الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بلقايد بكر – تلمسان –

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE

Mémoire

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

En : Métiers de la ville

Spécialité : Géomatique et gestion du foncier

Par : MEHARZI Belkacem

GHAZI Khalfellah

Sujet

Utilisation de la télédétection pour l'analyse de l'expansion urbaine : Cas de la ville de Khemis Miliana (1990–2020)

Soutenu publiquement, le 21/06/2026, devant le jury composé de :

Mme El HOUARI Nesrine	MCA	Université de Tlemcen	Présidente
Mme BOULAHYA Chahrazad	MAA	Université de Tlemcen	Examinatrice
Mme DERKAOUI Aicha	MAA	Université de Tlemcen	Encadrante
Mme SELKA Imane	MCA	Université de Tlemcen	Co-encadrante

Année universitaire: 2025/2026

Remerciements

Nous souhaitons tout d'abord exprimer notre profonde gratitude à Dieu Tout-Puissant pour nous avoir accordé la volonté, la force et la persévérance nécessaires à la réalisation de ce modeste travail.

Nous adressons nos sincères remerciements à Madame Derkaoui Aicha, notre encadrante, pour son accompagnement, ses précieux conseils, sa disponibilité et son soutien tout au long de cette recherche.

Nous tenons également à remercier chaleureusement Madame Selka Imane, co-encadrante, pour son aide, ses orientations et ses encouragements qui ont largement contribué à l'aboutissement de ce travail.

Nos remerciements les plus respectueux s'adressent également aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce mémoire :

- Madame HOUARI Nesrine, Présidente du jury, pour l'honneur qu'elle nous fait en acceptant de présider cette soutenance.
- Madame BOULAHIA Chahrazed, Examinatrice, pour l'intérêt porté à notre travail ainsi que pour ses remarques et suggestions constructives.

Nous remercions également l'ensemble des enseignants du Master Géomatique et Gestion du Foncier pour la qualité de leur enseignement, leurs conseils enrichissants et leur accompagnement tout au long de notre formation universitaire.

Nous adressons aussi nos sincères remerciements à nos amis et collègues d'études pour leur soutien moral, leur aide précieuse et les échanges enrichissants partagés durant la réalisation de ce mémoire.

Enfin, nous exprimons toute notre reconnaissance à nos familles, en particulier à nos chers parents, pour leur soutien indéfectible, leur patience et leurs encouragements constants. Nos remerciements vont également à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

إهداء

إلى من غرسا فيّ حبّ العلم والصدق والإصرار،

إلى من كانا لي سندًا ودعاءً في كل مرحلة من مراحل الحياة ... إلى والديّ العزيزين، رمز العطاء اللامحدود،

أقدّم لكما ثمرة هذا العمل عربون وفاء وامتنان

إلى عائلتي الكريمة، القريبة والبعيدة، التي كانت دومًا داعمة ومشجعة،

... إلى كل من آمن بي، ووقف إلى جانبي بالكلمة الطيبة أو بالدعاء الصادق

.إلى أصدقائي الأعزاء، الذين كان لوجودهم أثرٌ جميل في طريقي العلمي والإنساني

أهدي هذا العمل المتواضع إليكم جميعًا،

مؤمنًا بقول النبي صلى الله عليه وسلم:

" من لا يشكر الناس لا يشكر الله"

Résumé

Cette étude vise à analyser l'évolution de l'occupation du sol et l'expansion urbaine de la ville de Khemis Miliana entre 1990 et 2020 à l'aide des techniques de télédétection.

Pour atteindre cet objectif, des images satellitaires Landsat ont été exploitées et traitées à l'aide des logiciels Google Earth Engine et ArcGIS Pro. La méthodologie adoptée repose sur le calcul des indices spectraux NDVI et NDBI ainsi que sur une classification supervisée de l'occupation du sol permettant d'identifier les principales classes de couverture terrestre.

Les résultats obtenus montrent une augmentation progressive des surfaces urbanisées au détriment des espaces végétalisés et des sols nus, traduisant une dynamique d'expansion urbaine significative au cours de la période étudiée. Les cartes thématiques produites ainsi que les indicateurs statistiques ont permis de mettre en évidence l'ampleur des changements spatiaux observés.

Cette étude confirme l'intérêt de la télédétection comme outils efficaces pour le suivi des transformations territoriales et l'aide à la prise de décision en matière d'aménagement et de gestion urbaine.

Mots-clés : Expansion urbaine, Occupation du sol, Télédétection, SIG, Landsat, NDVI, NDBI, Khemis Miliana.

.

الملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل تطور استعمالات الأرض والتوسع العمراني بمدينة خميس مليانة خلال الفترة الممتدة من سنة 1990 إلى سنة 2020، بالاعتماد على تقنيات الاستشعار عن بعد .

تم استخدام صور الأقمار الصناعية Landsat ومعالجتها بواسطة منصتي Google Earth Engine و .ArcGIS Proواعتمدت الدراسة على حساب المؤشرات الطيفية، خاصة مؤشر الغطاء النباتي المعياري (NDVI) ومؤشر المناطق المبنية المعياري(NDBI) ، بالإضافة إلى تطبيق التصنيف الموجّه لاستعمالات الأرض.

أظهرت النتائج تزايدًا تدريجيًا في المساحات العمرانية على حساب المساحات النباتية والأراضي العارية خلال فترة الدراسة. كما أبرزت الخرائط الموضوعاتية والتحليلات الإحصائية حدوث تغيرات مكانية مهمة تؤكد الديناميكية المتسارعة للتوسع العمراني بمدينة خميس مليانة.

تؤكد هذه الدراسة فعالية تقنيات الاستشعار عن بعد في رصد تغيرات استعمالات الأرض ومتابعة التوسع العمراني. كما توفر هذه الأدوات دعماً مهماً لعمليات التخطيط الحضري والإدارة المستدامة للمجال.

الكلمات المفتاحية : التوسع العمراني، استعمالات الأرض، الاستشعار عن بعد، نظم المعلومات الجغرافية، لاندسات، NDVI، NDBI، خميس مليانة.

Abstract

This study aims to analyze the evolution of land use and urban expansion in the city of Khemis Miliana between 1990 and 2020 using remote sensing .

Landsat satellite images were processed using Google Earth Engine and ArcGIS Pro. The adopted methodology is based on the calculation of spectral indices, namely the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Normalized Difference Built-up Index (NDBI), as well as supervised land use/land cover (LULC) classification.

The results revealed a continuous increase in built-up areas at the expense of vegetation cover and bare soil during the study period. The generated thematic maps and statistical analyses highlighted significant spatial changes and confirmed the urban growth trend in Khemis Miliana.

This study demonstrates the effectiveness of remote sensing techniques in monitoring land-use changes and urban expansion. These tools provide valuable support for urban planning and sustainable territorial management.

Keywords: Urban expansion, Land use/land cover, Remote sensing, GIS, Landsat, NDVI, NDBI, Khemis Miliana.

Liste des abréviations

Abréviation	Signification
SIG	Système d'Information Géographique
GEE	Google Earth Engine
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NDBI	Normalized Difference Built-up Index
NDWI	Normalized Difference Water Index
NDMI	Normalized Difference Moisture Index
NDSI	Normalized Difference Snow Index
NBR	Normalized Burn Ratio
dNBR	Delta Normalized Burn Ratio
LULC	Land Use / Land Cover
REM	Rayonnement Électromagnétique
RVB	Rouge Vert Bleu
CVI	Champ de Vision Instantanée
UTM	Universal Transverse Mercator
WGS 84	World Geodetic System 1984
GPS	Global Positioning System
GIS	Geographic Information System
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre
RADAR	Radio Detection And Ranging
LIDAR	Light Detection And Ranging
ESRI	Environmental Systems Research Institute
USGS	United States Geological Survey
TM	Thematic Mapper
GLC	Couverture terrestre mondiale
FCS	Système de classification fine
LULC	LAND USE LAND COVER

Table des matières

.I Introduction générale 12
1- Objectif général 13
2- Objectifs spécifiques 13
3- Problématique 14
4- Hypothèses 14
5- Données et méthodologie 14
Chapitre 1 : Notions générales de Télédétection 15
I. Introduction 16
1- Définition 16
2- Les domaines d'application de la télédétection 17
3- Types de télédétection 18
4- Bases physiques de la télédétection 19
1. Les rayonnements électromagnétiques 19
2. Propriétés des ondes électromagnétiques 20
3. Propriétés du REM : Absorption, Réflexion, Transmission 20
4. Spectre électromagnétique 21
5. Radiation électromagnétique 21
6. Interaction des éléments de la superficie terrestre avec la radiation 22
7. La définition d'une orbite 22
8. Les capteurs (satellites) 22
9. Champ de vision instantanée (CVI). 23
10. Images satellitaires 24
11. Les différentes résolutions des images satellitaires 25
5- Visualisation des images 26
1. Les types de composition 27
6- Traitement d'images 27
1. Mosaïque des images satellites 28
7- CLASSIFICATION DE L'IMAGE 29
1. La classification supervisée 29
2. La classification non supervisée 29
8- Les indices de télédétection 29
1. Principaux indices de télédétection 30
9- La validation des résultats 31
a. Le coefficient Kappa 31

10- Conclusion 32
Chapitre2 : notion sur l'expansion urbaine et présentation de la zone d'étude... 33
II. Introduction 34
1- L'expansion urbaine 34
1. Définition 34
2. Causes de l'expansion urbaine 35
.3 Types d'expansion urbaine 35
2- Présentation de la zone d'étude 36
1. Situation géographique 36
2. Relief et topographie 37
3. Climat 37
3- Conclusion 37
Chapitre 3 : Données et méthodologie 38
III. Introduction 39
1- Matériel et données utilisées 39
1. Logiciels et outils 39
2- Méthodologie de travail 41
1. Prétraitement des images satellitaires 41
3- Classification de l'occupation du sol (LULC) 43
4- Validation des résultats 45
5- Conclusion 48
Chapitre 4: Résultats et Discussion 49
IV. Introduction 50
1- Présentation des résultats cartographiques 50
2- Analyse et interprétation des résultats 55
Analyse du NDVI 55
Analyse du NDBI 55
1. Analyse de la carte de l'occupation du sol (LULC) 55
2. Analyse de la carte du couvert végétal 57
3. Analyse de l'expansion urbaine 58
4. Tableaux de superficies 59
3- Validation des résultats 59
4- Discussion des résultats 60
5- Recommandations 61

6- Conclusion 62
CONCLUSION GENERALE 63
7-Références 64

List des figures

Figure 1:Principales étapes de la télédétection 16
Figure 2: Exemple de télédétection passive : Ici, le soleil est la source d'énergie 18
Figure 3: Exemple de télédétection active : Ici, le capteur est la source d'énergie 18
Figure 4: Caractéristique d'onde électromagnétique 19
Figure 5:Propriétés du REM 20
Figure 6: SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQU 21
Figure 7: Le spectre visible 21
Figure 8 : Relation entre la résolution spatiale et le champ de vision instantané (CVI) en télédétection 23
Figure 9: Le choix du capteur 24
Figure 10 : matrice de pixels 24
Figure 11 : Valeur radiométrique 24
Figure 12 : Visualisation des valeurs radiométriques 25
Figure 13 : Représentation par Image 26
Figure 14 : Représentation par signature spectral 26
Figure 15 : canal proche infrarouge 26
Figure 16 : canal rouge 26
Figure 17 : canal vert 26
Figure 18 : Le codage RVB 27
Figure 19 : Corrections géométriques 28
Figure 20: Couverture de la Belgique par une mosaïque de scènes SPOT corrigées géométriquement 28
Figure 21: La classification supervisée 29
Figure 22 : la classification non supervisée 29
Figure 23:Le concept d'expansion urbaine 34
Figure 24 : plan de situation de khemis Miliana 36
Figure 25 : logo ArcGIS pro 39
Figure 26 : google earth engine 40
Figure 27 : les éléments de google earth engine 41
Figure 28 : Prétraitement des images satellitaires 42
Figure 29 : Méthodologie de traitement des données via Google Earth Engine 44
Figure 30 : étape de réalisation des cartes LULC 45
Figure 31: Étapes de calcul du coefficient de Kappa et matrice de confusion obtenues sous ArcGIS Pro 46
Figure 32 : Méthodologie générale de travail 47
Figure 33 : Carte du NDVI de la ville de Khemis Miliana 51
Figure 34 : Carte du NDBI de la ville de Khemis Miliana 52
Figure 35 : Expansion urbaine de Khemis Miliana (1990-2020) 53
Figure 36 : Évolution du couvert végétal à Khemis Miliana (1990-2020) 54
Figure 37 : Graphiques à barres illustrant le développement de l'expansion urbaine (en hectares) 56
Figure 38 : Graphiques à barres montrant la couverture végétale (en hectares) 57

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Les types de composition 27
Tableau 2 : Données spatiales 40
Tableau 3 : Tableaux de superficies 59
Tableau 4 : Matrice de confusion, précision globale et coefficient Kappa 59

I. Introduction générale

La dynamique urbaine actuelle se caractérise par une expansion rapide, constituant l'un des principaux défis spatiaux du XXIe siècle. Ce phénomène exerce un impact direct sur l'équilibre écologique ainsi que sur l'organisation spatiale des territoires (Sito, 2012). Alimentée par une croissance démographique continue, cette expansion engendre une pression croissante sur les ressources naturelles et les terres agricoles, rendant la gestion urbaine de plus en plus complexe (ONU-Habitat, 2020).

Dans ce contexte, il devient essentiel de comprendre les formes, les rythmes et les orientations du développement spatial afin d'adapter les politiques d'aménagement du territoire. Toutefois, les méthodes analytiques traditionnelles, telles que les enquêtes de terrain et l'exploitation des archives cartographiques, demeurent insuffisantes pour appréhender la complexité des changements spatiaux observés. Bien qu'elles fournissent des informations locales pertinentes, ces méthodes présentent des limites en termes de coût, de temps et de couverture spatiale, ce qui empêche l'obtention d'une vision globale et actualisée du développement urbain sur le long terme.

Par conséquent, l'intégration des techniques de télédétection apparaît comme une solution efficace pour le suivi des transformations spatiales. Cette approche permet une observation continue et répétitive des surfaces terrestres, facilitant ainsi l'analyse et la modélisation de la dynamique spatiale au fil du temps (Wing, 2012). L'analyse diachronique des images satellitaires constitue donc une méthode performante pour le suivi des changements d'occupation du sol.

Le présent travail vise à étudier l'expansion urbaine de la ville de Khemis Miliana. La méthodologie adoptée repose sur le traitement d'images satellitaires et sur des analyses comparatives destinées à caractériser l'évolution du tissu urbain, à identifier les principales zones d'expansion et à évaluer l'impact de ces dynamiques sur l'environnement local.

En conclusion, cette recherche met en évidence le potentiel stratégique de la géomatique en tant qu'outil d'aide à la décision, contribuant à une gestion durable et prospective des espaces urbains.

5- Objectif général

Cette recherche vise principalement à étudier le développement urbain de Khemis Miliana à l'aide des techniques de télédétection, afin de mettre en évidence les transformations spatiales et les changements d'occupation du sol entre 1990 et 2020.

6- Objectifs spécifiques

- Analyser la croissance urbaine de Khemis Miliana entre 1990 et 2020.
- Identifier les principales zones d'expansion urbaine.
- Mettre en évidence les changements d'occupation du sol.
- Exploiter l'imagerie satellitaire afin de produire des cartes thématiques illustratives.
- Évaluer l'efficacité de la télédétection comme outil moderne d'analyse urbaine et d'aide à la décision.

7- Problématique

Face aux transformations rapides des espaces urbains, l'étude de l'expansion urbaine nécessite désormais l'utilisation d'outils performants permettant de réduire le temps d'analyse tout en garantissant des résultats précis et fiables. Dans ce contexte, la télédétection apparaît comme une méthode moderne et efficace pour le suivi des changements d'occupation du sol à différentes périodes.

Dès lors, la question suivante se pose :

Comment les techniques de télédétection peuvent-elles être utilisées pour analyser l'expansion urbaine et suivre les changements d'occupation du sol dans la ville de Khemis Miliana ?

8- Hypothèses

- La ville de Khemis Miliana a connu une expansion urbaine continue entre 1990 et 2020.
- Le développement urbain a contribué à la réduction progressive de certaines terres agricoles situées à proximité du tissu urbain.
- Les techniques de télédétection permettent de détecter et d'analyser avec précision les transformations spatiales de la zone d'étude.
- L'exploitation des images satellitaires facilite la compréhension de la dynamique urbaine et contribue à la planification future.

9- Données et méthodologie

Afin d'atteindre les objectifs fixés, une approche basée sur la télédétection a été adoptée. Des images satellitaires Landsat correspondant à plusieurs dates (1990, 2000, 2010 et 2020) ont été exploitées. Les traitements ont été réalisés à l'aide de Google Earth Engine et ArcGIS Pro, en utilisant les indices spectraux NDVI et NDBI ainsi que la classification de l'occupation du sol (LULC), afin d'identifier et d'analyser les transformations spatiales de la zone d'étude.

Chapitre 1 : Notions générales sur la Télédétection

I. Introduction

Face aux transformations rapides des espaces urbains, la télédétection s'impose comme un outil efficace permettant d'acquérir des informations précises et continues sur la surface terrestre, sans contact direct avec les objets observés, grâce à l'analyse des images satellitaires. Ce chapitre vise ainsi à présenter le cadre théorique de la télédétection, en abordant ses principes fondamentaux ainsi que les principales techniques de traitement des images satellitaires.

1-Définition

La télédétection désigne une méthode permettant d'obtenir, à distance, des informations sur la surface terrestre sans contact direct avec les objets étudiés. Elle repose principalement sur l'acquisition et l'analyse du rayonnement électromagnétique émis, réfléchi ou diffusé par les différentes surfaces terrestres.

Ce processus comprend plusieurs étapes, allant de la capture et de l'enregistrement des données jusqu'à leur traitement, leur interprétation et leur exploitation dans divers domaines d'application.

Dans la majorité des cas, la télédétection se base sur l'interaction entre l'énergie électromagnétique incidente et les éléments présents à la surface de la Terre. Les systèmes imageurs suivent généralement une succession d'étapes permettant l'acquisition et l'analyse des informations recherchées. Toutefois, certaines techniques exploitent également l'énergie émise directement par les objets observés et utilisent des capteurs non imageurs (CCT).

1. Source d'énergie ou d'illumination (A) À l'origine de tout processus de télédétection se trouve nécessairement une source d'énergie pour illuminer la cible. (CCT, 2025)

2. Rayonnement et atmosphère (B) Durant son parcours entre la source d'énergie et la cible, le rayonnement interagit avec l'atmosphère. Une seconde interaction se produit lors du trajet entre la cible et le capteur. (CCT, 2025)

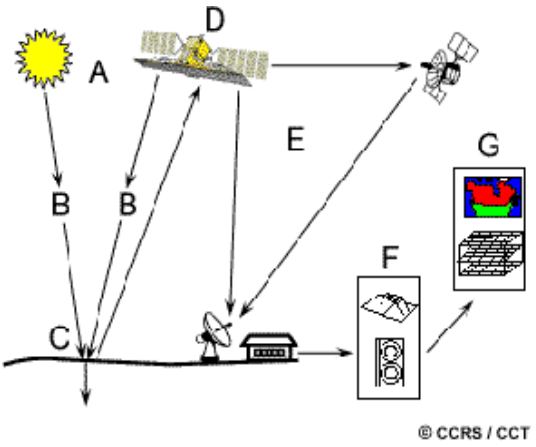


Figure 1: Principales étapes de la télédétection

3. Interaction avec la cible (C)

Une fois parvenue à la cible, l'énergie interagit avec la surface de celle-ci. La nature de cette interaction dépend des caractéristiques du rayonnement et des propriétés de la surface. (CCT, 2025)

4. Enregistrement de l'énergie par le capteur (D)

Une fois l'énergie diffusée ou émise par la cible, elle doit être captée à distance (par un capteur qui n'est pas en contact avec la cible) pour être enfin enregistrée. (CCT, 2025)

5. Transmission, réception et traitement (E)

L'énergie enregistrée par le capteur est transmise, souvent par des moyens électroniques, à une station de réception où l'information est transformée en images (numériques ou photographiques). (CCT, 2025)

6. Interprétation et analyse (F)

Une interprétation visuelle et/ou numérique de l'image traitée est ensuite nécessaire pour extraire l'information que l'on désire obtenir sur la cible. (CCT, 2025)

7. Application (G)

La dernière étape du processus consiste à utiliser l'information extraite de l'image pour mieux comprendre la cible, pour nous en faire découvrir de nouveaux aspects ou pour aider à résoudre un problème particulier. (CCT, 2025)

2-Les domaines d'application de la télédétection :

- La télédétection a d'abord été largement utilisée dans le domaine de l'étude de l'atmosphère, notamment en météorologie et en climatologie. Son principal avantage réside dans la possibilité d'assurer une observation globale et répétitive de l'ensemble de la planète. Grâce aux différents capteurs embarqués sur les satellites, il devient possible de suivre les mouvements des nuages, de mesurer les températures atmosphériques ainsi que d'évaluer la quantité de vapeur d'eau présente dans l'atmosphère. (saadi)
- Dans le domaine de **l'océanographie**, la télédétection permet l'observation de vastes zones maritimes de manière rapide et synoptique, contrairement aux méthodes classiques basées sur les navires. Elle facilite l'étude de plusieurs paramètres océaniques tels que la couleur de l'eau, la turbidité, l'état des vagues, l'altitude de la surface marine ainsi que le suivi des glaces de mer dans les régions polaires. (saadi)
- La télédétection possède également de nombreuses **applications terrestres**. Elle est utilisée dans des domaines variés comme la cartographie, la géologie, la prospection minière, la surveillance des cultures agricoles et des forêts, mais aussi dans l'urbanisme, l'aménagement du territoire et les travaux de génie civil. (saadi)

3-Types de télédétection :

Télédétection Passive : (images optiques)

Dans ce cas, le vecteur a pour rôle de capter uniquement le rayonnement réfléchi par la surface terrestre. L'énergie provenant du Soleil atteint d'abord la Terre, puis une partie de ce rayonnement est réfléchie vers le capteur embarqué, permettant ainsi l'acquisition des données nécessaires à l'observation et à l'analyse de la surface terrestre. (saadi)

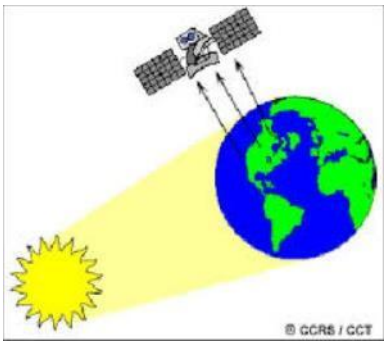


Figure 2: Exemple de télédétection passive : Ici, le soleil est la source d'énergie

Télédétection Active : (images radars)

Dans ce type de télédétection, le vecteur émet lui-même une onde en direction de la cible puis analyse le signal renvoyé sous forme d'écho. Cette méthode est utilisée notamment par le LIDAR (Light Detection and Ranging), qui fonctionne à l'aide d'une source laser, ainsi que par le RADAR (Radio Detection And Ranging), basé sur l'utilisation d'ondes hyperfréquences. Ces technologies permettent d'obtenir des informations précises sur la forme, la distance et les caractéristiques des objets observés. (saadi)

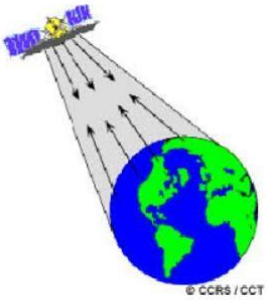
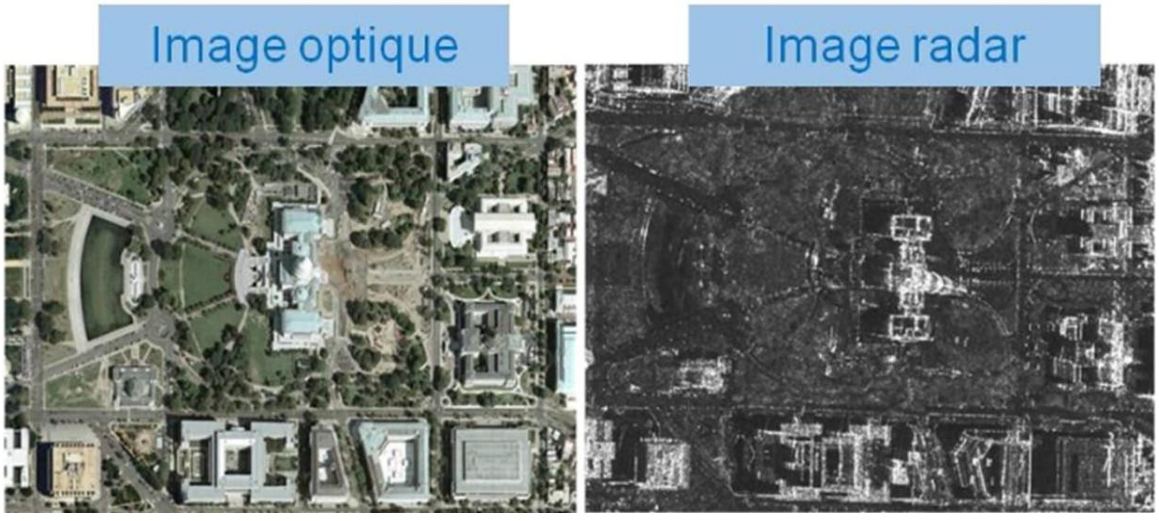


Figure 3: Exemple de télédétection active : Ici, le capteur est la source d'énergie

Différence entre les images optique et radar (saadi)



Le satellite capte le rayonnement réfléchi ---------- Télédétection Passive
Le satellite émet une onde vers la cible et en mesure l'écho ---------Télédétection Active.

4-Bases physiques de la télédétection :

1. Les rayonnements électromagnétiques :

Le rayonnement électromagnétique correspond à une forme d'énergie se propageant dans l'espace sous forme d'ondes. Il est constitué de deux champs perpendiculaires l'un à l'autre : un champ électrique et un champ magnétique. Ces deux composantes se déplacent simultanément à la vitesse de la lumière, assurant ainsi la propagation de l'énergie électromagnétique. (CCT, 2025)

Propriétés principales des ondes électromagnétiques : **La longueur ; La fréquence**

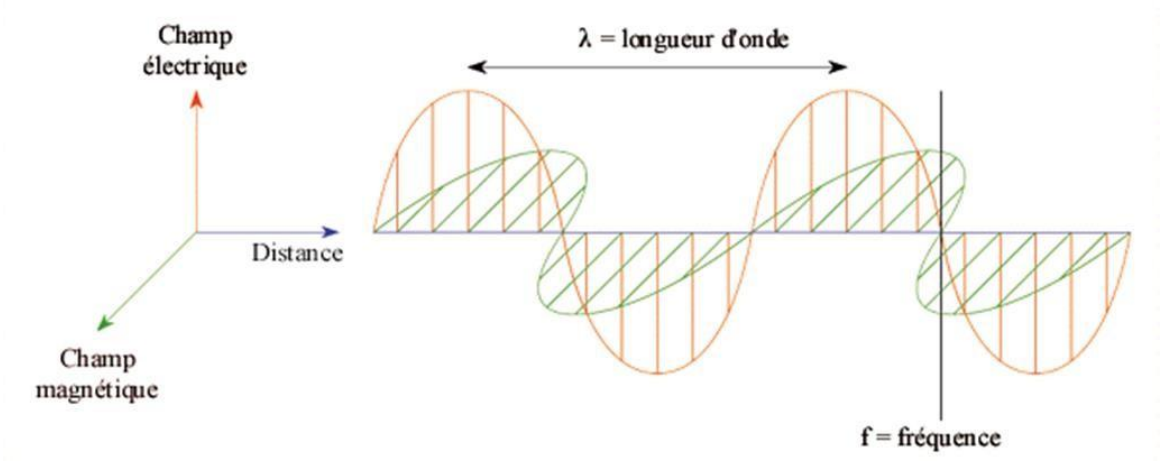


Figure 4: Caractéristique d'onde électromagnétique (saadi)

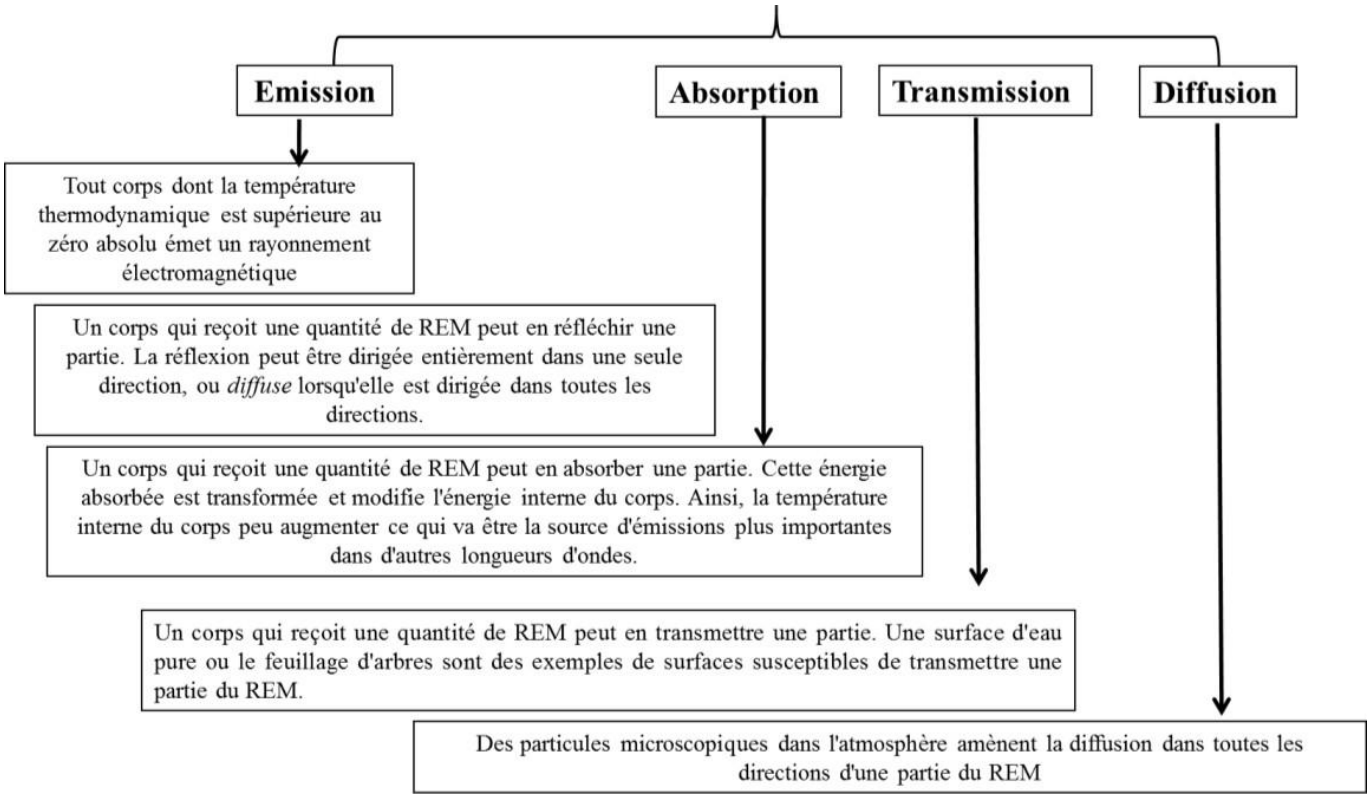
Fréquence : est le nombre de cycles par secondes passant par un point fixe. Qu'on note ν (Hz).

Longueur d'onde :la distance entre deux points homologues (deux crêtes ou deux creux) qu'on note λ (m).

La relation reliant ces deux propriétés est : c (m s^{-1}) = λ (m) ν (Hz)

Plus la fréquence est élevée, plus la longueur d'onde est petite (saadi)

2. Propriétés des ondes électromagnétiques



3. Propriétés du REM : Absorption, Réflexion, Transmission

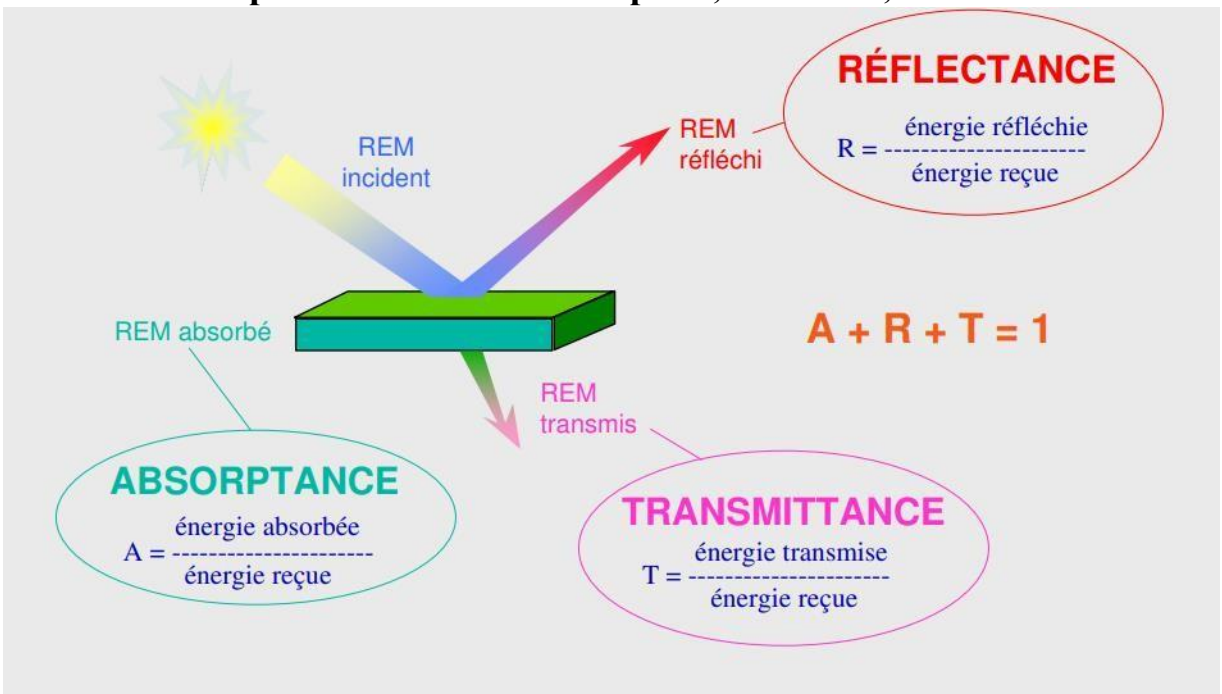


Figure 5:Propriétés du REM

REM = REM réfléchi + REM absorbé + REM Transmis

4. Spectre électromagnétique :

Le spectre électromagnétique représente l'ensemble des longueurs d'onde issues de la décomposition du rayonnement électromagnétique. Lorsque la lumière blanche traverse un prisme, elle se décompose en plusieurs couleurs visibles.

La partie visible du spectre électromagnétique est comprise entre 0,39 µm et 0,7 µm, allant du violet au rouge. Les longueurs d'onde inférieures correspondent aux ultraviolets, tandis que les longueurs d'onde supérieures appartiennent au domaine infrarouge, tous deux invisibles à l'œil humain.

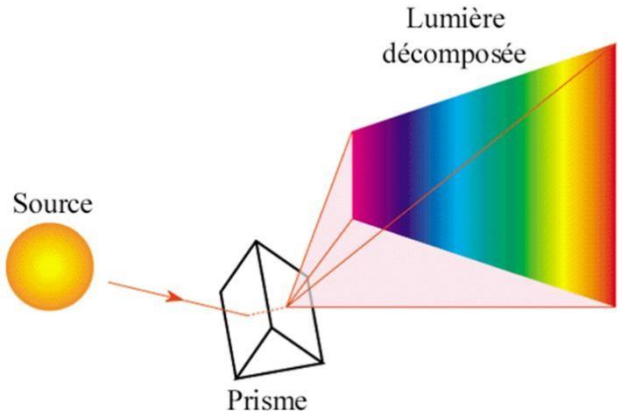


Figure 6: SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQU

5. Radiation électromagnétique :

- Le domaine visible constitue seulement une faible partie de l'ensemble du spectre électromagnétique.
- Les longueurs d'onde appartenant à cette région s'étendent approximativement de 0,4 à 0,7 µm. Cette portion du spectre est la seule que l'œil humain peut percevoir sous forme de couleurs. (saadi)
  - Violet : 0.4 - 0.446 µm
  - Bleu : 0.446 - 0.500 µm
  - Vert : 0.500 - 0.578 µm
  - Jaune : 0.578 - 0.592 µm
  - Orange : 0.592 - 0.620 µm
  - Rouge : 0.620 - 0.7 µm

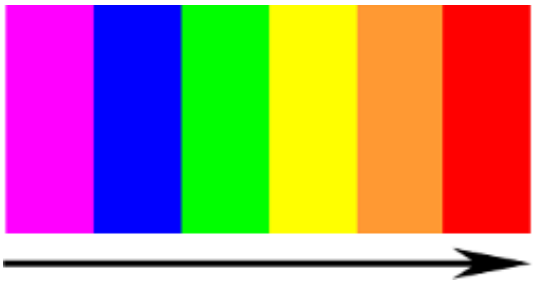


Figure7 : Le spectre visible

6. Interaction des éléments de la superficie terrestre avec la radiation :

Chaque type de surface, comme le sol, la végétation ou l'eau, réfléchit le rayonnement incident d'une manière différente. Cette différence de réflexion permet de distinguer les objets présents
sur une image satellitaire grâce à l'analyse de leur réponse spectrale.

La signature spectrale d'un objet correspond à la proportion du rayonnement électromagnétique qu'il réfléchit selon les différentes longueurs d'onde du spectre électromagnétique. Ainsi, chaque élément de la surface terrestre, qu'il s'agisse d'une forêt, d'un champ agricole, d'un bâtiment, d'un lac ou d'une plage, possède des caractéristiques spectrales propres liées aux quantités d'énergie absorbées, transmises ou réfléchies.

On parle également de comportement spectral pour désigner les variations des signatures spectrales dans le temps et selon plusieurs facteurs tels que les conditions météorologiques, les saisons ou encore l'éclairage. Par exemple, les feuilles des végétaux contiennent de la chlorophylle, un pigment qui absorbe fortement les longueurs d'onde du rouge et du bleu tout en réfléchissant le vert, ce qui explique leur couleur verte durant l'été. En automne, la diminution de la chlorophylle réduit l'absorption du rouge, donnant ainsi aux feuilles des teintes jaunes ou rouges.

L'eau présente aussi un comportement spectral particulier. Elle absorbe davantage les grandes longueurs d'onde du visible ainsi que le proche infrarouge, tandis qu'elle réfléchit plus fortement les courtes longueurs d'onde. C'est pour cette raison qu'elle apparaît généralement en bleu ou en bleu-vert sur les images. (CCT, 2025)

7.La définition d'une orbite :

En mécanique céleste et en mécanique spatiale, une orbite est la courbe fermée représentant la trajectoire que dessine, dans l'espace, un objet céleste sous l'effet de la gravitation et de forces d'inertie. (saadi)

8. Les capteurs (satellites) :

Enregistrement de l'énergie

L'énergie réfléchie ou émise par une surface ou une cible est enregistrée par un capteur installé sur une plateforme située à distance de la zone observée. Ces plateformes peuvent être proches de la surface terrestre, comme les avions ou les ballons, ou placées en dehors de l'atmosphère, comme les satellites ou les véhicules spatiaux.

1. Au niveau terrestre, certains capteurs sont installés directement sur des structures fixes telles que des échafaudages ou des bâtiments élevés, tandis que d'autres sont embarqués sur des avions à voilure fixe. L'utilisation de ces plateformes aériennes est très courante, car elle permet d'acquérir des données et des images détaillées de la surface terrestre, à des endroits et des moments précis selon les besoins de l'étude.
2. Dans l'espace, la télédétection est assurée par des navettes spatiales ou principalement par des satellites. Un satellite est un objet en orbite autour d'un autre corps céleste, ici la Terre. À titre d'exemple, la Lune est un satellite naturel, contrairement aux satellites artificiels

utilisés pour la télédétection, les télécommunications ou encore la navigation et le positionnement. Grâce à leur orbite, ces plateformes spatiales offrent une couverture régulière et continue de la surface terrestre.

- La distance entre la cible observée et la plateforme est un paramètre essentiel, car elle influence à la fois l'étendue de la zone couverte et le niveau de détail obtenu. En général, plus la plateforme est éloignée, plus la surface observée est grande, mais moins les détails sont précis.
- La finesse des informations visibles sur une image dépend de la résolution spatiale du capteur, c'est-à-dire de sa capacité à distinguer les plus petits éléments au sol. Ainsi, la résolution spatiale correspond à la dimension du plus petit objet détectable par le capteur. Dans le cas des capteurs passifs, cette résolution dépend principalement de leurs caractéristiques techniques et de leur conception. (CCT, 2025)

9.Champ de vision instantanée (CVI).

Le CVI est défini comme étant le cône visible du capteur (A) et détermine l'aire de la surface "visible" à une altitude donnée et à un moment précis (B). La grandeur de cette aire est obtenue en multipliant le CVI par la distance de la surface au capteur (C). (saadi)

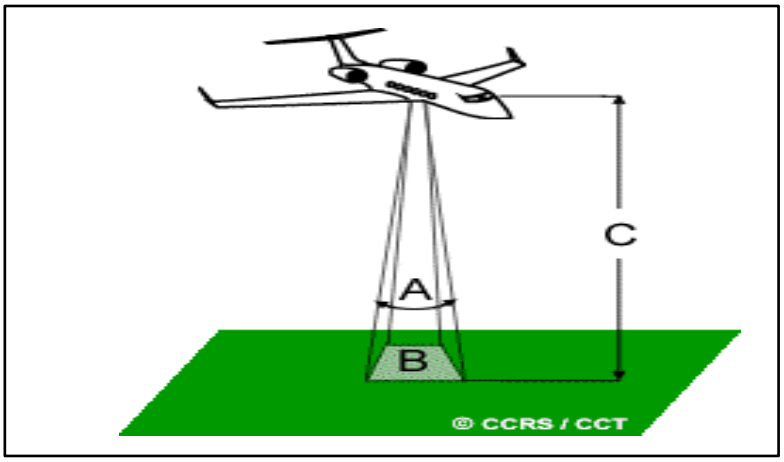


Figure 8 : Relation entre la résolution spatiale et le champ de vision instantané (CVI) en télédétection (CCT, 2025)

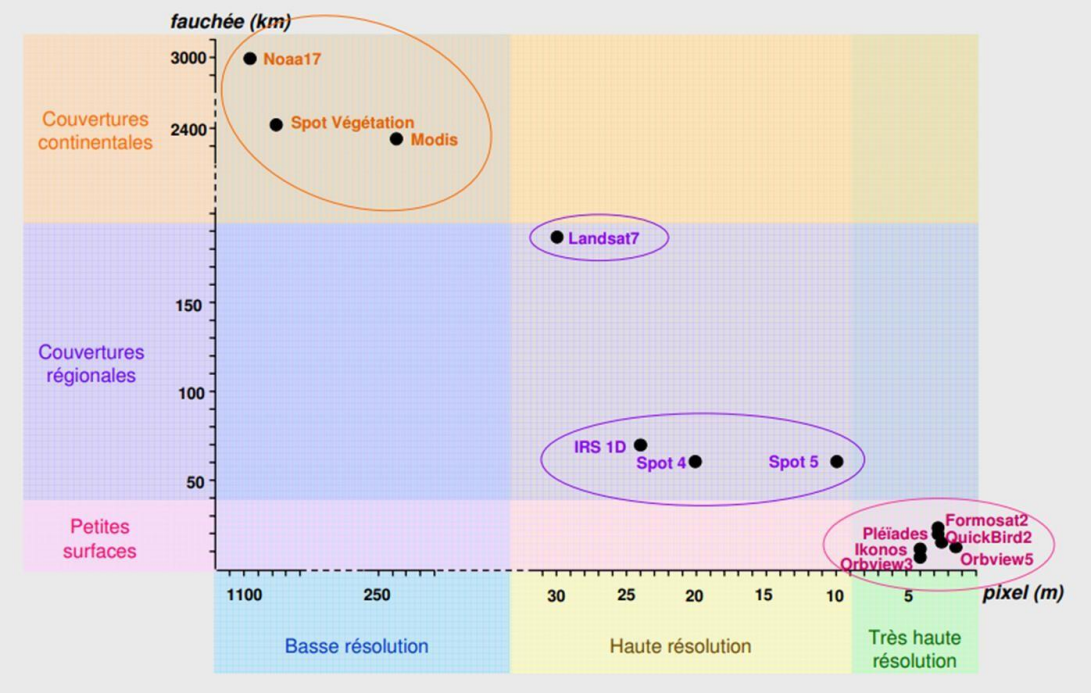


Figure 9 : Le choix du capteur

10. Images satellitaires :

Une image numérique est constituée d'une matrice de pixels. Le pixel représente la plus petite unité homogène d'une image, c'est-à-dire l'élément élémentaire contenant une information unique.

Ainsi, une image de 5 pixels de côté est organisée sous forme d'une grille composée de 5 lignes et 5 colonnes, soit un total de 25 pixels. (saadi)

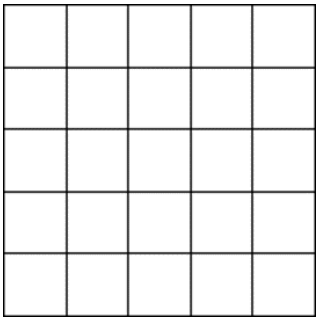


Figure 10 : matrice de pixels

Chaque pixel possède une valeur radiométrique qui correspond à la moyenne des mesures du rayonnement enregistré sur la surface qu'il représente au sol. Il existe donc une relation directe entre le pixel en tant qu'unité géométrique (le contenant) et l'information qu'il porte, c'est-à-dire sa valeur radiométrique (le contenu). (saadi)

12	104	54	75	1
87	201	153	89	12
23	57	49	33	47
205	198	157	53	39
28	14	7	5	1

Figure 11 : Valeur radiométrique

Les valeurs radiométriques les plus élevées sont représentées en blanc, tandis que les plus faibles sont représentées en noir, ce qui permet de créer une image en niveaux de gris. Chaque pixel est ainsi codé en fonction de sa valeur radiométrique, formant progressivement l'image finale.

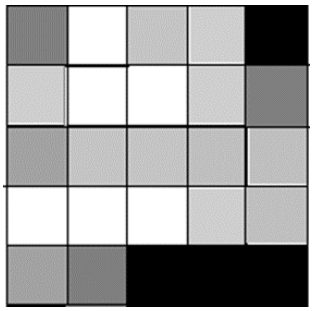


Figure 12 : Visualisation des valeurs radiométriques

Dans une échelle allant de 0 à 255, la valeur 0 correspond à une absence de réflexion (0 %), donc à la couleur noire, tandis que la valeur 255 correspond à une réflexion maximale (100 %), représentée par le blanc. (saadi)

Ces matrices de valeurs radiométriques peuvent être visualisées :

- En matrices de gris
- En compositions colorées (par une combinaison de plusieurs bandes)

Une image satellitaire est caractérisée par (saadi) :

- Sa résolution spatiale,
- Sa résolution temporelle ou répétitivité
- Sa résolution spectrale,
- Sa résolution radiométrique
- Sa résolution numérique

11. Les différentes résolutions des images satellitaires :

Type de résolution	Définition
Résolution spatiale	Correspond à la taille du pixel de l'image satellitaire.
Résolution spectrale	Correspond au nombre et à la largeur des bandes spectrales enregistrées par le satellite.
Résolution radiométrique	Représente la capacité du capteur à détecter les variations d'énergie réfléchie.
Résolution temporelle	Correspond à la fréquence de passage du satellite sur une même zone.

Représentation des données

Les données multi spectrales peuvent être représentées de deux grandes manières :



Figure 13 : Représentation par Image

Espace image

La façon peut-être la plus « naturelle » de représenter un jeu de données multi spectrales est de l'afficher sous la forme d'une image, et d'impliquer ainsi directement le système visuel de l'observateur. (PFE hachaychi, 2025)

Espace spectral

Par le biais des approches multi spectrales il est potentiellement possible d'exploiter les variations de réponse observées en fonction de la longueur d'onde pour extraire des informations de type signature spectrale. (PFE hachaychi, 2025)

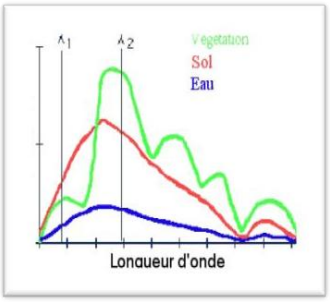


Figure 14 : Représentation par signature spectrale

1. Visualisation des images :

Les canaux bruts :

- Dans le visible, la quasi-totalité des valeurs numériques se trouvent entre 0 à 80, sur une échelle qui va de 0 à 255.

- La valeur 0 (codée en noir) signifie que le satellite n'a aucune réponse,

- La valeur 255 (codée en blanc) signifie au contraire que la totalité du REM est renvoyée par la cible.

Exemple :

- Les canaux bruts des glaciers, des surfaces enneigées et des sols nus très minéralisés sont très sombres, parfois quasiment noirs.

Les images sont des extraits des trois canaux bruts d'une image ALSAT 2 A d'une résolution de 10 m. Ces canaux sont dans l'ordre : le vert, le rouge et le proche infrarouge. (PFE hachaychi, 2025)

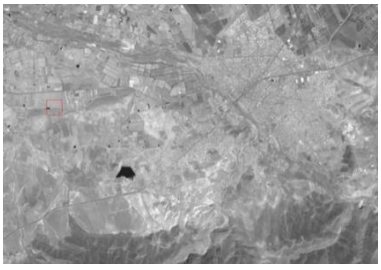


Figure 15 : canal proche infrarouge



Figure 16 : canal rouge

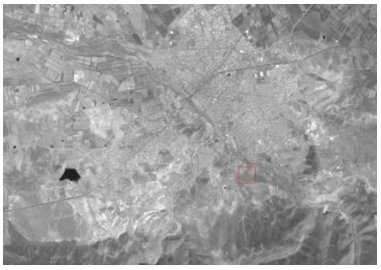


Figure 17 : canal vert

Le codage RVB :

C'est le modèle idéal pour expliquer la synthèse additive des couleurs puisqu'il consiste à représenter l'espace des couleurs à partir des trois couleurs primaires :

- le rouge (R)
- le vert (V)
- le bleu (B)

Addition de la lumière des trois couleurs primaires additives : rouge, vert et bleu.

Chaque couleur est une combinaison singulière des trois couleurs primaires

Blanc addition des trois couleurs primaires à intensité maximale. (PFE hachaychi, 2025)

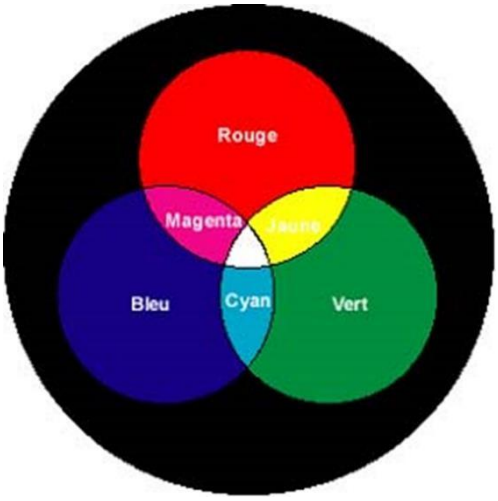


Figure 18 : Le codage RVB

1. Les types de composition

Tableau 1 : Les types de composition (CCT, 2025)

(R,V,B)	Couleur naturelle
(PIR,R,B)	Combinaison standards : la végétation est en rouge
(PIR,MIR1,R)	Limite entre terre / eau, pour l'étude des sols et de la végétation
(MIR2,PIR,V)	Utilisée pour la géologie, le sable, le sol et les minéraux montrent de multiples couleurs, spécifique pour les régions désertiques
(MIR2,MIR1,R)	Utilisée pour la géologie, le sable, le sol et les minéraux montrent de multiples couleurs
(MIR1,PIR,B)	Utilisée pour l'agronomie, la végétation est en vert
(MIR2,MIR1,PIR)	Utile pour la géologie, la végétation est en bleu
(MIR,R, B)	Utile pour la géologie, les roches ont de multiple couleur
(MIR1,PIR,R)	Santé de la végétation
(B,R,MIR1)	Réalisation d'une spatio carte géologique et d'une carte de fracturation
(MIR2,MIR1,V)	Distinction entre le sol sec et des surfaces rocheuses

10- Traitement d'images :

Le traitement d'image recouvre l'ensemble des techniques consistant à modifier une image dont le but est de faciliter son interprétation ou d'extraire des informations d'ordre quantitatif : exemple occupation du sol, On appelle fonctions de **pré-traitement** les opérations qui sont normalement requises avant l'analyse principale et l'extraction de l'information. Les opérations de pré-traitement se divisent en **corrections radiométriques** et en **corrections géométriques.** (CCT, 2025)

- **Corrections radiométriques et atmosphériques :** elles réduisent les déformations dues aux : Capteur, au mode de transmission des données, à l'atmosphère, à l'angle de visée et l'angle solaire. (CCT, 2025)

- **Corrections géométriques**: elles réduisent les déformations systématiques dues à : l'effet de la rotation de la terre, les effets de la variation dans la vitesse, l'altitude du satellite et la variation du sol (saadi)

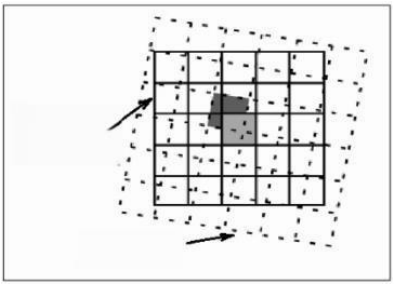


Figure 19 : Corrections géométriques

Géoréférencement : C'est le processus de mise en correspondance de l'image avec un système de référence géographique connu pour la placer dans le bon contexte géographique et l'aligner avec d'autres données géospatiales. Ce système peut être un système de coordonnées géographiques, tel que le système de coordonnées géographiques mondial (WGS 84), ou un système de projection cartographique, tel que l'UTM (Universal Transverse Mercator) (saadi)

1. Mosaïque des images satellites :

Lorsque l'étendue de la zone à cartographier dépasse le champ d'une photographie aérienne ou d'une image de télédétection, il est nécessaire de recourir à l'élaboration d'une mosaïque. Une mosaïque correspond à l'assemblage d'images ou de parties d'images contiguës et prétraitées pour être raccordables géométriquement et radio métriquement.

Dans la plupart des cas, les images de télédétection voisines, tout comme les photographies aériennes, présentent entre elles des chevauchements ou bandes de recouvrement, de sorte que l'assemblage conduisant à la mosaïque s'effectue par superpositions partielles des images (saadi)

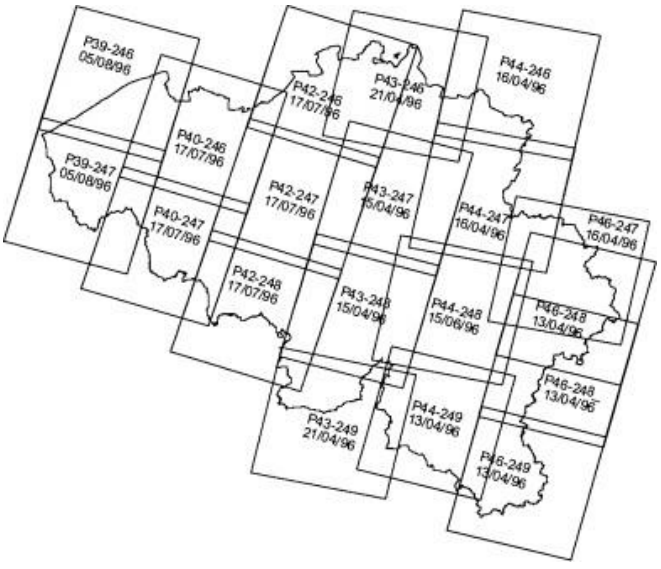


Figure 20 : Couverture de la Belgique par une mosaïque de scènes SPOT corrigées géométriquement (saadi)

11- CLASSIFICATION DE L'IMAGE :

Les méthodes de classification les plus communes peuvent être séparées en deux grandes catégories : les méthodes de classification supervisée et les méthodes de classification non supervisée. (CCT, 2025)

1. La classification supervisée :

La classification supervisée consiste à sélectionner des échantillons représentatifs des différentes classes d'occupation du sol à partir de l'image. L'analyste utilise ses connaissances du terrain pour définir ces classes. Les signatures spectrales obtenues sont ensuite utilisées par l'ordinateur afin de classer automatiquement les pixels selon leurs similitudes. (CCT, 2025)

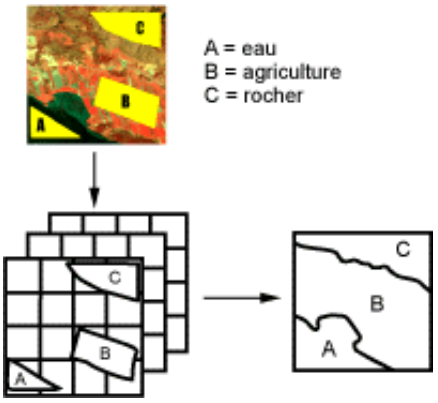


Figure 21: La classification supervisée

2. La classification non supervisée :

La classification non supervisée fonctionne de manière inverse à la classification supervisée. Les classes spectrales sont créées automatiquement par l'ordinateur à partir des caractéristiques numériques des pixels, sans définition préalable des classes par l'analyste. Ensuite, ces groupes sont interprétés et associés aux différentes classes d'occupation du sol. Cette méthode repose sur des algorithmes qui regroupent les pixels selon leurs similitudes spectrales. (CCT, 2025)

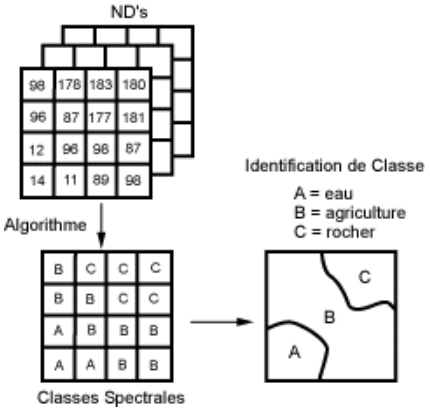


Figure 22 : la classification non supervisée

12- Les indices de télédétection :

En télédétection, les indices sont des transformations multispectrales permettant de convertir les données satellitaires en informations interprétables sur l'environnement. Ils servent à caractériser différents phénomènes, notamment l'état et la dynamique de la végétation. Les indices de végétation sont largement utilisés pour évaluer des paramètres biophysiques comme la biomasse ou la vigueur du couvert végétal. (saadi)

1. Principaux indices de télédétection :

1. Indice Végétation : NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

Utilité : Le NDVI permet de détecter et de suivre la présence et la densité de la végétation, ainsi que son niveau d'activité chlorophyllienne.
Interprétation :

- Valeurs négatives : Eau, bâti, neige
- 0 à 0,3 : Végétation faible ou sol nu
- 0,3 à 0,6 : Végétation modérée à bonne
- >0,6 : Végétation dense et vigoureuse

Applications : Le NDVI est principalement utilisé pour la cartographie de la végétation et le suivi de sa dynamique saisonnière, notamment pour identifier le début de croissance et le pic de développement végétatif. Il ne permet pas, à lui seul, d'identifier un stress hydrique ou une maladie. (Applisat, 2024)

2. **Indice Eau : NDWI (Normalized Difference Water Index)**
   Utilité : Le NDWI identifie les zones en eau.

Applications : Cartographie des plans d'eau, suivi des lacs et rivières, détection des inondations, délimitation des zones humides (Applisat, 2024)

3. **Indice Humidité : NDMI (Normalized Difference Moisture Index)**
   Utilité : Le NDMI mesure l'humidité du feuillage et des sols. Particulièrement utile pour détecter le stress hydrique avant que les symptômes visibles n'apparaissent. Applications : Suivi du bilan hydrique, alerte précoce de sécheresse, gestion de l'irrigation, zones sujettes aux incendies (Applisat, 2024).
4. **Indice Neige NDSI (Normalized Difference Snow Index)**

Utilité : Le NDSI détecte et quantifie les surfaces enneigées. Cet indice permet de faire la distinction entre la neige et les nuages et la neige et d'autres couvertures du sol. Attention cet indice peut en revanche confondre neige et eau.

Applications : Surveillance des cycles neigeux, changement climatique. (Applisat, 2024)

5. **Indice Bâti NDBI (Normalized Difference Built-up Index)**

Utilité : Le NDBI identifie et quantifie les surfaces bâties et les zones urbanisées. L'indice décrit la densité de construction d'une zone géographique.
Interprétation :

- Valeurs négatives : Végétation
- Valeurs positives : Surfaces bâties et minérales

Applications : Cartographie urbaine, suivi de l'étalement urbain, aménagement du territoire. (Applisat, 2024)

6. Indice Surface brûlée NBR (Normalized Burn Ratio)

Utilité : Le NBR identifie les zones brûlées et fournit une mesure de la gravité des incendies. La végétation saine présente une forte réflectance dans le NIR et une faible réflectance dans le SWIR, à l'inverse de la végétation brûlée.
Applications : Détection des incendies de forêt en cours, cartographie des périmètres brûlés, surveillance de la reprise de la végétation post-incendie. (Applisat, 2024)

13- La validation des résultats

La validation des résultats constitue une étape essentielle dans tout processus de classification des données géospatiales. Elle permet d'évaluer la fiabilité des résultats obtenus en les comparant à des données de référence considérées comme représentatives de la réalité du terrain. Cette étape vise à mesurer le degré de concordance entre les résultats de la classification et les observations réelles, afin de juger de la performance et de la qualité du modèle utilisé. Elle repose généralement sur des méthodes statistiques permettant de quantifier les erreurs et d'apprécier la précision globale des résultats.

1. Le coefficient Kappa

Le coefficient Kappa, souvent noté κ (kappa), est une mesure statistique utilisée pour évaluer le niveau d'accord entre deux ou plusieurs évaluateurs. Il est particulièrement utile dans les situations où des données catégorielles sont impliquées, car il permet de quantifier dans quelle mesure l'accord observé dépasse ce à quoi on pourrait s'attendre par le seul hasard. Le coefficient Kappa varie de -1 à 1, où 1 indique un accord parfait, 0 indique aucun accord au-delà du hasard et des valeurs négatives suggèrent un accord inférieur à celui attendu par le hasard. (statistique, 2024)

Comprendre le calcul du coefficient Kappa

Le calcul du coefficient Kappa consiste à comparer l'accord observé entre les évaluateurs à l'accord attendu si les évaluateurs effectuaient leurs évaluations de manière aléatoire. La formule de calcul de Kappa est donnée par : $\kappa = (P_o - P_e) / (1 - P_e)$, où P_o est l'accord observé et P_e est l'accord attendu. Cette formule permet aux chercheurs de quantifier le degré d'accord tout en tenant compte de la possibilité que le hasard influence les résultats. (statistique, 2024)

14- Conclusion:

En conclusion de ce chapitre théorique, les principaux concepts liés à la télédétection ont été abordés, notamment sa définition, ses principes et ses étapes de traitement, ainsi que les différentes techniques et sources de données utilisées dans ce domaine. Le rôle essentiel de cette technologie dans l'étude des phénomènes géographiques et le suivi des transformations spatiales a également été mis en évidence, particulièrement dans le contexte de l'expansion urbaine.

Ainsi, ce cadre théorique constitue une base fondamentale pour la compréhension des autres parties de l'étude. Il permettra de passer à l'analyse du phénomène d'expansion urbaine, puis à la présentation de la zone d'étude, avant d'aborder la phase pratique consacrée au traitement des données et à l'évaluation des résultats obtenus sur le terrain.

Chapitre2 : Notion sur l'expansion urbaine et présentation de la zone d'étude

II. Introduction

L’étalement urbain est un phénomène spatial lié à la croissance et à l’évolution des villes au fil du temps. Il se manifeste par l’extension progressive des zones urbanisées vers les périphéries, entraînant ainsi des transformations dans l’occupation et l’utilisation des sols.

Ces dernières années, ce phénomène s’est intensifié sous l’effet de la croissance démographique, de l’urbanisation rapide ainsi que de la demande croissante en logements et en infrastructures, comme c’est le cas de la ville de Khemis Miliana. Cette dynamique a engendré des changements importants dans l’organisation des espaces urbains et ruraux.

Dans ce chapitre, nous présenterons les principaux concepts liés à l’étalement urbain à travers des définitions simples et synthétiques, afin de mieux comprendre ce phénomène. La ville de Khemis Miliana sera abordée plus en détail dans la partie consacrée à la présentation de la zone d’étude.

1) L'expansion urbaine

1. Définition :

L'expansion urbaine est un phénomène complexe qui influence considérablement l'aménagement urbain et la densité de population. Ce concept désigne l'expansion continue des zones urbaines. L'étalement urbain est le processus par lequel les villes s'étendent au-delà de leurs limites traditionnelles, les zones urbaines s'étendant au détriment des terres environnantes. Cette expansion se caractérise par plusieurs éléments clés (urbain e. , s.d.):

- Croissance continue de la zone urbaine
- Augmentation de la densité de population
- Empiètement sur les zones agricoles environnantes (urbain e. , s.d.)

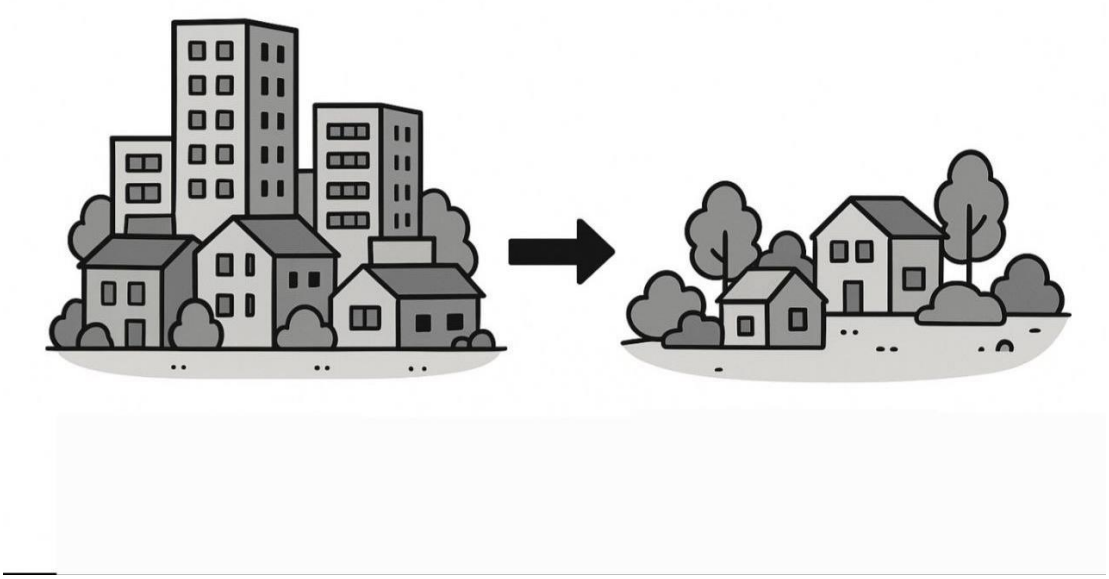


Figure 23 :Le concept d'expansion urbaine

2. Causes de l’expansion urbaine

L’expansion urbaine est un phénomène complexe qui résulte de plusieurs facteurs interconnectés. La croissance démographique joue un rôle central dans ce processus, car l’augmentation de la population entraîne directement une hausse de la demande en logements.

La migration des zones rurales vers les villes constitue une autre cause majeure de l’expansion urbaine. En effet, de nombreux habitants préfèrent s’installer en milieu urbain afin d’améliorer leur niveau de vie, ce qui exerce une pression supplémentaire sur l’espace résidentiel.

Les statistiques montrent que la part de la population mondiale vivant en milieu urbain est passée de 30 % en 1950 à 57 % en 2021.

3. Types d'expansion urbaine

a) L’expansion interne

L’expansion interne se manifeste par la densification des constructions à l’intérieur de la ville. Elle se fait au détriment des vides urbains, des poches non bâties et des espaces libres, soit par leur réutilisation, soit par la surélévation des bâtiments (construction en hauteur). Ce phénomène s’explique principalement par la rareté et la forte pression sur le foncier urbain. (urbain c. d., s.d.)

b) L’expansion externe

L’expansion externe correspond à l’extension spatiale de la ville vers l’extérieur ; elle est également appelée étalement urbain horizontal. Ce phénomène se manifeste sous plusieurs formes (Urbane, s.d.) :

c) • L’extension urbaine (étalement)

Elle correspond à l’extension des constructions au-delà du noyau urbain ancien, entraînant une croissance horizontale de l’espace urbain. Cette extension peut suivre différents modèles d’organisation spatiale, notamment radial, linéaire ou en damier, souvent influencés par le réseau de transport.

d) • Les villes satellites

Les villes satellites sont des extensions urbaines situées à proximité de la ville principale. Elles entretiennent des relations fonctionnelles avec celle-ci, notamment en matière d’emploi, de services et d’activités économiques, tout en contribuant à réduire la pression exercée sur le centre urbain principal.

e) Les villes nouvelles

Les villes nouvelles sont des agglomérations planifiées et autonomes, implantées à une certaine distance des grandes villes. Elles disposent généralement d’une base fonctionnelle complète comprenant des logements, des services, des équipements et des zones d’emploi, afin d’assurer une relative autonomie des habitants.

f) Les nouveaux ensembles résidentiels

Ce sont des zones à forte croissance démographique et à vocation résidentielle et économique. Elles constituent une alternative aux habitats informels et tendent progressivement vers l'autosuffisance en matière d'emplois et de services.

Après avoir exposé le cadre théorique du concept d'expansion urbaine, il convient de relier ces concepts à la zone géographique étudiée. À cet égard, la ville de Khemis Miliana, compte tenu de ses transformations urbaines rapides, constitue un modèle pertinent pour analyser la dynamique de l'expansion urbaine.

2) Présentation de la zone d'étude

1 Situation géographique

La ville de Khemis Miliana est située au nord de l'Algérie, dans la wilaya d'Aïn Defla, aux coordonnées approximatives 36,261° N et 2,220° E, au pied du massif du Zaccar, avec une altitude moyenne comprise entre 282 et 377 mètres. Elle bénéficie d'une position géographique stratégique importante, se trouvant à environ 120 km à l'ouest de la capitale Alger, et constituant un point de passage et de liaison entre plusieurs villes grâce au passage de la Route Nationale n°4 et de l'autoroute Est-Ouest, ainsi que de futurs projets autoroutiers reliant la région à Berrouaghia et Bordj Bou Arreridj. (wikiland, s.d.)

Khemis Miliana connaît une activité économique importante qui contribue à renforcer son attractivité démographique et son expansion urbaine continue. Sa position géographique favorable facilite les échanges et les interactions avec les régions voisines, ce qui explique la dynamique urbaine accélérée qu'elle connaît. Par ailleurs, la ville possède une dimension historique et culturelle, ayant été connue dans le passé pour son rôle religieux en tant que siège épiscopal dans l'ancienne "Malliana". (wikiland, s.d.)

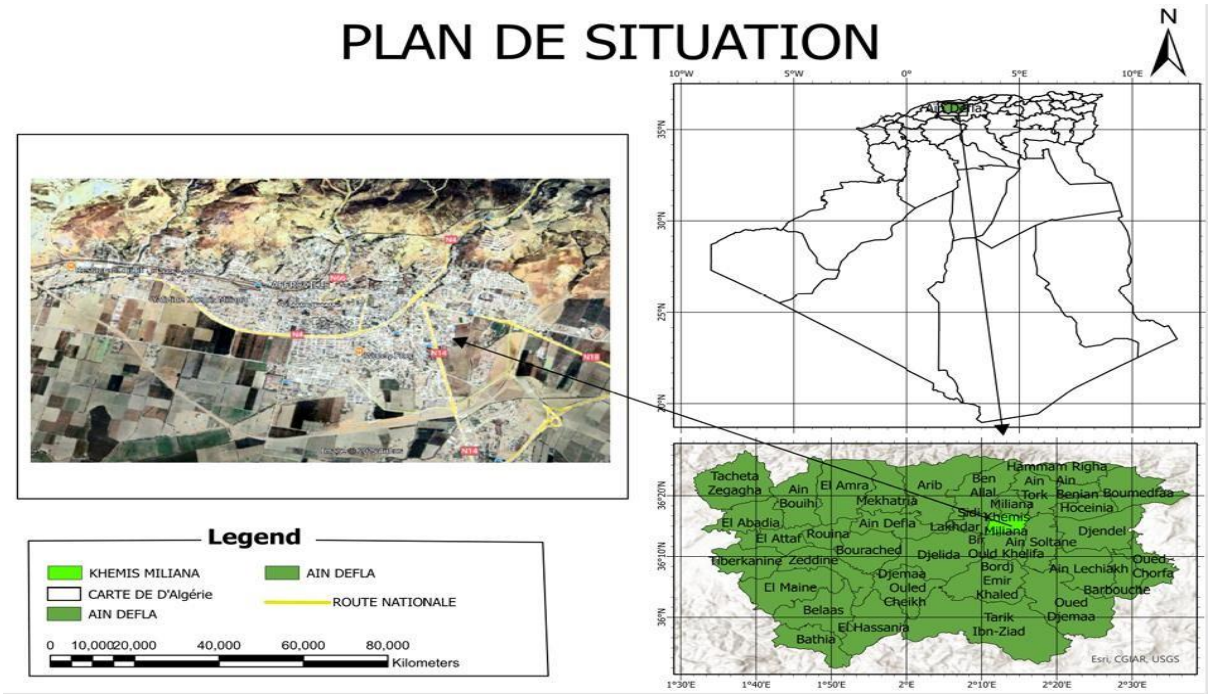


Figure 24 : plan de situation de khemis Miliana

2 Relief et topographie

La région présente un relief varié caractérisé par des plaines agricoles et des zones montagneuses appartenant à l'Atlas tellien. L'altitude de la ville varie entre 275 m et 400 m au-dessus du niveau de la mer. Le massif du Zaccar constitue l'élément topographique dominant de la région, tandis que la vallée du Chélif occupe les parties basses. Cette diversité du relief influence fortement l'occupation du sol et l'extension urbaine de la ville.

3 Climat

Khemis Miliana bénéficie d'un climat méditerranéen caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers frais et humides. Les températures estivales peuvent dépasser 35 °C, tandis que les précipitations annuelles varient entre 500 et 900 mm selon les années. La présence de l'oued Chélif et des espaces végétalisés contribue à maintenir une certaine fraîcheur dans la région.

3) Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les concepts clés liés à l'expansion urbaine, ainsi que les caractéristiques générales de la zone d'étude de Khemis Miliana. L'analyse de la situation géographique, de la topographie et du climat de cette zone met en évidence un développement spatial important.

Cette présentation constitue un fondement essentiel pour la compréhension des transformations urbaines observées dans la région. Le chapitre suivant sera consacré à la méthodologie adoptée, notamment les données utilisées, les techniques de télédétection et les méthodes de traitement et d'analyse appliquées à l'étude des changements d'occupation du sol et de l'expansion urbaine à Khemis Miliana

Chapitre 3: Données et méthodologie

III. Introduction:

Dans ce chapitre, nous présentons l'ensemble des données et la méthodologie adoptée pour la réalisation de cette étude. Il constitue une étape essentielle, car il décrit le cadre technique et scientifique permettant d'analyser l'évolution de l'occupation du sol et l'expansion urbaine de la zone d'étude de Khemis Miliana.

Nous commencerons par la présentation des données utilisées, notamment les images satellitaires et les sources complémentaires nécessaires à l'analyse. Ensuite, nous détaillerons les différentes étapes de la méthodologie, incluant les traitements préliminaires, les techniques de télédétection appliquées ainsi que les méthodes de classification et de validation des résultats.

Ce chapitre permet ainsi de comprendre les outils et les approches adoptés afin d'assurer la fiabilité des résultats obtenus dans les chapitres suivants.

1- Matériel et données utilisées :

1 Logiciels et outils :

1. ArcGIS PRO :

ArcGIS Pro 3.4.2 Le logiciel **ArcGIS Pro 3.4.2** a été adopté comme outil principal pour la mise en œuvre de la partie appliquée de ce travail de recherche, en raison de ses capacités avancées en matière d'analyse spatiale, de gestion des données géographiques et de conception de cartes en deux et trois dimensions. (esri, s.d.)



Figure 25 : logo ArcGIS pro (esri, s.d.)

ArcGIS Pro représente la nouvelle génération des logiciels de systèmes d'information géographique (SIG), développée par la société **Esri**. Il se distingue par une interface utilisateur flexible, une prise en charge complète des données spatiales, ainsi qu'une intégration fluide avec les environnements cloud tels que **ArcGIS Online**. (esri, s.d.)

La version **3.4.2** constitue une mise à jour mineure de la version 3.4, comprenant plusieurs améliorations techniques au niveau des performances, ainsi que des corrections de bugs, ce qui a contribué à une meilleure stabilité du logiciel et à une efficacité accrue lors du traitement des projets géographiques. (esri, s.d.)

Principales fonctionnalités du logiciel exploitées dans ce travail :

- Création et gestion de bases de données géographiques (Geodatabases).
- Analyse spatiale des données à l'aide des outils de Geotraitement (Geoprocessing).
- Conception de cartes thématiques et explicatives avec une grande précision.
- Travail dans un environnement tridimensionnel (3D Scene) pour modéliser des représentations plus réalistes.
- Exportation des cartes et des résultats sous divers formats en vue de leur intégration dans le rapport final.
- ArcToolbox : classification supervisée, détection de changement, extraction de couches.
- Spatial Analyst / Image Analyst : calculs d'indices et traitement spectral.
- Figure 31. Logo Arcgis

2. Données spatiales (ArcGIS PRO) :

Tableau 2 : Données spatiales

Année	Satellite	La date	Type d'image	Résolution spatiale	Source
1990	LANDSAT 5	1990/02/21	Multispectrale	30m	https://www.usgs.gov/
2000		2000/03/20			
2010		2010/03/16			
2020	LANDSAT 8	2020/03/11			

3. Google Earth Engine :

Google Earth Engine est une plate-forme d'analyse géospatiale basée sur le cloud, qui permet aux utilisateurs de visualiser et d'analyser les images satellite de notre planète. Les scientifiques et les organismes à but non lucratif utilisent Google Earth Engine Pour la recherche en télédétection, la prédiction des épidémies, la gestion des ressources naturelles et d'autres activités. (Education, s.d.)

Les fonctionnalités de l'éditeur de code sont conçues pour simplifier et accélérer le développement de flux de travail Géospatiaux complexes. L'éditeur de code comprend les éléments suivants (illustrés dans la figure 31) :

Figure 26 : google earth engine

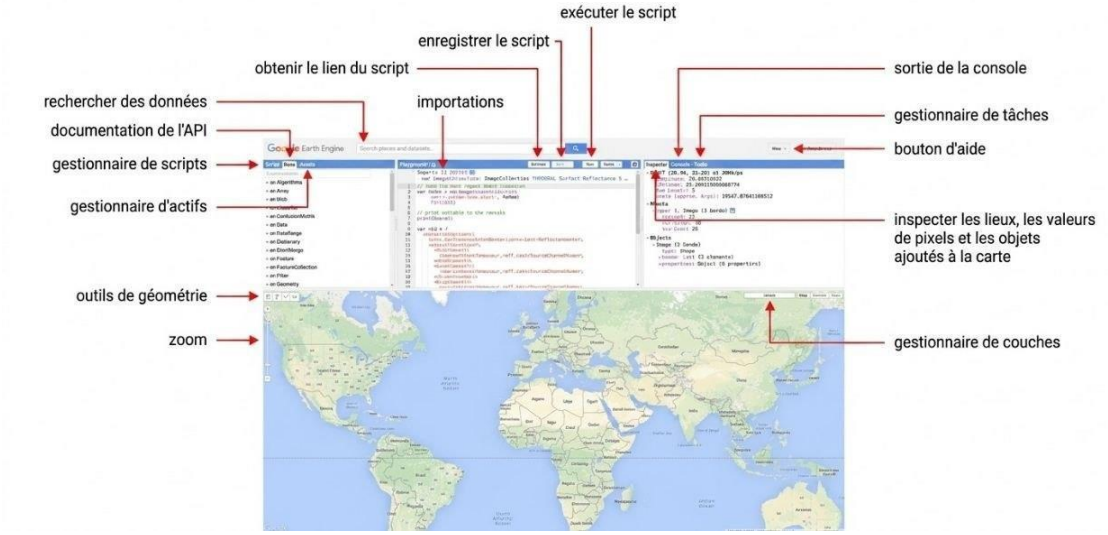


Figure 27 : les éléments de google earth engine (Education, s.d.)

2- Méthodologie de travail :

1 Prétraitement des images satellitaires :

Dans cette étude, une méthodologie basée sur la télédétection a été adoptée afin d'analyser l'évolution de l'occupation du sol ainsi que l'expansion urbaine dans la ville de Khemis Miliana.

L'imagerie satellitaire Landsat a été choisie en raison de sa disponibilité gratuite, de sa large couverture temporelle et de sa résolution spatiale adaptée à l'échelle de l'étude.

L'analyse repose principalement sur le calcul des indices spectraux NDVI et NDBI. L'indice NDVI permet d'évaluer la densité et l'état de la végétation, tandis que l'indice NDBI sert à identifier les zones urbanisées.

Par ailleurs, une classification de l'occupation du sol (LULC) a été réalisée afin d'identifier les différentes catégories d'occupation du sol, telles que les zones bâties, les espaces végétalisés et les sols nus, puis d'analyser leur évolution au cours du temps.

1. INDICES SPECTRAUX :

NDBI (normalized difference built-up index) : pour cartographier les zones urbanisées.

$$\mathbf{NDBI=(SWIR-NIR) / (SWIR+NIR)}$$

NDVI (normalized difference vegetation index) : pour analyser la couverture végétale.

$$\mathbf{NDVI=(NIR-RED) / (NIR+RED)}$$

2. Acquisition d'images satellitaires

Des images satellitaires de la zone d'étude (Khemis Miliana) ont été acquises à partir des données du satellite Landsat. Ces images récentes présentaient une résolution spatiale suffisante pour l'étude de l'occupation des sols et de l'expansion urbaine.

3. Composition des bandes spectrales

Après téléchargement des images, les bandes spectrales ont été combinées à l'aide d'ArcGIS Pro afin d'obtenir une image composite en couleurs RVB naturelles, organisée comme suit :

Rouge : Bande 4

Vert : Bande 3

Bleu : Bande 2

Ce processus a permis une meilleure représentation des éléments naturels et urbains, facilitant ainsi une interprétation visuelle de l'image.

4. Extraction de la zone d'étude (Masque d'extraction)

L'outil « Extraction par masque » a été utilisé afin d'extraire l'image satellitaire à l'intérieur des limites de Khemis Miliana, pour se concentrer uniquement sur la zone d'étude. Cette opération a permis de réduire la taille des données et d'augmenter la précision du traitement.

5. Calcul de l'indice de végétation (NDVI)

L'indice de végétation NDVI a été calculé à l'aide de l'outil intégré au logiciel permettant de distinguer les zones végétalisées des zones construites ou nues. Cet indicateur permet d'analyser facilement les changements spatiaux et d'occupation des sols.

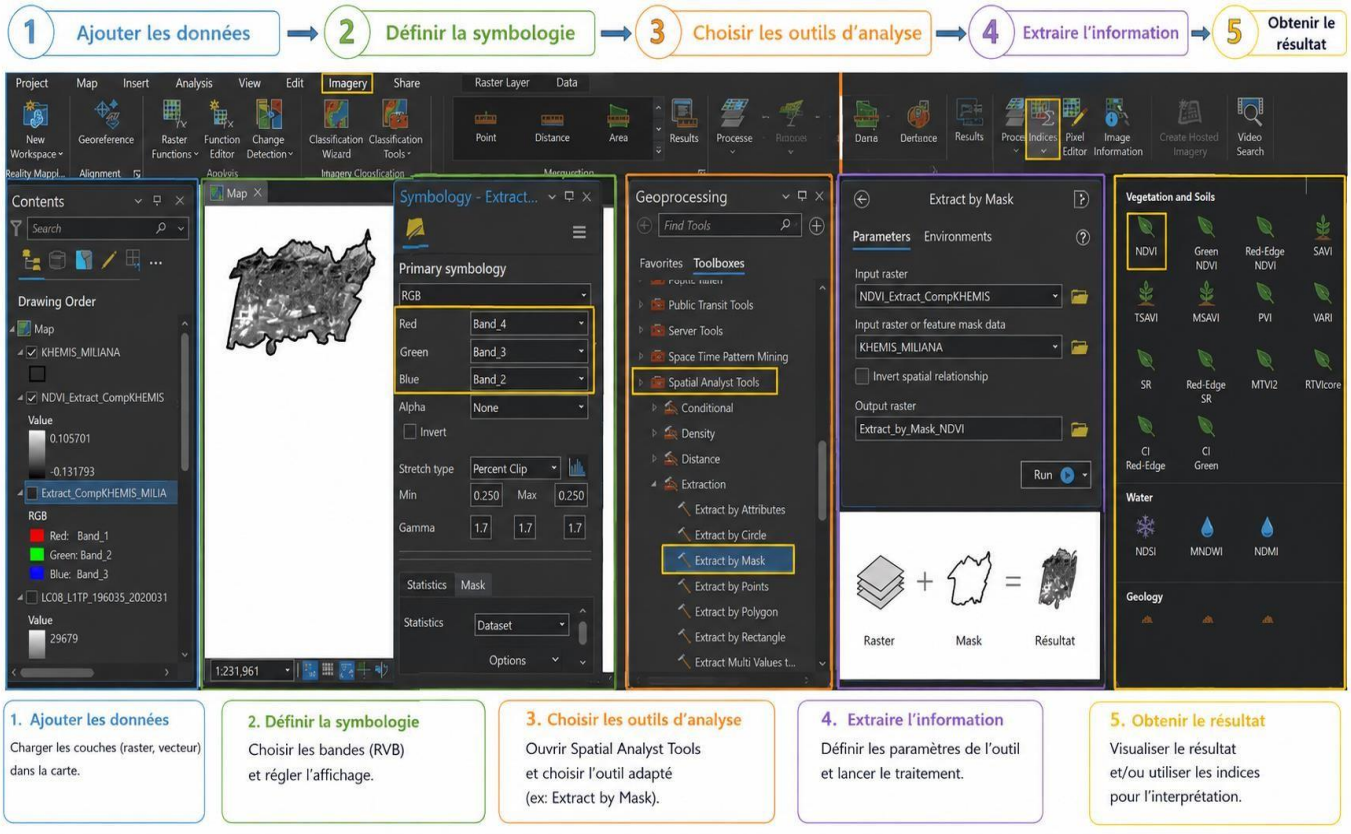


Figure 28 : Prétraitement des images satellitaires

En utilisant la même méthodologie que pour le calcul de l'indice NDVI, un second indice spectral, l'indice standardisé des zones bâties (NDBI), a été développé. Les mêmes étapes de traitement ont été appliquées, seuls le type d'indice et les bandes spectrales ayant été modifiés.

3- Classification de l'occupation du sol (LULC)

La classification de l'occupation du sol (LULC) a été réalisée à l'aide d'une méthode de classification supervisée basée sur l'algorithme du maximum de vraisemblance.

Cette méthode consiste à attribuer chaque pixel à une classe spécifique en fonction de ses caractéristiques spectrales. Les principales classes identifiées dans cette étude sont les zones bâties, la végétation et les sols nus.

L'indice NDVI a permis d'évaluer l'état et la dégradation du couvert végétal, tandis que l'indice NDBI a contribué à l'identification et au suivi de l'expansion urbaine. Les cartes d'occupation du sol ont ensuite permis de contextualiser ces résultats en les confirmant à travers des données quantitatives, notamment les superficies et les statistiques associées aux différentes classes.

Dans la première phase de cette étude, la plateforme Google Earth Engine a été utilisée afin d'accéder aux images satellitaires et de préparer les données nécessaires à l'analyse.

Un compte a été créé sur la plateforme, puis un script a été développé afin de sélectionner les images correspondant à la zone d'étude et aux périodes temporelles choisies.

Les limites de la ville de Khemis Miliana ont été importées sous forme de fichier Shapefile dans la section « Assets » afin de délimiter précisément la zone d'étude.

Les images satellitaires ont ensuite été filtrées selon les années sélectionnées et visualisées sur la carte à l'aide des outils d'aperçu de la plateforme.

Dans une phase ultérieure, plusieurs traitements ont été effectués, notamment :

- La préparation des compositions colorées,
- Le calcul des indices spectraux,
- Et la production des cartes thématiques.

Enfin, les résultats ont été exportés au format GeoTIFF vers Google Drive à l'aide de la commande Export. Image. toDrive, afin d'être exploités ultérieurement dans ArcGIS Pro, comme illustré dans la figure suivante.

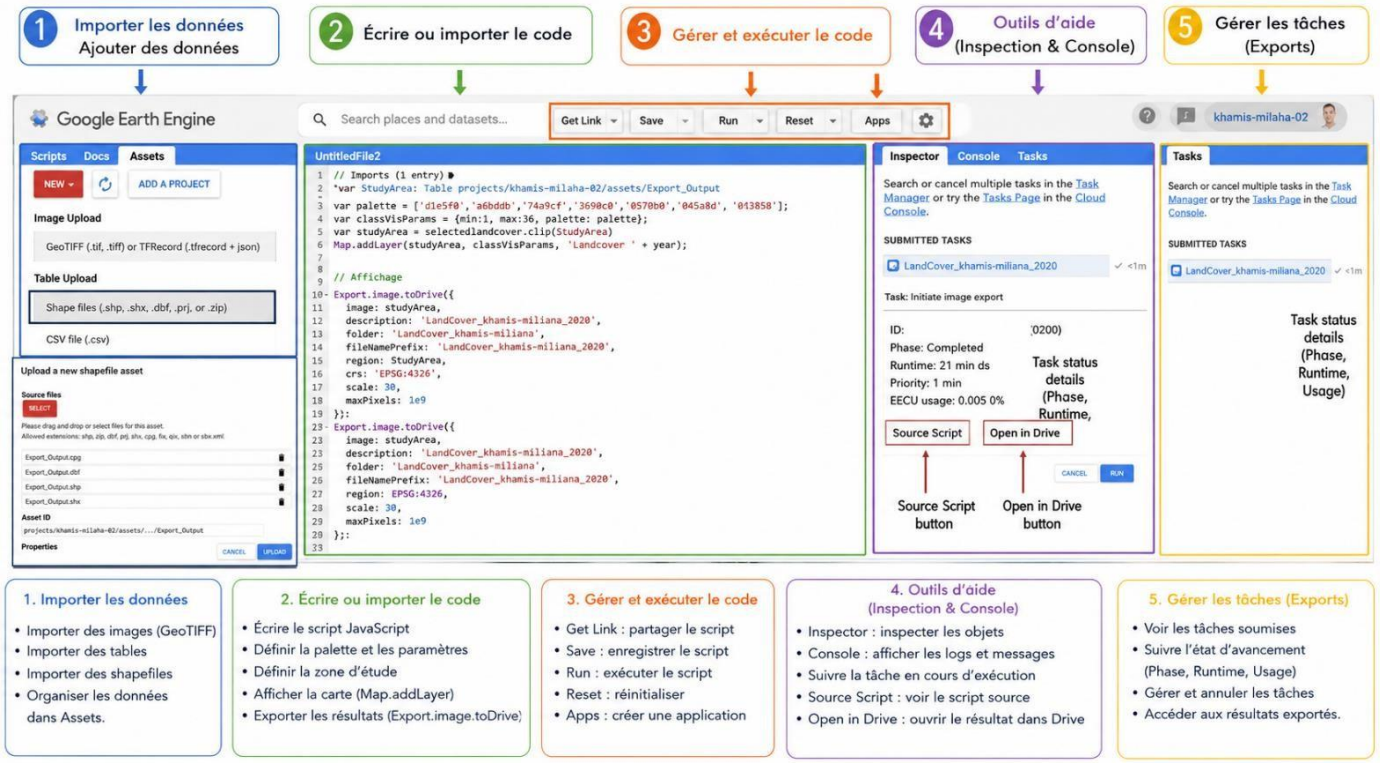


Figure 29 : Méthodologie de traitement des données via Google Earth Engine

Une fois le traitement terminé dans Google Earth (GEE), comme illustré dans la figure ci-dessus (qui présente l'interface du programme et les sections principales confirmant la fin de l'exportation), la phase d'intégration et d'analyse avancée commence dans ArcGIS Pro. La figure suivante détaille cette transition en présentant les étapes d'insertion, de préparation et d'analyse des cartes d'occupation et d'utilisation des sols (LULC) générées par Google Earth (GEE) pour la zone de Khamis Miliana.

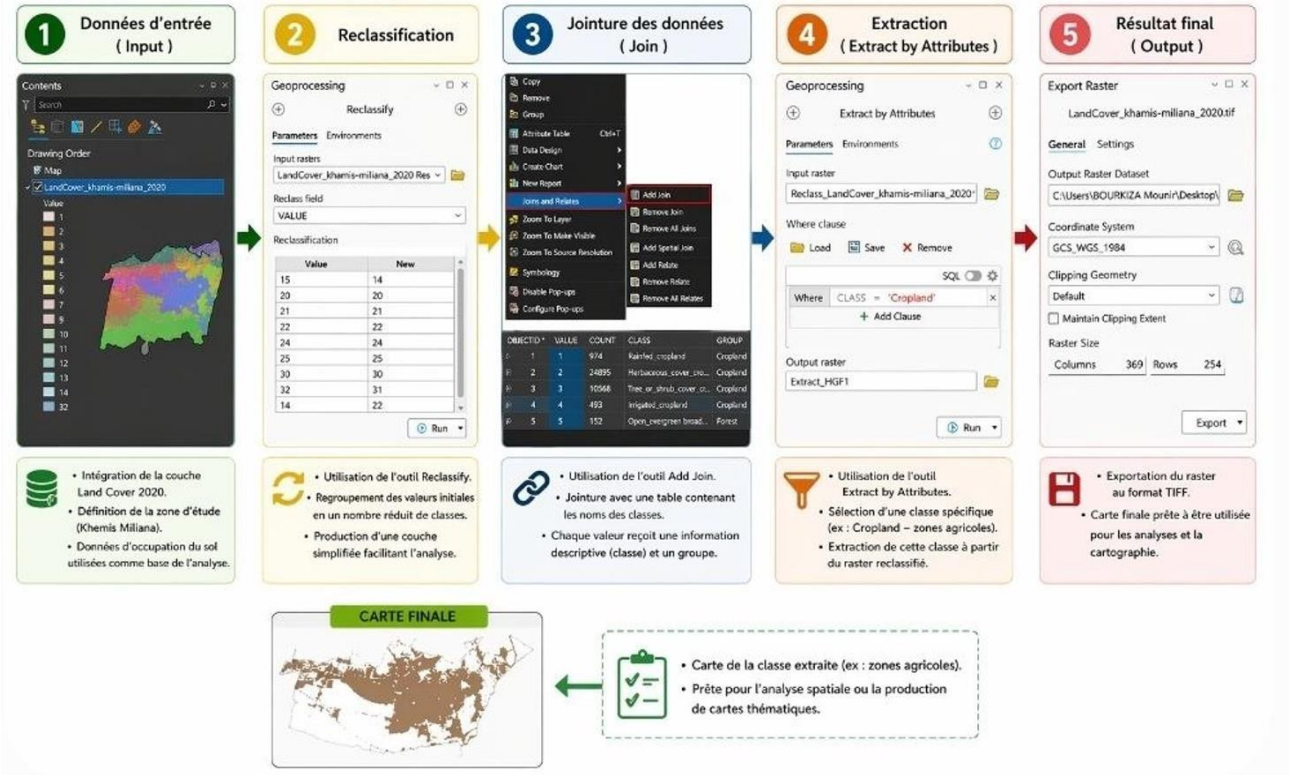


Figure 30 : étape de réalisation des cartes LULC

4- Validation des résultats

Afin d'évaluer la précision de la classification de l'occupation du sol, les résultats obtenus ont été validés à l'aide de la matrice de confusion dans ArcGIS Pro. Cette méthode consiste à comparer les classes obtenues lors de la classification avec des données de référence issues d'images à haute résolution ou d'observations de terrain.

Dans un premier temps, des points de contrôle ont été créés et répartis sur l'ensemble de la zone d'étude. Ensuite, les valeurs issues de la classification ont été extraites et associées à chaque point de contrôle. Les classes de référence ont par la suite été attribuées à partir des images à haute résolution et des observations disponibles.

Après le traitement des données, la matrice de confusion a été générée à l'aide de l'outil dédié. Cette matrice permet de quantifier les erreurs de classification et d'évaluer la performance du modèle à travers plusieurs indicateurs statistiques, notamment :

- La précision globale (Overall Accuracy),
- La précision par classe,
- Et le coefficient Kappa.

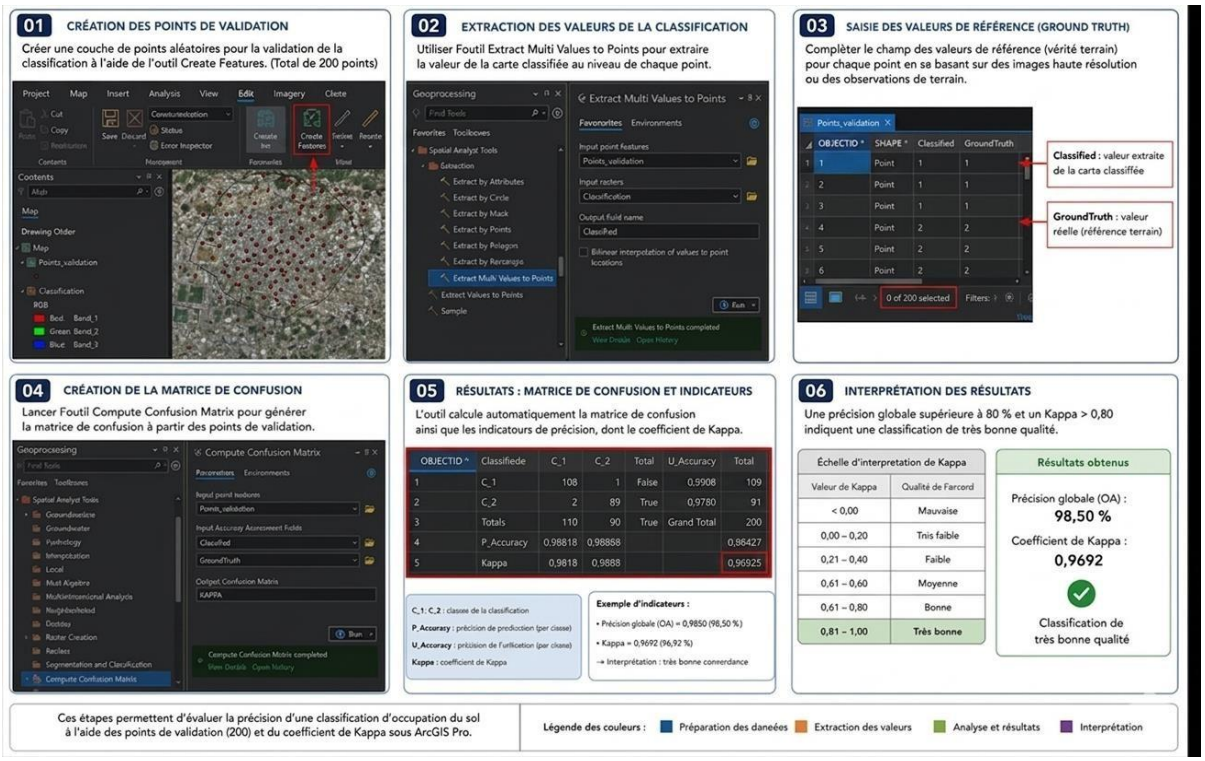


Figure 31: Étapes de calcul du coefficient de Kappa et matrice de confusion obtenues sous ArcGIS Pro

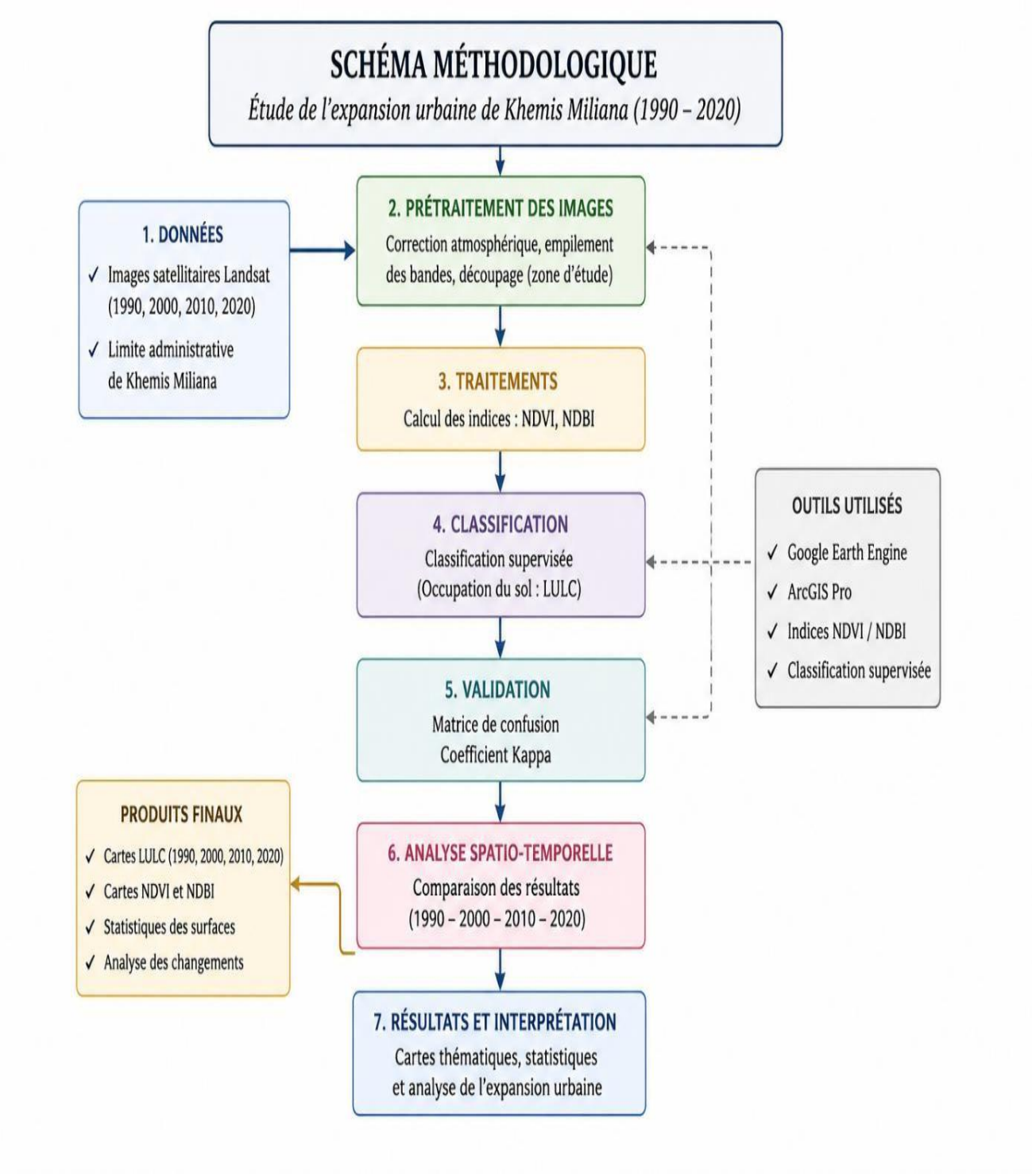


Figure 32 : Méthodologie générale de travail

5- Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'ensemble des données et de la méthodologie adoptée pour analyser l'évolution de l'occupation du sol ainsi que l'expansion urbaine de la ville de Khemis Miliana. Les images satellitaires Landsat, combinées aux techniques de télédétection et aux logiciels SIG tels que Google Earth Engine et ArcGIS Pro, ont permis de mettre en œuvre une démarche efficace de traitement et d'analyse des données spatiales.

Les différentes étapes méthodologiques, allant du prétraitement des images jusqu'à la classification supervisée et à la validation des résultats à l'aide de la matrice de confusion et du coefficient Kappa, ont contribué à assurer la fiabilité et la précision des résultats obtenus. L'utilisation des indices spectraux NDVI et NDBI a également facilité l'identification des changements liés au couvert végétal et aux zones urbanisées.

Ainsi, cette méthodologie constitue une base essentielle pour l'étude de la dynamique urbaine de la zone d'étude. Le chapitre suivant sera consacré à la présentation, à l'analyse et à l'interprétation des résultats obtenus à partir des traitements réalisés.

.

Chapitre 4 : Résultats et Discussion

I. Introduction:

L'expansion urbaine constitue aujourd'hui l'un des phénomènes les plus marquants de l'évolution des territoires, en raison de la croissance démographique et du développement des activités humaines. Cette dynamique entraîne des transformations importantes de l'occupation du sol, ce qui nécessite l'utilisation de méthodes modernes permettant de suivre et d'analyser ces changements avec précision.

Dans ce contexte, ce chapitre est consacré à la présentation et à l'analyse des résultats obtenus à partir du traitement des images satellitaires et de l'utilisation des techniques de télédétection pour l'étude de l'expansion urbaine dans Khemis Miliana. Les différentes cartes, indices spectraux et résultats statistiques seront interprétés afin de mettre en évidence l'évolution du tissu urbain et les principales transformations spatiales observées au cours des périodes étudiées.

1- Présentation des résultats cartographiques :

Dans cette partie, nous allons présenter les différentes cartes obtenues à partir des traitements effectués, notamment les cartes du NDVI, du NDBI ainsi que les cartes d'occupation du sol (LULC)

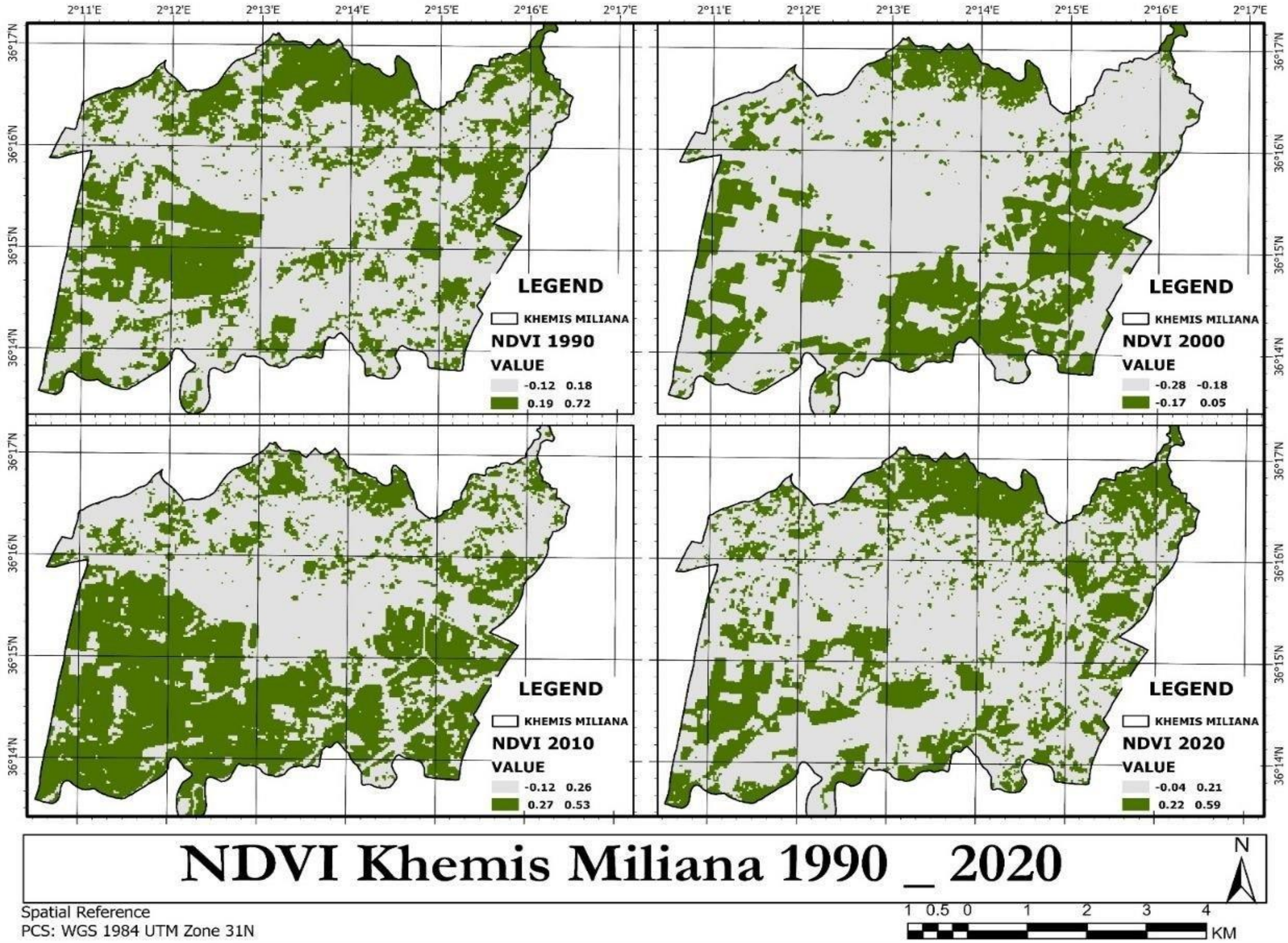


Figure 33 : Carte du NDVI de la ville de Khemis Miliana
-(Auteur)

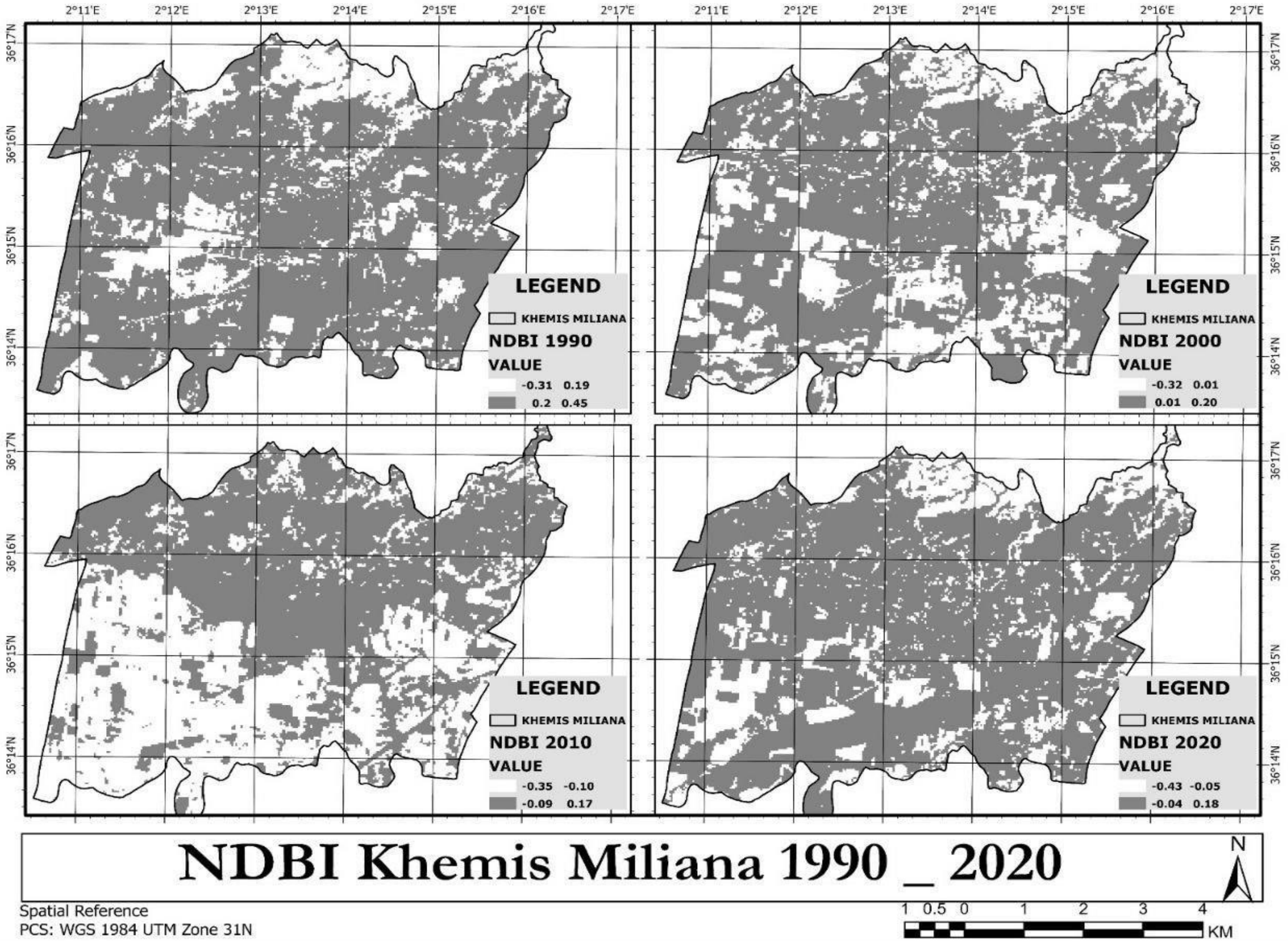


Figure 34 : Carte du NDBI de la ville de Khemis Miliana
-(Auteur)

Expansion de la zone urbaine de 1990 à 2020

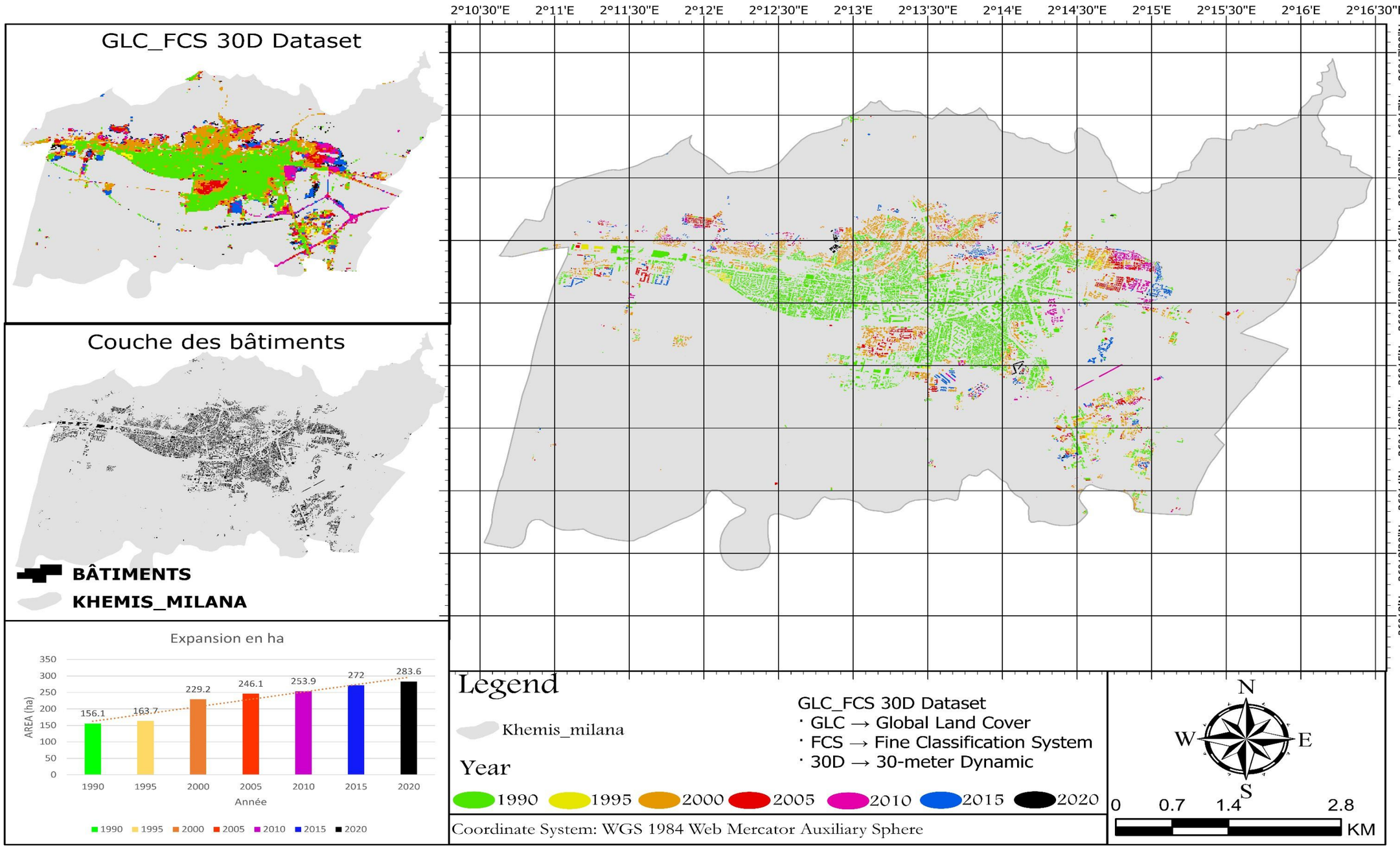


Figure 35 : Expansion urbaine de Khemis Miliana (1990-2020) -(Auteur)

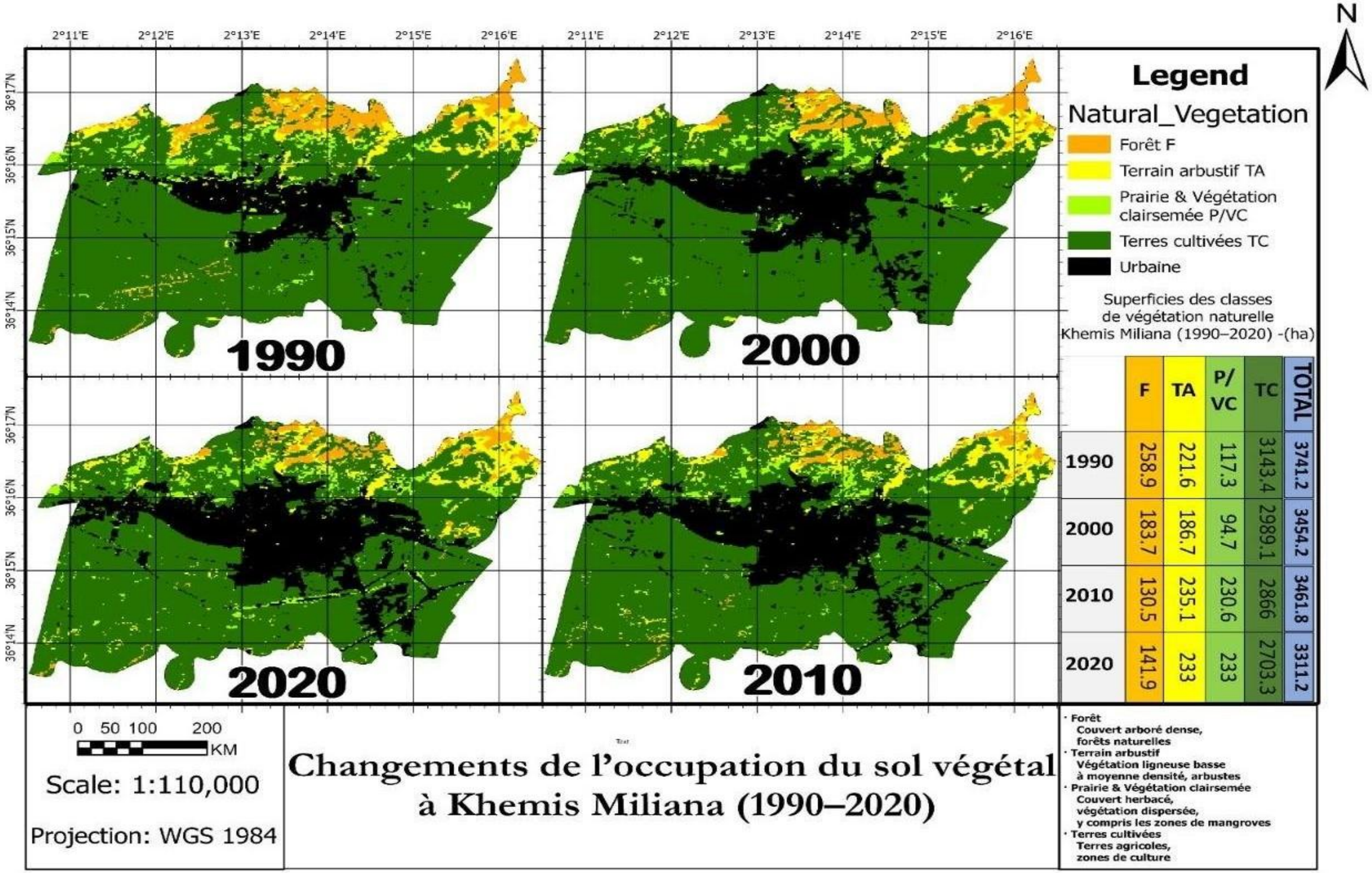


Figure 36 : Évolution du couvert végétal à Khemis Miliana (1990-2020) -(Auteur)

2- Analyse et interprétation des résultats :

Analyse du NDVI :

L'analyse des cartes NDVI de Khemis Miliana entre 1990 et 2020 montre une évolution du couvert végétal dans la région d'étude.

- En 1990, les valeurs du NDVI varient entre -0.12 et 0.72, indiquant une présence importante de la végétation.
- En 2000, les valeurs diminuent entre -0.28 et 0.05, traduisant une régression du couvert végétal et une augmentation des surfaces peu végétalisées.
- En 2010, les valeurs varient entre -0.12 et 0.53, montrant une amélioration et une extension des espaces végétalisés.
- En 2020, les valeurs du NDVI se situent entre -0.04 et 0.59, avec un couvert végétal encore présent mais plus fragmenté sous l'effet de l'urbanisation et des activités humaines.

Analyse du NDBI :

L'analyse des cartes NDBI de Khemis Miliana entre 1990 et 2020 montre une évolution progressive des surfaces bâties dans la région d'étude.

- En 1990, les valeurs du NDBI varient entre -0.31 et 0.45, indiquant une présence modérée des zones urbanisées concentrées principalement au centre de la commune.
- En 2000, les valeurs sont comprises entre -0.32 et 0.20, avec une extension progressive des surfaces bâties autour du noyau urbain.
- En 2010, les valeurs varient entre -0.35 et 0.10, traduisant un développement plus important du tissu urbain et une diminution des espaces non bâtis.
- En 2020, les valeurs du NDBI se situent entre -0.43 et 0.05, montrant une urbanisation plus étendue et plus dense vers les périphéries.

a) Comparaison NDVI / NDBI :

La comparaison entre les cartes NDVI et NDBI révèle une relation inverse entre les surfaces végétalisées et les zones bâties. En effet, l'augmentation des valeurs du NDBI dans certaines zones correspond souvent à une diminution des valeurs du NDVI, ce qui traduit la transformation progressive de certains espaces naturels ou agricoles en surfaces urbanisées.

2. Analyse de la carte de l'occupation du sol (LULC) :

D'après les données cartographiques relatives à la superficie d'expansion (en hectares), l'évolution de la croissance urbaine se divise en trois phases principales :

Phase 1 : Croissance modérée (1990-1995) :

Cette période a été marquée par une croissance initiale modeste, avec une superficie urbaine ajoutée d'environ 7,6 hectares (soit 0,08 km²). Cette croissance est représentée en vert sur la carte.

Phase 2 : Explosion urbaine (1995-2005) :

Cette période a connu une augmentation massive de la superficie urbaine ajoutée, atteignant 65,4 hectares, soit la plus forte progression du tableau (0,65 km²). Cette croissance est représentée en jaune sur la carte.

Période 2000-2005 : L'expansion s'est poursuivie à un rythme soutenu, quoique plus lent que lors de la période précédente, avec 16,9 hectares supplémentaires (0,17 km²). Cette croissance est représentée en orange.

Troisième phase : Ralentissement de la croissance (2005-2020) :

La période 2005-2010 a connu le plus faible taux d'expansion, la superficie ajoutée n'atteignant que 7,8 hectares, ce qui représente une période de relative stabilité sur le graphique. Cette expansion est représentée en rouge.

La période 2010-2015 a été marquée par une reprise de l'activité d'expansion, avec 18,2 hectares ajoutés. Cette expansion est représentée en bleu.

La période 2015-2020 a connu une croissance continue à un rythme de 11,5 hectares. Cette expansion est représentée en noir.

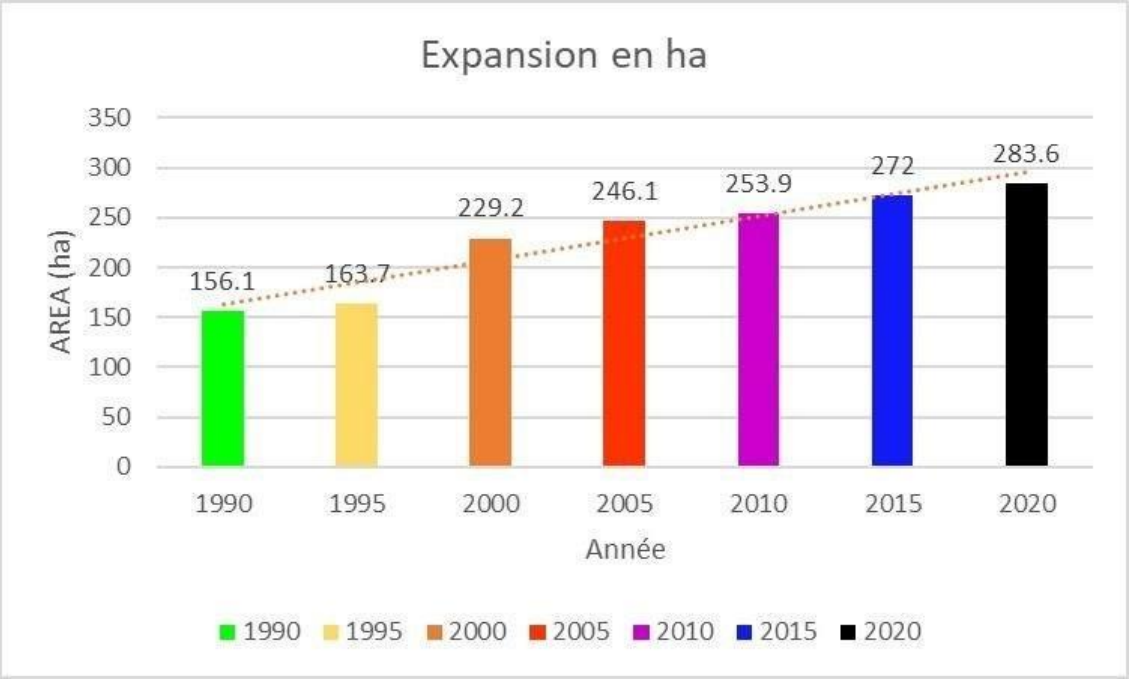


Figure 37 : Graphiques à barres illustrant le développement de l'expansion urbaine (en hectares)

3. Analyse de la carte du couvert végétal :

D'après le tableau statistique figurant sur la carte et les graphiques à barres, cette évolution peut être analysée en détail selon les principales catégories d'occupation des sols :

A. Déclin des terres cultivées (TC) :

La catégorie des terres cultivées (en vert foncé) est la plus touchée et connaît un déclin continu. En 1990, elle occupait la plus grande superficie (3 143,4 hectares), mais celle-ci a diminué régulièrement pour atteindre 2 703,3 hectares en 2020, soit une baisse considérable de plus de 440 hectares au cours des trois dernières décennies.

B. Réduction du couvert forestier (F) :

La catégorie du couvert forestier (en orange) montre un déclin initial important, passant de 258,9 hectares en 1990 à 183,7 hectares en 2000. Par la suite, une certaine stabilité des surfaces forestières est observée au cours des décennies suivantes.

C. Fluctuations des superficies de pâturages et de couverts arbustifs (P/VC et TA) :

1990-2000 : Les catégories « Pâturages et végétation clairsemée » (vert clair) et « Zones arbustives » (jaune) ont connu de légères diminutions de superficie.

2000-2020 : Ces catégories ont continué à subir de légères diminutions, ce qui indique une pression combinée sur ces zones.

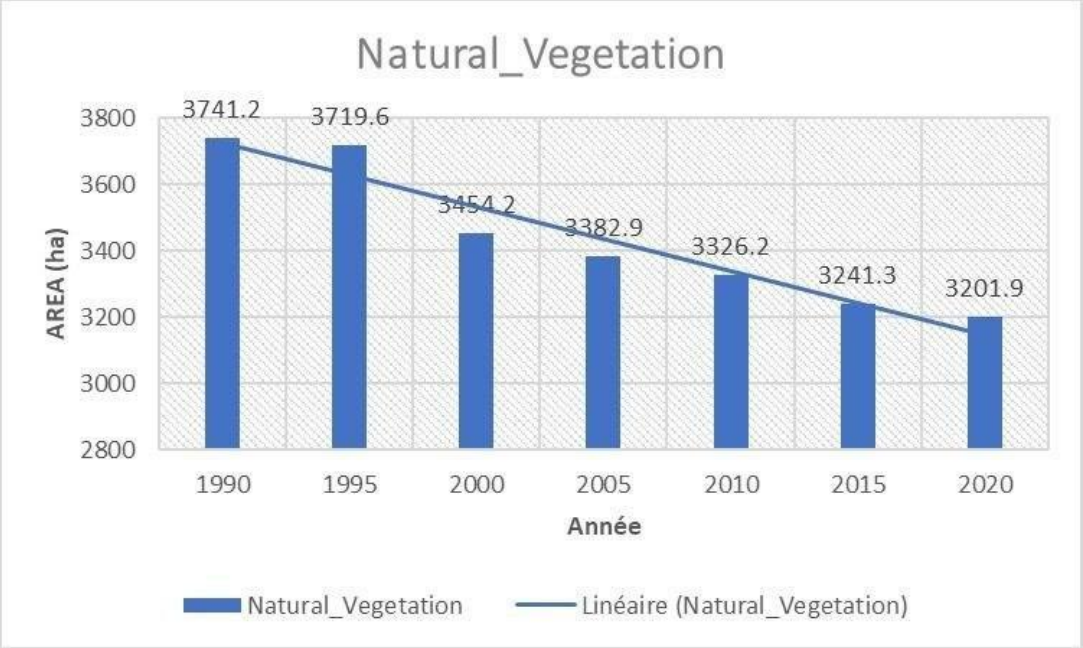


Figure 38 : Graphiques à barres montrant la couverture végétale (en hectares)

4. Analyse de l'expansion urbaine :

Les résultats des cartes issues de la télédétection montrent que la ville de Khemis Miliana a connu une transformation importante de son espace urbain entre 1990 et 2020, marquée par une extension significative de l'urbanisation et une régression de certaines autres classes d'occupation du sol.

Évolution de la surface urbaine

La ville a enregistré sa plus forte expansion urbaine entre 1995 et 2000, avec une consommation d'environ 65,4 hectares de terres en seulement cinq ans. Cette phase a eu le plus grand impact sur la morphologie urbaine de la ville.

L'expansion s'est poursuivie durant la période 2010–2020, avec l'ajout d'environ 29,7 hectares, ce qui montre que la croissance urbaine ne s'est pas arrêtée, mais qu'elle est devenue plus stable et moins rapide qu'auparavant.

Directions de l'expansion géographique

Direction ouest et nord-ouest :

Cette direction est la plus active en termes d'extension urbaine. La ville s'est nettement étendue vers l'ouest de manière organisée, notamment le long des axes routiers principaux, comme le montrent les cartes à travers la progression de l'urbanisation sur les terres agricoles.

Direction sud et sud-ouest :

Cette zone a connu un impact environnemental plus marqué, avec une régression notable des forêts. Leur superficie est passée de 258,9 hectares en 1990 à 141,9 hectares en 2020, soit une perte estimée à 117 hectares.

Centre-ville :

Le centre urbain est devenu plus dense, formant un tissu bâti continu, avec une réduction visible des espaces verts internes, ce que confirment les valeurs élevées de l'indice NDBI.

Bilan global des changements de l'occupation du sol

- Perte des terres agricoles : environ 440,1 hectares ont été perdus, la superficie passant de 3143 hectares à 2703 hectares.
- Perte du couvert forestier : le couvert forestier a diminué d'environ 45 % par rapport à sa superficie initiale en 1990.

5. Tableaux de superficies :

Tableau 3 : Tableaux de superficies

group_	superficie (ha) 1990	superficie(ha) 1995	superficie (ha) 2000	superficie (ha) 2005	superficie (ha) 2010	superficie (ha) 2015	superficie (ha) 2020
terres cultivées	**3143,4**	**3131,7**	**2989,1**	**2858,9**	**2865,6**	**2765,9**	**2703,3**
Forêt	**258,9**	**220,5**	**183,7**	**158,1**	**130,5**	**132,7**	**141,9**
Prairie	**117,3**	**139,5**	**94,7**	**136,3**	**95**	**112,1**	**123,7**
terres arbustif	**221,6**	**227,9**	**186,7**	**229,6**	**235,1**	**230,6**	**233**

3- Validation des résultats

Tableau 4 : Matrice de confusion, précision globale et coefficient Kappa

Classe réelle	**C_1**	**C_2**	**Total**	**User Accuracy (%)**
C_1	108	1	109	99.08%
C_2	2	89	91	97.80 %
Total	110	90	200	
Producer Accuracy (%)	98.18 %	98.88%		
Précision globale				**98.41 %**
Coefficient de Kappa				**0.968**

La matrice de confusion montre que la majorité des pixels ont été correctement classés. La classe **C_1** a été identifiée avec une précision parfaite, tandis que la classe **C_2** présente une très bonne précision avec seulement une légère confusion.

La précision globale élevée (**98.41 %**) ainsi que la valeur du coefficient Kappa (**0.968**) indiquent une excellente fiabilité de la classification réalisée.

4- Discussion des résultats :

Les résultats de l'analyse spatiale et cartographique de l'évolution de l'espace urbain de la ville de Khemis Miliana durant la période 1990–2020 montrent que les transformations urbaines observées n'étaient pas aléatoires, mais liées à un ensemble de facteurs sociaux, sécuritaires, économiques et urbanistiques.

L'expansion urbaine enregistrée, notamment durant les premières phases de l'étude, peut s'expliquer par le fait que la ville a constitué, durant la période de la décennie noire, un pôle urbain plus sûr et plus stable que les zones rurales environnantes. Cette situation a entraîné une migration importante de la population vers la ville à la recherche de logements, de services et d'opportunités d'emploi. Cette dynamique a fortement contribué à l'augmentation de la demande foncière et à l'accélération de la consommation des terres, particulièrement entre 1995 et 2000, période ayant connu la plus forte expansion urbaine.

Cependant, cette croissance ne s'est pas poursuivie au même rythme durant les périodes suivantes. Les résultats montrent une phase de stabilisation relative de l'expansion urbaine entre 2010 et 2020, ce qui peut être expliqué par :

• La saturation progressive des espaces facilement urbanisables ;
• Le retour d'une partie de la population vers les périphéries ou d'autres zones après l'amélioration des conditions sécuritaires et la stabilisation de la situation générale ;
• L'apparition d'un certain équilibre dans la répartition de la population et du bâti.

Sur le plan spatial, l'urbanisation s'est principalement orientée vers l'ouest et le nord-ouest, en raison de la présence des infrastructures routières et des axes de communication, ce qui confirme que la croissance urbaine était largement dirigée. En revanche, l'extension vers le sud a exercé une pression importante sur les milieux naturels, notamment les espaces forestiers, entraînant une régression notable du couvert végétal.

Par ailleurs, le centre-ville a connu une densification urbaine importante plutôt qu'une expansion horizontale, traduisant une phase avancée d'urbanisation caractérisée par une forte concentration du bâti et une réduction des espaces ouverts.

Concernant l'occupation du sol, les résultats montrent :

• Une réduction significative des terres agricoles ;

• Une diminution importante du couvert forestier ;

• Une augmentation continue des surfaces bâties au détriment des espaces naturels et agricoles.

Les résultats de l'analyse de l'occupation du sol montrent également une régression importante des terres agricoles entre 1990 et 2020. La superficie agricole est passée de 3143 ha à 2703 ha, soit une perte estimée à environ 440 ha, représentant près de 14 % de la superficie agricole initiale. Cette diminution s'explique principalement par l'expansion urbaine progressive de la ville de Khemis Miliana au détriment des espaces agricoles périphériques. Cette dynamique traduit l'impact direct de l'urbanisation sur les ressources foncières et souligne la nécessité d'adopter une planification urbaine durable afin de préserver les terres agricoles.

Les résultats obtenus reposent sur l'utilisation de la télédétection et des systèmes d'information géographique, des outils particulièrement adaptés à l'étude de l'évolution spatio-temporelle de l'urbanisation. Cette approche a permis :

• Une analyse multi-temporelle de l'évolution urbaine entre 1990 et 2020 ;

•L'extraction précise des changements d'occupation du sol ;
• La mise en relation des transformations spatiales avec leurs facteurs explicatifs. L'utilisation des indices spectraux NDVI et NDBI a également permis :

• De détecter avec précision les zones bâties ;

• De suivre la régression du couvert végétal, ce qui a fourni des résultats quantitatifs et objectifs soutenant les hypothèses de l'étude.

5- Recommandations :

À la lumière des résultats obtenus dans cette étude, plusieurs recommandations peuvent être proposées afin d'assurer un développement urbain durable et équilibré dans la ville de Khemis Miliana :

- ✓ Orienter l'expansion urbaine future vers des zones non agricoles ou à faible valeur productive afin de limiter la consommation des terres agricoles fertiles.
- ✓ Encourager la densification urbaine et la construction verticale afin de réduire l'étalement urbain et la surconsommation des espaces.
- ✓ Préserver les espaces verts et les zones forestières existantes, tout en intégrant de nouveaux espaces verts dans les futurs projets d'aménagement urbain.
- ✓ Mettre en place un système de suivi périodique basé sur les techniques de télédétection afin de surveiller l'évolution de l'occupation du sol et d'anticiper les transformations futures.
- ✓ Renforcer la planification urbaine durable en prenant en considération l'équilibre entre développement urbain, protection de l'environnement et préservation des ressources naturelles

6- Conclusion :

Ce chapitre a montré que la ville de Khemis Miliana a connu entre 1990 et 2020 une importante expansion urbaine aux dépens des terres agricoles et du couvert forestier, du fait de facteurs démographiques et économiques, ainsi que des conditions sécuritaires durant la décennie noire qui ont poussé les populations à s'orienter vers la ville perçue comme plus stable.

Les résultats montrent également que l'expansion a été plus intense à la fin des années 1990, puis plus stable durant les dernières années, avec une croissance principalement orientée vers l'ouest et le nord-ouest, tandis que les espaces naturels, notamment au sud, ont connu une régression notable.

L'utilisation de la télédétection, a permis d'analyser avec précision ces transformations, confirmant ainsi les hypothèses et atteignant les objectifs de l'étude.

En somme, cette étude montre que la croissance urbaine de Khemis Miliana est un processus continu, mais qui nécessite une planification rationnelle pour maintenir un équilibre entre l'expansion urbaine et la préservation des ressources naturelles

CONCLUSION GENERALE

Au terme de cette étude consacrée à l'analyse de l'expansion urbaine de la ville de Khemis Miliana entre 1990 et 2020, il apparaît que la ville a connu des transformations spatiales importantes marquées par une croissance continue du tissu urbain au détriment des terres agricoles et des espaces végétalisés.

L'utilisation des techniques de télédétection et des systèmes d'information géographique, notamment les indices NDVI et NDBI ainsi que la classification de l'occupation du sol, a permis de suivre avec précision l'évolution des différentes classes d'occupation du sol et de mettre en évidence les principales directions de l'expansion urbaine.

Les résultats obtenus montrent que la période 1995–2000 représente la phase la plus intense de croissance urbaine, en relation avec plusieurs facteurs démographiques, économiques et sécuritaires, notamment durant la décennie noire. Cette dynamique urbaine a entraîné une consommation progressive des espaces naturels et agricoles, ce qui souligne l'impact environnemental de l'étalement urbain.

Par ailleurs, cette étude a démontré l'importance des outils de télédétection dans l'analyse des phénomènes urbains grâce à leur capacité à fournir des données précises, rapides et multi-temporelles. Les méthodes utilisées ont permis d'atteindre les objectifs fixés et de confirmer les hypothèses de recherche.

Enfin, les résultats obtenus mettent en évidence la nécessité d'adopter une planification urbaine rationnelle et durable afin de maîtriser l'expansion future de la ville, préserver les ressources naturelles et assurer un équilibre entre développement urbain et protection de l'environnement.

7- Références

Applisat. (2024). *Applisat : Les indices de télédétection (indices radiométriques ou spectraux) | Applisat.* Récupéré sur Applisat : Les indices de télédétection (indices radiométriques ou spectraux) | Applisat

CCT. (2025). *Centre Canadien de Télédétection*. Récupéré sur Cours de Télédétection en PDF – Tutoriel Complet du Centre Canadien de Télédétection (CCT) : Cours de Télédétection en PDF – Tutoriel Complet du Centre Canadien de Télédétection (CCT)

Education, G. E. (s.d.). *Google Earth Engine – Google Earth Education*. Récupéré sur Google Earth Engine – Google Earth Education

esri. (s.d.). *https://www.esri.com/en-us/arcgis/geospatial-platform/overview*. Récupéré sur https://www.esri.com/en-us/arcgis/geospatial-platform/overview

LA TÉLÉDÉTECTION AÉRO-SPATIALE, s. d. (s.d.). *LA TÉLÉDÉTECTION AÉRO-SPATIALE, s. d.).*

PFE hachaychi, b. .. (2025). *L'APPORT DES SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE ET DE LA TELEDETECTION POUR L'ANALYSE DES VILLES – Etude de cas la ville de TLEMCEN.*

saadi, A. (s.d.). *Cours introduction a la télédétection.*

statistique, k. (2024, AOUT 14). *https://fr.statisticseasily.com/glossaire/qu%27est-ce-que-la-statistique-kappa/.* Récupéré sur https://fr.statisticseasily.com/glossaire/qu%27est-ce-que-la-statistique-kappa/

urbain, c. d. (s.d.). الفصل الأول: .....التوسع العمراني و خصائصه. Récupéré sur الفصل الأول: .....التوسع العمراني و خصائصه.

urbain, e. (s.d.). *https://blog.ajsrp.com/%d8%aa%d8%b9%d8%b1%d9%8a%d9%81-%d8%a7%d9%84%d8%aa%d9%88%d8%b3%d8%b9-%d8%a7%d9%84%d8%b9%d9%85%d8%b1%d8%a7%d9%86%d9%8a/*. Récupéré sur https://blog.ajsrp.com/%d8%aa%d8%b9%d8%b1%d9%8a%d9%81-%d8%a7%d9%84%d8%aa%d9%88%d8%b3%d8%b9-%d8%a7%d9%84%d8%b9%d9%85%d8%b1%d8%a7%d9%86%d9%8a/: https://blog.ajsrp.com/%d8%aa%d8%b9%d8%b1%d9%8a%d9%81-%d8%a7%d9%84%d8%aa%d9%88%d8%b3%d8%b9-%d8%a7%d9%84%d8%b9%d9%85%d8%b1%d8%a7%d9%86%d9%8a/

wikiland. (s.d.). *https://wikiland.org/fr/Khemis_Miliana*. Récupéré sur https://wikiland.org/fr/Khemis_Miliana

ANNEXES

Kappa de changement de couvert végétale

OBJECTID *	ClassValue	C_1	C_2	Total	U_Accuracy	Kappa
1	C_1	268	2	270	0,992593	0
2	C_2	3	190	193	0,984456	0
3	Total	271	192	463	0	0
4	P_Accuracy	0,98893	0,989583	0	0,989201	0
5	Kappa 1990	0	0	0	0	0,977771

OBJECTID *	ClassValue	C_1	C_2	Total	U_Accuracy	Kappa
1	C_1	241	6	247	0,975709	0
2	C_2	1	256	257	0,996109	0
3	C_4	0	1	1	0	0
4	Total	242	263	505	0	0
5	P_Accuracy	0,995868	0,973384	0	0,984158	0
6	Kappa 2000	0	0	0	0	0,968353

OBJECTID *	ClassValue	C_1	C_2	Total	U_Accuracy	Kappa
1	C_1	232	4	236	0,983051	0
2	C_2	6	246	252	0,97619	0
3	Total	238	250	488	0	0
4	P_Accuracy	0,97479	0,984	0	0,979508	0
5	Kappa2010	0	0	0	0	0,958983

OBJECTID *	ClassValue	C_1	C_2	Total	U_Accuracy	Kappa
1	C_1	279	7	286	0,975524	0
2	C_2	9	238	247	0,963563	0
3	Total	288	245	533	0	0
4	P_Accuracy	0,96875	0,971429	0	0,969981	0
5	Kappa	0	0	0	0	0,939606

Kappa de l’indice NDVI

OBJECTID *	ClassValue	C_1	C_2	Total	U_Accuracy	Kappa
1	C_1	267	12	279	0,956989	0
2	C_2	5	114	119	0,957983	0
4	Total	272	126	398	0	0
5	P_Accuracy	0,981618	0,897638	0	0,954887	0
6	Kappa NDVI 1990	0	0	0	0	0,894692

OBJECTID *	ClassValue	C_1	C_2	Total	U_Accuracy	Kappa
1	C_1	355	5	360	0,986111	0
2	C_2	12	158	170	0,929412	0
3	Total	367	163	530	0	0
4	P_Accuracy	0,967302	0,969325	0	0,967925	0
5	Kappa NDVI 2000	0	0	0	0	0,92558

OBJECTID *	ClassValue	C_1	C_2	Total	U_Accuracy	Kappa
1	C_1	220	6	226	0,973451	0
2	C_2	7	113	120	0,941667	0
3	Total	227	119	346	0	0
4	P_Accuracy	0,969163	0,94958	0	0,962428	0
5	Kappa 2010	0	0	0	0	0,91691

OBJECTID *	ClassValue	C_1	C_2	Total	U_Accuracy	Kappa
1	C_1	279	10	289	0,965398	0
2	C_2	12	170	182	0,934066	0
3	Total	291	180	471	0	0
4	P_Accuracy	0,958763	0,944444	0	0,953291	0
5	Kappa NDVI 2020	0	0	0	0	0,901297

Kappa de l'indice NDBI

OBJECTID *	ClassValue	C_1	C_2	Total	U_Accuracy	Kappa
1	C_1	185	2	187	0,989305	0
2	C_2	2	138	140	0,985714	0
3	Total	187	140	327	0	0
4	P_Accuracy	0,989305	0,985714	0	0,987768	0
5	Kappa NDBI 1990	0	0	0	0	0,975019

OBJECTID *	ClassValue	C_1	C_2	Total	U_Accuracy	Kappa
1	C_1	196	4	200	0,98	0
2	C_2	7	147	154	0,954545	0
3	Total	203	151	354	0	0
4	P_Accuracy	0,965517	0,97351	0	0,968927	0
5	Kappa NDBI 2000	0	0	0	0	0,936644

OBJECTID *	ClassValue	C_1	C_2	Total	U_Accuracy	Kappa
1	C_1	195	4	199	0,979899	0
2	C_2	7	147	154	0,954545	0
3	Total	202	151	353	0	0
4	P_Accuracy	0,965347	0,97351	0	0,968839	0
5	Kappa NDBI 2010	0	0	0	0	0,936508

OBJECTID *	ClassValue	C_1	C_2	Total	U_Accuracy	Kappa
1	C_1	204	10	214	0,953271	0
2	C_2	9	212	221	0,959276	0
3	Total	213	222	435	0	0
4	P_Accuracy	0,957746	0,954955	0	0,956322	0
5	Kappa NDBI 2020	0	0	0	0	0,912615