettent en lumière l'impact combiné de l'urbanisation, du changement climatique et de la dégradation des écosystèmes sur le microclimat local. Il est essentiel de continuer à surveiller ces tendances pour prendre des mesures adaptées afin de limiter les effets néfastes du réchauffement climatique.

5 Comparaison entre les indices

INDICE	NDVI	NDWI	SAVI	LST	EVI
Objectif	Évalue la densité de végétation	Évalue la présence d'eau	Évalue la température de la surface terrestre.	Évalue la densité de végétation corrigée pour les effets atmosphériques.	Évalue la densité de végétation corrigée pour les effets atmosphériques.
Tendance globale	Dégradation (1990-2000), suivie d'une amélioration (2010-2022)	Dégradation (1990-2000), suivie d'une amélioration (2010-2022)	Dégradation (1990-2000), suivie d'une amélioration (2010-2022)	Croissance durable (1990–2022)	Dégradation (1990-2000), suivie d'une amélioration (2010-2022)
Facteurs principaux	Déforestation, déforestation, d'urbanisation, gestion des terrains	Sécheresse, extraction d'eau, gestion des ressources en eau	Dégradation des terres, urbanisation, administration des terrains.	Urbanisation, modification de météo, désertification	Déforestation, développement urbain, modification de météo

Tableau 8: Comparaison des indices

6 La classification supervisée en télédétection

La classification supervisée est une méthode d'analyse d'images utilisée en télédétection pour identifier et cartographier des objets ou des phénomènes à la surface de la Terre à partir d'images satellites ou aériennes. Elle repose sur l'utilisation d'un ensemble d'exemples connus, appelés échantillons d'apprentissage, qui permettent à un algorithme d'apprendre à reconnaître les caractéristiques spectrales associées à différentes classes (par exemple : forêt, eau, zone urbaine, sol nu, etc.).

6.1 Définition détaillée

La classification supervisée consiste à attribuer une étiquette de classe à chaque pixel (ou groupe de pixels) d'une image satellite, sur la base d'un modèle d'apprentissage construit à partir de données d'entraînement fournies par un expert.

Contrairement à la classification non supervisée où les classes sont découvertes automatiquement, la classification supervisée nécessite une intervention humaine au départ pour définir les classes pertinentes et fournir des exemples représentatifs de chacune.

6.2 Principe général

En classification supervisée, un expert identifie à l'avance des zones dans l'image dont il connaît la classe (on les appelle échantillons d'apprentissage ou régions d'intérêt - ROI). À partir de ces exemplaires, un algorithme apprend à reconnaître les caractéristiques spectrales de chaque classe, puis applique cette connaissance à l'ensemble de l'image.

6.3 Étapes de la classification supervisée

1) Choix des classes :

- Définir les catégories à détecter (ex : forêt, eau, ville, cultures, etc.).

2) Sélection des échantillons d'apprentissage (ROI) :

- Choisir des zones représentatives de chaque classe sur l'image.
- Ces zones doivent être homogènes et suffisamment nombreuses pour bien représenter la variabilité spectrale.

3) Extraction des signatures spectrales :

- Pour chaque ROI, extraire les valeurs des pixels dans toutes les bandes spectrales de l'image.

4) Choix et entraînement d'un classifieur :

- Utiliser un algorithme d'apprentissage supervisé (voir ci-dessous).

5) Classification de l'image :

- Appliquer le modèle à tous les pixels de l'image.

6) Post-traitement :

- Filtrage pour éliminer le "bruit" ou les pixels mal classés.
- Agrégation de classes similaires.

7) Validation

6.4 Outils logiciels

Logiciels propriétaires :

- ENVI
- ERDAS Imagine
- ArcGIS Pro

Logiciels libres et open-source :

- QGIS + plugin Semi-Automatic Classification
- GRASS GIS
- Orfeo Toolbox
- Python : GDAL, Scikit-learn, TensorFlow, Rasterio, OpenCV, etc.

6.5 Avantages de la classification supervisée

- Grande précision si les échantillons sont bien choisis.
- Bonne adaptabilité à des cas d'étude spécifiques.

- Contrôle total sur les classes à identifier.

6.5.1 5.6 Limites

- Nécessite une connaissance préalable du terrain (expertise).
- Coûteuse en temps (collecte des échantillons, validation).
- Risque de biais si les échantillons ne sont pas représentatifs.

7 Pour notre zone d'étude la commune de CHLEF de 1990 a 2022

7.1 Les étapes

1. Télécharger les images satellitaires de Landsat 8 depuis USGS et ajouter dans ARCGIS les bandes suivantes : Bande 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11 comme la figure ci-dessous.
2. Après appuie sur Windows + image analysis +sélectionnés les bandes ajoutées et compiste bands.
3. Après ajouter la bande 8 pour faire la résolution 15m.
4. On commence à faire la classification il faut toujours garder les couleurs naturelles de la zone et pour voir les couleurs naturelles de la zone il y a les combinaisons RGB donc : R(bande4) ; G(bande3) ; B(bande2).
5. Choix des classes et Définir les catégories à détecter (ex : Végétation, Habitation, Sol nu, eau.).
6. Définir les couleurs verts pour la végétation et gris pour l'habitation et beige pour le sol nu et bleu pour l'eau
7. Convertir le travail de raster a vecteur par class_name (Végétation, habitation, sol nu, eau).
8. Et puis appuie sur dislover avec class_name pour polygoniser.
9. Et la dernière étape et d'ajouter les vrais couleurs dans la carte
 - Vert pour la végétation ;

- **Gris** pour l'habitation ;
- **Beige** pour le sol nu ;
- **Blue** pour l'eau.

10. Valider le travail et avoir une classification supervisée.

7.2 Logiciels

- USGS EarthExplorer .
- ArcGIS 10.6.

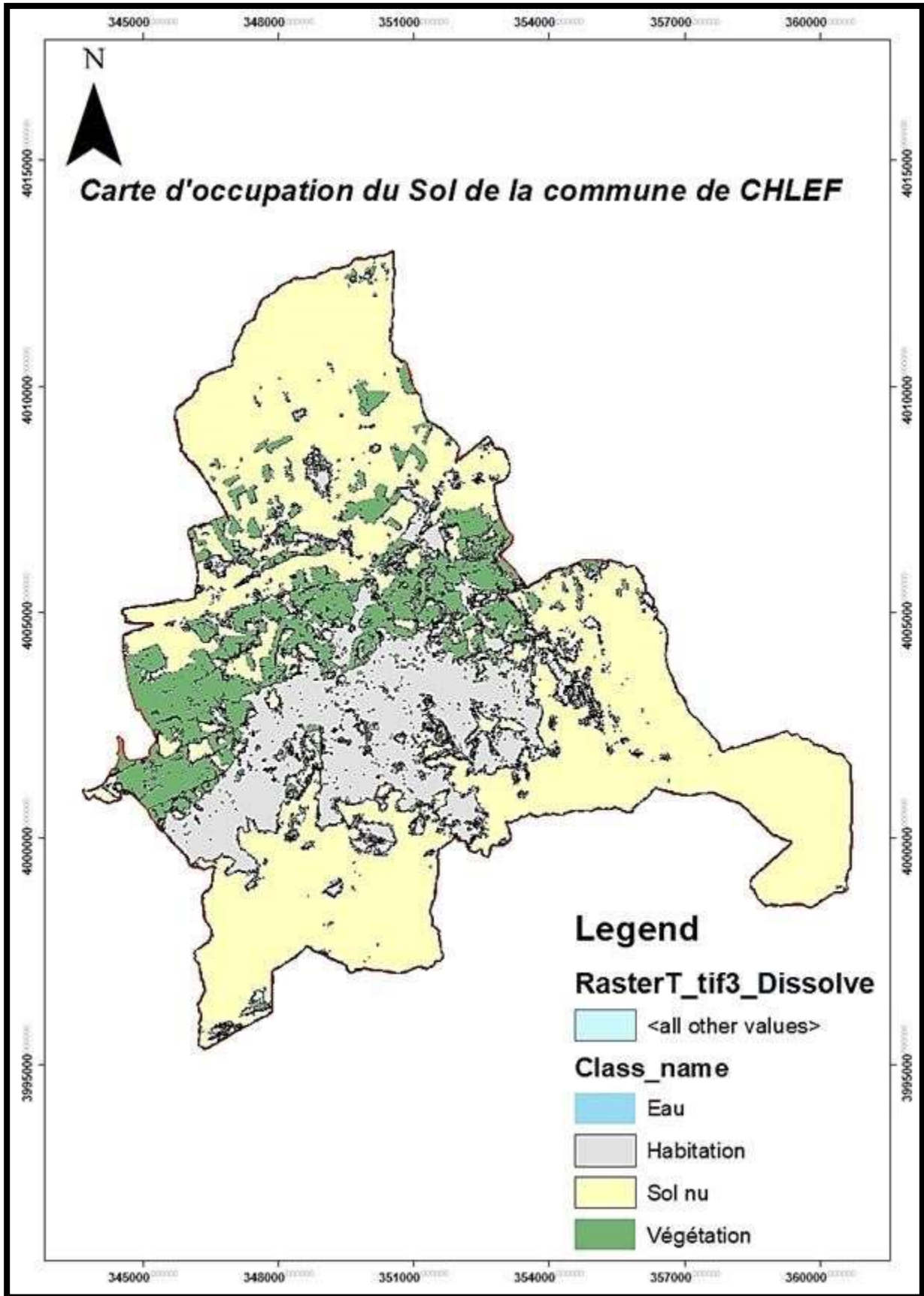


Figure 28: Carte d'occupation du sol Conclusion

L'analyse des images satellitaires constitue aujourd'hui une méthode incontournable pour l'étude des dynamiques environnementales et l'évaluation de l'évolution de la couverture végétale. Les données multispectrales fournies par les satellites Landsat (notamment les capteurs Thematic Mapper – TM et Operational Land Imager – OLI) sont largement utilisées dans ce cadre grâce à leur longue série temporelle, leur résolution spatiale adaptée et leur gratuité. Cependant, avant toute interprétation quantitative ou comparative, ces images nécessitent un prétraitement rigoureux afin d'assurer la fiabilité et la reproductibilité des résultats obtenus.

La première étape essentielle dans ce processus est la correction radiométrique, qui consiste à transformer les valeurs numériques brutes (Digital Numbers – DN) en mesures physiques comparables telles que la réflectance ou la luminance. Cette correction prend en compte plusieurs facteurs influençant la qualité des données : les effets atmosphériques (présence d'aérosols, vapeur d'eau), les variations de l'éclairement solaire dues à l'angle zénithal, ainsi que les caractéristiques propres au capteur. Plusieurs méthodes ont été appliquées dans cette étude, notamment la méthode empirique DOS1 (Dark Object Subtraction) , qui repose sur l'hypothèse d'existence de pixels très sombres (comme les plans d'eau), ainsi que des modèles physiques plus complexes comme 6S ou FLAASH, permettant une prise en compte précise des paramètres atmosphériques.

Une fois les images corrigées, il devient possible de calculer divers indices de végétation, outils clés pour évaluer l'état, la densité et la santé de la végétation. Parmi eux, nous avons utilisé :

- NDVI (Normalized Difference Vegetation Index),
- EVI (Enhanced Vegetation Index),
- SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index),
- NDWI (Normalized Difference Water Index).

Ces indicateurs permettent d'identifier les zones affectées par le stress hydrique, la dégradation écologique ou encore les variations saisonnières et interannuelles liées aux

changements climatiques. Leur analyse multi-temporelle offre une vision globale de l'évolution de la couverture végétale entre 1990 et 2022 dans la région de Chlef.

Enfin, pour aller plus loin dans l'interprétation des données et produire une cartographie précise des types d'occupation du sol, une classification supervisée a été réalisée. Cette approche consiste à attribuer une classe spécifique à chaque pixel (forêt, eau, zone urbaine, sol nu, etc.) à partir de régions d'intérêt (ROI) définies manuellement par l'utilisateur. Elle repose sur une expertise terrain et l'utilisation de logiciels spécialisés tels qu'ArcGIS 10.6, qui permettent non seulement de créer les signatures spectrales des classes choisies, mais aussi d'appliquer des algorithmes de classification (comme celui du maximum de vraisemblance ou Random Forest) et de valider les résultats obtenus.

Les logiciels utilisés dans ce chapitre comprennent :

- USGS Earth Explorer pour le téléchargement des images Landsat,
- ArcGIS 10.6 pour la gestion spatiale, la réalisation des classifications supervisées et la cartographie finale,

Ainsi, ce chapitre présente les différentes étapes de traitement des images satellitaires : la correction radiométrique, le calcul des principaux indices de végétation, et la classification supervisée, en mettant en lumière les méthodes et les outils employés pour atteindre ces objectifs. L'ensemble de ces opérations permet d'obtenir des produits cartographiques fiables et exploitables pour l'analyse spatio-temporelle de l'évolution de la végétation dans la région de Chlef.

Conclusion générale


Conclusion générale

Au terme de ce mémoire, il est clair que la télédétection a joué un rôle fondamental dans l'extraction et l'analyse des indicateurs de végétation sur la période 1990–2022. Grâce à ses capacités d'observation continues et globales, cette technologie a permis de suivre avec précision les dynamiques de la couverture végétale, offrant ainsi des outils essentiels pour la gestion des ressources naturelles, l'agriculture, l'aménagement du territoire et la lutte contre les effets du changement climatique.

L'utilisation des données issues des satellites Landsat 5 et Landsat 8 a particulièrement marqué une avancée significative en matière de qualité, de résolution spatiale et de disponibilité des données.

Ces archives ont permis d'appliquer et d'affiner des indices tels que le NDVI, le SAVI, l'EVI, le LST et le NDWI, chacun apportant une contribution spécifique à l'analyse des états et évolutions des surfaces végétalisées.

Les progrès réalisés au fil des années, tant en termes de méthodes d'analyse que d'accès aux données, ont rendu ces outils accessibles à un large éventail d'utilisateurs, allant des chercheurs aux décideurs politiques. Cependant, malgré les avancées technologiques notables,



certaines limites persistent, notamment liées aux contraintes météorologiques, à la résolution temporelle ou encore à l'hétérogénéité des surfaces analysées.

En somme, ce travail met en lumière l'apport incontestable de la télédétection dans la compréhension des systèmes végétaux à différentes échelles. Il souligne également la nécessité de poursuivre les recherches pour améliorer la fiabilité des indicateurs extraits, intégrer de nouvelles sources de données (comme les cubes temporels et l'intelligence artificielle), et renforcer leur utilisation dans les politiques publiques de développement durable et d'adaptation environnementale.

Ce mémoire, à travers ses analyses et ses résultats, contribue modestement à cette démarche scientifique en confirmant l'importance croissante des données satellitaires comme levier pour une gestion plus précise et anticipative des milieux naturels et anthropisés.

8 Bibliographie

9 Bibliographie

Articles de journaux

- Tremblay, L. (2017, 27 octobre). La foresterie retrouve ses lettres de noblesse. *Le Quotidien*, pp. 14–15.

Texte de loi

- Journal officiel de la république algérienne démocratique et populaire N°08 du 03/02/2021.

Sites web

- EOS. (2024). La télédétection : applications et technologies. <https://eos.com/fr/blog/teledetection/> [Consulté le 28 mai 2025].
- NASA. (2020). Vegetation Indices Overview. <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Vegetation> [Consulté le 28 mai 2025].
- Sentinel Hub. (2023). What are Vegetation Indices and How to Use Them in Agriculture?. <https://www.sentinel-hub.com/develop/documentation/vegetationindices/> [Consulté le 28 mai 2025].
- Théorie des graphes. (2017, 10 juin). Dans Wikipédia. https://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9orie_des_graphes
- Télédétection, C. C. d. (2024). Définition et principes de la télédétection. <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca> [Consulté le 28 mai 2025].

documents officiels

- Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH). (2007). Étude hydrogéologique de la wilaya de Chlef.
- ANRH. (2023). Rapport annuel sur la gestion de l’oued Cheliff.
- CGS, C. N. d. R. A. e. G. P. (2004). Étude de la sismicité en Algérie : cas de la région de Chlef. Alger : CGS.
- Chlef, N. (2025). Apport des SIG et de la télédétection pour l’étude spatio-temporelle du couvert forestier dans la région Nord-Chlef. s.l.: s.n.
- Direction des Services Agricoles de Chlef (DSA Chlef). (2015). Rapport annuel sur les ressources naturelles et l’usage des sols dans la wilaya de Chlef.
- INRAA. (2016). Étude du potentiel agricole de la plaine du Cheliff. Alger : Institut National de la Recherche Agronomique d’Algérie.
- MADR. (2023). Statistiques agricoles de la wilaya de Chlef.
- MATE. (2022). Schéma directeur d’aménagement de la wilaya de Chlef. Alger : Ministère de l’Aménagement du Territoire et de l’Environnement.
- ONS. (2023). Recensement général de la population et de l’habitat. Office National des Statistiques.
- Canada, Gouvernement du. (s.d.). Notions fondamentales de télédétection. pp. 5–6.
- BG. (s.d.). Optical time series for monitoring vegetation productivity. s.l. : s.n.
- ResearchGate. (s.d.). Satellite remote sensing of vegetation phenology: Progress, challenges, and opportunities. s.l. : s.n.
- Loaiza, D. M. (2023). Awesome Spectral Indices for Google Earth Engine.
- Publication, M. v. s. i. t. G. P. w. E. N. S. (s.d.). Titre non précisé.
- Commission, C. W. (2025). Titre non précisé.