

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان –

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : METIERS DE LA VILLE

Spécialité : GEOMATIQUE ET GESTION DU FONCIER

Par : - BOUREKIZA Ahmed Mounir

- HACHAICHI Djaber

Sujet

**L'APPORT DES SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE ET
DE LA TELEDETECTION POUR L'ANALYSE DES VILLES – Etude de
cas la ville de TLEMCEN –**

Soutenu publiquement, le 29 / 06 /2025 , devant le jury composé de :

M. KASMI Med El Amine	MCA	Université de Tlemcen	Président
Mme KHERBOUCHE Somia	MCB	Université de Tlemcen	Examineur
Mme DERKAOUI Aicha	MAA	Université de Tlemcen	Encadrant
M/ MENSOUR Djamel	Ing/prin	ENSGTS d'Arzew	Co-encadrant

Année universitaire : 2024/2025

Remerciements

Je souhaite tout d'abord exprimer ma profonde gratitude à Dieu Tout-Puissant, pour m'avoir accordé la volonté, la force et la persévérance nécessaires à la réalisation de ce travail modeste.

J'adresse mes sincères remerciements à **Madame Derkaoui Aicha**, Maître Assistante (A) à l'Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen, ainsi qu'à **Monsieur Mansour Djamel** du Centre des Techniques Spatiales – Arzew, pour avoir accepté d'encadrer ce travail respectivement en tant qu'encadrante principale et co-encadrant. Leur accompagnement, leurs conseils avisés et leur disponibilité constante ont été d'un grand soutien tout au long de cette recherche.

Je tiens également à remercier chaleureusement **M. KASMI Med El Amine**, qui a bien voulu présider le jury de soutenance, ainsi que **Madame Kherbouche Somia**, Maître Assistante (A) à l'Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen, pour avoir accepté d'examiner ce mémoire et pour ses remarques précieuses et constructives.

Mes remerciements vont aussi à l'ensemble des enseignants du **Master Géomatique et Gestion Foncière**, pour leur encadrement pédagogique, leurs conseils enrichissants et leur accompagnement durant toute ma formation.

Enfin, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à **ma famille**, en particulier **mes chers parents**, pour leur soutien indéfectible, leur patience et leurs encouragements constants. Je remercie également toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

إهداء

إلى من غرسا في حبّ العلم والصدق والإصرار،

إلى من كانا لي سندًا ودعاءً في كل مرحلة من مراحل الحياة...

إلى والديّ العزيزين، رمز العطاء اللامحدود، أقدمّ لكما ثمرة هذا العمل عربون وفاء وامتنان.

إلى عائلتي الكريمة، القرية 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 ﷺ:

"من لا يشكر الناس لا يشكر الله".

Résumé

Ce mémoire s'inscrit dans une approche interdisciplinaire combinant la géographie urbaine, les technologies géospatiales et l'aménagement du territoire. Il vise à explorer l'apport de l'intégration des Systèmes d'Information Géographique (SIG) et de la télédétection dans l'analyse des dynamiques urbaines contemporaines, en prenant la ville de Tlemcen comme étude de cas sur la période 1995–2025.

L'étude a permis de suivre les changements d'occupation du sol à travers les indices NDVI, NDBI et LST, et d'identifier les zones à forte croissance urbaine ainsi que les zones de régression végétale. Les résultats montrent une urbanisation rapide ayant un impact direct sur les températures de surface et la configuration écologique de la ville.

Ce travail confirme l'importance des outils géospatiaux dans l'aide à la décision, la modélisation des dynamiques urbaines, et la promotion d'une planification territoriale durable et fondée sur des données objectives.

Mots-clés : Systèmes d'Information Géographique (SIG), Télédétection, Urbanisation, Indices spectraux, Ville de Tlemcen.

ملخص

يندرج هذا البحث ضمن مقاربة متعددة التخصصات تجمع بين الجغرافيا الحضرية، التقنيات الجيومكانية، وتخطيط الإقليم. يهدف إلى استكشاف مساهمة دمج نظم المعلومات الجغرافية (SIG) والاستشعار عن بعد في تحليل الديناميكيات الحضرية المعاصرة، مع أخذ مدينة تلمسان كدراسة حالة خلال الفترة 1995-2025.

أتاحت الدراسة تتبع التغيرات في استخدام الأراضي من خلال مؤشرات NDVI ، NDBI ، وLST، وتحديد المناطق ذات النمو الحضري السريع والمناطق التي شهدت تراجعاً في الغطاء النباتي. تُظهر النتائج تسارعاً في التحضر له تأثير مباشر على درجات حرارة السطح والتكوين البيئي للمدينة.

يؤكد هذا العمل على أهمية الأدوات الجيومكانية في دعم اتخاذ القرار، نمذجة الديناميكيات الحضرية، وتعزيز التخطيط الإقليمي المستدام القائم على بيانات موضوعية.

الكلمات المفتاحية: نظم المعلومات الجغرافية (SIG)، الاستشعار عن بعد، التحضر، المؤشرات الطيفية، مدينة تلمسان.

Abstract

This thesis adopts an interdisciplinary approach combining urban geography, geospatial technologies, and territorial planning. It aims to explore the contribution of integrating Geographic Information Systems (GIS) and remote sensing in analyzing contemporary urban dynamics, using the city of Tlemcen as a case study over the period 1995–2025.

The study enabled tracking changes in land use through NDVI, NDBI, and LST indices, identifying areas of rapid urban growth and regions experiencing vegetation decline. The results show rapid urbanization with a direct impact on surface temperatures and the city's ecological configuration.

This work underscores the importance of geospatial tools in decision-making, modeling urban dynamics, and promoting sustainable, data-driven territorial planning.

Keywords: Geographic Information Systems (GIS), Remote Sensing, Urbanization, Spectral Indices, Tlemcen City.

Table des matières

Remerciements

إهداء

Résumé	I
--------------	---

ملخص.....	I
-----------	---

Abstract.....	II
---------------	----

Listes des Figures	VII
--------------------------	-----

Liste des Tableaux.....	IX
-------------------------	----

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

1. L'objet de la recherche	2
2. Problématique.....	3
3. Hypothèses	3
4. Objectifs de la recherche	4
5. Méthodologie	5

Chapitre I: Analyse des villes - Fondements théoriques

1. Introduction.....	7
2. Concepts clés de l'analyse des villes	7
3. La méthode d'analyse des villes	7
4. Cadre méthodologique pour l'analyse des villes.....	8
5. Défis et perspectives de l'analyse des villes	9
6. La nécessité d'outils d'analyse avancés pour une gestion urbaine durable.....	10
Conclusion.....	11

Chapitre II : Systèmes d'Information Géographique (SIG)

1. Introduction	13
2. Systèmes d'Information Géographique (SIG)	13
2.1. Définitions	13
2.2. La fonction d'un SIG.....	14

2.3.	STRUCTURE D'UN SIG	15
2.4.	Domaines d'applications	15
3.	Information géographique :.....	16
3.1.	Composantes de l'information géographique :.....	16
3.2.	Les Modes de représentation de l'information géographique dans un SIG.....	17
3.2.1.	Mode vecteur :.....	18
3.2.2.	Mode raster.....	18
4.	Coordonnées d'un objet géographique et Géoréférencement.....	20
4.1.	Coordonnées d'un objet géographique	20
4.2.	Représentations planes en Algérie	20
4.3.	Principe du géoréférencement.....	21
5.	SIG 3D.....	22
5.1.	Le Modèle Numérique de Terrain (MNT)	22
5.2.	Le modèle d'élévations numérique (MNE)	22
	Conclusion.....	23
	Chapitre III : TELEDETECTION	24
1.	Introduction	25
2.	Définition	25
3.	Types de télédétection	28
3.1.	Télédétection Passive (images optiques)	28
3.2.	Télédétection Active (images radars)	28
4.	LES DOMAINES D'APPLICATION DE LA TELEDETECTION	28
5.	Bases physiques de la télédétection	29
6.	SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE	32
7.	La définition d'une orbite	34
8.	Images satellitaires	35
8.1.	Représentation des données	37

8.2. Visualisation des images	38
8.3. Prétraitement des images	39
9. CLASSIFICATION DE L'IMAGE	39
9.1. Classification non supervisée	40
9.2. Classification supervisée	40
10. Les indices de télédétection	40
10.1. Les indices de végétation	40
10.2. Les Indices hydrographiques	42
10.3. Les indices paysagers	42
11. Occupation et couverture du sol (Land Use and Land Cover)	43
12. La température de surface terrestre (LST)	45
CONCLUSION	47
Chapitre IV : Analyse spatio-temporelle de l'expansion urbaine de la ville de Tlemcen	
entre 1995 et 2025 à l'aide des SIG et de la télédétection	48
1. Introduction	49
2. Travaux antérieurs	49
3. Présentation de la zone d'étude	51
4. Matériel et données utilisées	52
4.1. Logiciels et outils	52
4.2. Données spatiales	53
4.3. Données auxiliaires	53
5. Prétraitement des images	54
6. Méthodologie de travail	57
7. Caractéristiques hydrologiques de Tlemcen	57
7.1. La représentation numérique du relief de la région de Tlemcen	58
7.2. Détermination de la direction de l'écoulement de l'eau à l'aide du modèle D8	59
7.3. Accumulation de flux	60

7.4.	Définition du réseau hydrographique (Stream Definition)	61
7.5.	Délimitation des sous-bassins versants de la ville de Tlemcen	62
7.6.	Caractéristiques hydrologique dans les sous-bassins de la ville TLEMEN :	63
8.	Utilisation et couverture des terres	64
8.1.	Les étapes principales de l'application LULC sous ArcGIS Pro	64
8.2.	Analyse de l'évolution de l'occupation du sol (LULC) à Tlemcen (1995 - 2025)	66
8.3.	Détection des changements de l'utilisation et de l'occupation du sol	68
9.	Calcul d'indices spectraux	70
9.1.	Analyse de l'évolution de l'indice NDVI entre 1995 et 2025	70
9.2.	Analyse de l'évolution de l'indice NDBI entre 1995 et 2025.....	72
9.3.	Analyse de l'évolution LST entre 1995 et 2025	74
9.4.	Évaluation spatio-temporelle D'Indice de variation du champ thermique urbain (UTFVI) dans la ville de Tlemcen	77
10.	Relations entre les indicateurs étudiés	79
10.1.	Relation entre NDVI et NDBI.....	79
10.2.	Relation NDVI–LST	80
10.3.	Relation NDBI–LST	80
10.4.	SUHI.....	80
10.5.	UTFVI	80
11.	Discussion à la lumière des études précédentes	81
	Conclusion.....	81
	Conclusion générale	82
	Bibliographie.....	84

Listes des Figures

Figure 1. Définition du SIG.....	13
Figure 2. Les composant de SIG	14
Figure 3. Structure d'un SIG.....	15
Figure 4. La forme de l'objet géographique	17
Figure 5. Les Modes de représentation de l'information géographique.....	17
Figure 6. Mode Vecteur	18
Figure 7. Représentation de mode raster	18
Figure 8. Projection UTM D'Algerie.....	20
Figure 9. Projection Lambert D'Algerie	21
Figure 10. La difference entre MNT et MNE	22
Figure 11. Les Trois éléments fondamentaux de télédétection	26
Figure 12. Formes d'acquisition d'information par les capteurs	26
Figure 13. Processus de télédétection	27
Figure 14. Télédétection Passive.....	28
Figure 15. Télédétection Active	28
Figure 16. Caractéristique d'onde électromagnétique	30
Figure 17. Propriétés des ondes électromagnétiques.....	31
Figure 18. Propriétés du REM.....	32
Figure 19. SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE	32
Figure 20. Caractéristique du rayonnement ÉLECTROMAGNÉTIQUE	33
Figure 21. matrice de pixels	35
Figure 22. Valeur radiométrique	35
Figure 23. Visualisation des valeurs radiométriques	35
Figure 24. Les deux modes de la résolution spectrale.....	36
Figure 25. Représentation par Image	37
Figure 26. Représentation par signature spectral	37
Figure 27. Le codage RVB.....	38
Figure 28. Corrections géométriques	39
Figure 29 . Les types de classification d'image.....	39
Figure 30. Plan de Situation de La ville de Tlemcen	51
Figure 31. Logo Arcgis Pro.....	52
Figure 32. la processus de Géoréférencement.....	54

Figure 33. Les étapes d'extractions	54
Figure 34. Image raster de Tlemcen.....	55
Figure 35. Composition colorée de Tlemcen	56
Figure 36. Composite en couleurs fausses de Tlemcen	56
Figure 37. Méthodologie de travail	57
Figure 38. Modèle Numérique d'Élévation (MNE) Tlemcen.....	58
Figure 39. La direction de l'écoulement de l'eau de Tlemcen	59
Figure 40. Le modèle D8.....	59
Figure 41. Accumulation de flux de Tlemcen.....	60
Figure 42. Définition du réseau hydrographique Tlemcen	61
Figure 43. Délimitation des sous-bassins versants de la ville de Tlemcen	62
Figure 44. Préparer les échantillons pour la classification supervisée.	64
Figure 45. Création des échantillons d'entraînement	65
Figure 46. L'évolution de l'occupation du sol (LULC) à Tlemcen (1995 - 2025)	66
Figure 47. l'évolution de l'occupation du sol (LULC) à Tlemcen (1995 - 2025).....	67
Figure 48. Détection des changements de l'utilisation et de l'occupation du sol entre 1995 et 2025 à Tlemcen	68
Figure 49. L'évolution de l'indice NDVI entre 1995 et 2025.....	70
Figure 50. L'évolution de l'indice NDBI entre 1995 et 2025	72
Figure 51. L'évolution de LST (La température de surface terrestre) entre 1995 et 2025	74
Figure 52. Évaluation spatio-temporelle de l'intensité des îlots de chaleur urbains (SUHI) dans la ville de Tlemcen	76
Figure 53. Évaluation spatio-temporelle D'Indice de variation du champ thermique urbain (UTFVI) dans la ville de Tlemcen	77
Figure 54. Matrice de corrélation entre NDBI et NDVI	79

Liste des Tableaux

Tableau 1. La démarche de recherche	5
Tableau 2. Les Types d'orbites.....	34
Tableau 3. Les types de composition	38
Tableau 4. données spatiales	53
Tableau 5. l'évolution de l'occupation du sol (LULC) à Tlemcen (1995 - 2025)	66
Tableau 6. Détection des changements de l'utilisation et de l'occupation du sol.....	68

Introduction générale

Les villes contemporaines font face à des défis complexes et croissants en raison de l'expansion urbaine rapide, de la croissance démographique accélérée et de la dégradation environnementale, ce qui exerce une pression énorme sur les infrastructures et les ressources naturelles (Seto et al., 2012; UN-Habitat, 2020). Dans ce contexte de dynamiques changeantes, une planification urbaine efficace devient une nécessité impérieuse pour assurer un développement urbain durable capable de répondre aux besoins des générations actuelles et futures (Batty, s. d.) Cependant, la complexité croissante des systèmes urbains exige le recours à des outils d'analyse avancés, capables de fournir des données précises pour améliorer les processus de prise de décision.

Dans ce cadre, les systèmes d'information géographique (SIG) et les techniques de télédétection (Remote Sensing) émergent comme des outils clés pour étudier les changements urbains et analyser les modèles d'utilisation des terres (Weng, 2012). Ces technologies permettent une compréhension plus approfondie des processus urbains et aident à élaborer des stratégies plus efficaces pour la gestion des villes (Batty, s. d.). Ainsi, ce Thème vise à mettre en lumière les défis auxquels sont confrontées les villes modernes, tout en soulignant l'importance d'adopter des outils d'analyse géographique avancés pour soutenir la prise de décision et renforcer la durabilité urbaine.

1. L'objet de la recherche

Le monde connaît aujourd'hui des changements environnementaux rapides dus à l'augmentation des activités humaines et au changement climatique. Les technologies de télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG) sont des outils modernes et efficaces pour surveiller et analyser les changements dans la couverture terrestre. Cette étude vise à appliquer ces technologies au niveau de la ville de Tlemcen pour fournir des perspectives et des recommandations scientifiques contribuant au développement des politiques locales et à la résolution des défis environnementaux croissants, tels que l'expansion urbaine non planifiée et la dégradation des terres.

2. Problématique

Malgré les avancées technologiques dans les systèmes d'information géographique (SIG) et la télédétection, de nombreuses villes continuent de souffrir d'un urbanisme non structuré et d'une planification inefficace. Ce décalage s'explique par la faible utilisation des outils d'analyse disponibles par les décideurs. Cela soulève une question centrale :

Comment l'intégration des systèmes d'information géographique (SIG) et de la télédétection contribue-t-elle à fournir un cadre analytique précis et efficace pour l'étude de la ville de Tlemcen, en renforçant la planification urbaine durable et en soutenant la prise de décision face aux défis environnementaux ?

3. Hypothèse

- L'intégration méthodique des Systèmes d'Information Géographique (SIG) et des techniques de télédétection constitue un cadre analytique global et cohérent, apte à rehausser les pratiques de planification urbaine et de gestion territoriale, en combinant des données spatiales multi-sources et en les analysant de manière dynamique pour soutenir une prise de décision urbaine fondée sur des évidences géographiques.

4. Objectifs de la recherche

Le mémoire s'articule autour de trois axes principaux visant à renforcer l'analyse urbaine par l'intégration des technologies géospatiales.

- 1.** Proposer un nouveau cadre pour l'utilisation des SIG et de la télédétection dans l'analyse des villes.

Ce projet vise à développer un cadre intégré combinant les systèmes d'information géographique et la télédétection, afin d'analyser plus finement les dynamiques urbaines. Il repose sur le dépassement des méthodes traditionnelles par une intégration efficace des sources de données spatiales, permettant ainsi l'identification des tendances, la détection des anomalies et le suivi des transformations territoriales (Miller & Goodchild, 2015).

- 2.** Présenter les principes fondamentaux des Systèmes d'Information Géographique (SIG) et des techniques de télédétection, afin de montrer comment ces outils contribuent à la construction d'une base de connaissances et de compétences techniques pour comprendre les changements spatio-temporels des villes.

Cet objectif s'appuie sur l'idée que l'analyse urbaine contemporaine nécessite une lecture spatio-temporelle appuyée sur des données géoréférencées, des images satellitaires, et des outils de traitement spatial avancés. L'intégration de ces technologies permet d'observer, de modéliser et de prévoir les dynamiques territoriales (Belguidoum, 2008.; Carpentier-Postel, 2021).

- 3.** Étude de cas appliquée sur l'utilisation des Systèmes d'Information Géographique et de la télédétection dans la ville de Tlemcen

Analyser comment les technologies des SIG et de la télédétection sont mobilisées pour traiter les problématiques urbaines dans la ville de Tlemcen, à travers une étude de cas comparative mettant en évidence l'efficacité de ces outils dans la proposition de solutions concrètes face aux défis liés à l'expansion urbaine, aux infrastructures et à la gestion des ressources urbaines.

5. Méthodologie

La démarche de recherche repose sur une intégration de méthodes quantitatives et qualitatives afin d'exploiter pleinement les potentialités des systèmes d'information géographique (SIG) et des techniques de télédétection dans l'analyse des dynamiques urbaines. La méthodologie se décompose en plusieurs phases successives : la collecte des données, leur prétraitement, l'intégration des sources hétérogènes, l'analyse spatiale avancée, puis la validation et la visualisation des résultats. Cette approche holistique permet de saisir à la fois les aspects structurants et évolutifs du territoire urbain.

Tableau 1. La démarche de recherche

Elements	Détails
Objectif general	Surveillance des changements environnementaux dans la ville de Tlemcen et appui aux politiques locales face à l'expansion urbaine non planifiée et à la dégradation des terres.
Étapes de la recherche	1. Collecte des données. 2. Prétraitement. 3. Intégration des sources. 4. Analyse spatiale. 5. Validation des résultats. 6. Visualisation.
Sources de données	- Télédétection : Images satellitaires (Landsat, Sentinel). - SIG : Données institutionnelles. - Données complémentaires
Techniques d'analyse	- Analyse spatiale : Classification, interpolation spatiale, détection de changements. - Analyse temporel : entre les années 1995 et 2025 chaque 10 ans. - Indices de télédétection : NDVI, NDBI, utilisation et couverture des Sol (LULC), changements thermiques (LST), SUHI, UTFVI. - Validation des résultats : Comparaison avec des données de référence et études antérieures.

Chapitre I: Analyse des villes - Fondements théoriques.

1. Introduction.

L'analyse des villes est une démarche fondamentale dans le domaine des sciences géographiques. Elle cherche à comprendre les mécanismes complexes des espaces urbains, en intégrant des dimensions économiques, sociales, politiques et environnementales (Levy-Et-Lassault- s. d.). Ce processus analytique permet d'identifier les dynamiques internes des villes, d'évaluer leur développement spatial, et de proposer des solutions pour une gestion urbaine optimale(Denise, s. d.).

2. Concepts clés de l'analyse des villes

L'analyse des villes repose sur plusieurs concepts fondamentaux qui permettent de mieux comprendre la structure et le fonctionnement des espaces urbains.

Une ville est généralement définie comme un espace géographique densément peuplé, marqué par une forte concentration d'activités économiques, d'infrastructures et de services. Elle constitue un centre névralgique de la société moderne, caractérisé par une organisation spatiale et sociale complexe. Les dynamiques urbaines regroupent des phénomènes tels que la croissance démographique, l'urbanisation, la polarisation économique, ainsi que la diversification fonctionnelle des territoires.(Laiche & Si-Mohammed, 2018)

L'analyse urbaine contemporaine vise à interroger ces processus en tenant compte des enjeux de durabilité, de gouvernance, de justice spatiale et d'inclusivité. Elle mobilise des outils théoriques et méthodologiques issus de la géographie, de l'urbanisme et des sciences sociales, dans le but de mieux comprendre, planifier et transformer les espaces urbains(Levy-Et-Lassault- s. d.)

3. La méthode d'analyse des villes

Pour prendre en charge l'étude d'une opération de restructuration et de densification urbaine, il est impératif de procéder par une analyse urbaine détaillée et globale de toutes les composantes physico-spatiales et humaines à l'intérieur des limites du périmètre d'étude.(L'analyse urbaine, s. d.)

Il s'agit d'analyser au préalable le support physique du périmètre d'étude à plusieurs niveaux et à différentes échelles :

- L'étude géographique permet de dégager des connaissances en rapport avec la portance des sols.
- la géomorphologie permet d'appréhender, les formes de pentes, ...etc.

- L'analyse démographique permet d'évaluer la croissance démographique future, cette croissance est indicatrice de l'expression des besoins futurs en structures spatiales diverses, logements, équipements, infrastructures diverses, elle permet aussi de connaître les spécificités de la population inscrite à l'intérieur du périmètre d'étude ; sa structure, sa dynamique et ses besoins, ainsi que les relations entre le mode de vie, les pratiques sociales, les mœurs et la forme physique du projet spatial à produire.(L'analyse urbaine, s. d.)
- L'analyse socio-économique peut aussi mener à une recherche spatiale, ainsi que le choix de localisation et d'implantation des équipements et des investissements selon les meilleures conditions de rentabilité économique et d'optimisation.(L'analyse urbaine, s. d.)
- L'analyse urbaine est avant tout l'analyse de l'objet urbain, de sa structure et de sa forme, Cette approche spatiale nous permettra de faire un diagnostic complet du cadre bâti et de l'habitat en particulier. Il s'agit donc de connaître en détail son état, son niveau de confort, les matériaux qui le composent, sa structure ...etc.(L'analyse urbaine, s. d.)

4. Cadre méthodologique pour l'analyse des villes

Le cadre méthodologique est essentiel pour structurer le processus d'analyse des villes et en garantir la rigueur scientifique. Ce cadre comprend plusieurs étapes clés qui permettent de répondre aux problématiques urbaines.

- **Identification des objectifs de l'analyse** : La première étape de l'analyse des villes consiste à définir clairement les objectifs de l'étude. Ces objectifs peuvent inclure la compréhension des dynamiques économiques, l'analyse de la mobilité, ou encore l'étude des impacts environnementaux. Les objectifs guideront toutes les étapes suivantes de l'analyse (Denise, s. d.)
- **Collecte de données** : La collecte de données est cruciale pour toute analyse urbaine. Cela comprend la collecte de données quantitatives et qualitatives. Les données quantitatives peuvent provenir de sources comme les recensements, les enquêtes sociales, et les bases de données statistiques. Les données qualitatives sont souvent collectées à travers des interviews, des études de cas, et des observations de terrain (Bertrand et al., s. d.)
- **Traitement et analyse des données** : Une fois les données collectées, elles doivent être traitées et analysées. L'utilisation des SIG permet d'analyser les données géospatiales et d'étudier les relations spatiales entre les différents éléments de la ville (Batty, s. d.). Par ailleurs, des outils statistiques comme les régressions ou les modèles économétriques peuvent être utilisés pour analyser les tendances socio-économiques des villes.

- **Interprétation des résultats** : L'interprétation des données constitue une étape cruciale pour appréhender les dynamiques urbaines à l'œuvre dans le développement des villes. Elle suppose une mise en perspective des résultats issus des analyses quantitatives et qualitatives, afin de formuler des hypothèses sur les causes, les mécanismes et les effets des transformations territoriales (Levy-Et-Lassault-, s. d.)
- **Propositions de solutions et recommandations** : Sur la base des résultats de l'analyse, des solutions peuvent être proposées pour améliorer les politiques urbaines, promouvoir un développement durable, et gérer les problèmes environnementaux, sociaux, et économiques des villes. Cela peut inclure la révision des politiques de transport, des stratégies de développement économique ou des initiatives en matière de logement (Levy-Et-Lassault-, s. d.)

5. Défis et perspectives de l'analyse des villes

Les principaux défis des villes modernes

Les villes modernes souffrent de problèmes structurels croissants, résultant de l'interaction entre des facteurs démographiques, économiques et environnementaux (Li & Ma, 2014) Parmi les défis les plus importants figurent :

➤ La croissance démographique et l'expansion urbaine rapide

L'augmentation de la population est l'un des facteurs clés qui influencent les villes, entraînant une demande accrue de services de base tels que le logement, les transports et la santé. Selon un rapport des Nations Unies sur les perspectives de la population mondiale (World Urbanization Prospects, 2019) , la proportion de la population urbaine devrait atteindre 68 % d'ici 2050, ce qui exercera des pressions sans précédent sur les infrastructures et les ressources urbaines.

➤ L'étalement urbain désordonné et la faiblesse de la planification

L'absence d'une planification urbaine rigoureuse entraîne une expansion désorganisée des zones résidentielles, conduisant à une exploitation non durable des terres agricoles et des ressources environnementales. Selon une étude (Angel et al., 2011), l'étalement urbain non planifié crée des lacunes urbaines qui réduisent l'efficacité des réseaux de transport et des services de base, augmentant ainsi les charges économiques et sociales.

➤ La dégradation environnementale et la pollution urbaine

L'activité humaine croissante contribue à l'augmentation des niveaux de pollution environnementale, affectant négativement la qualité de l'air et de l'eau, et exacerbant les changements climatiques. Les rapports de l'Organisation mondiale de la santé (RD-Annual-Report-2021-fre, s. d.) Confirment que la pollution urbaine est responsable de millions de décès annuels, en particulier dans les grandes villes souffrant d'une densité élevée de transports et d'émissions industrielles.

➤ La gestion inefficace des ressources urbaines

La planification urbaine traditionnelle dans de nombreux pays repose sur des données obsolètes et imprécises, conduisant à des décisions non fondées sur des réalités concrètes. Une étude (Batty, s. d.) Souligne que le manque de données géographiques précises et en temps réel entrave les processus de planification durable et la gestion efficace des crises urbaines.

6. La nécessité d'outils d'analyse avancés pour une gestion urbaine durable

Face à la complexité croissante des systèmes urbains, la nécessité de technologies d'analyse géographique avancées capables de fournir des données spatiales précises pour soutenir la planification urbaine durable est devenue évidente. Parmi ces outils, on peut citer :

➤ Les systèmes d'information géographique (SIG)

Les SIG représentent l'une des solutions technologiques les plus efficaces pour l'analyse urbaine, permettant de collecter, analyser et représenter des données spatiales de manière à améliorer la prise de décision. Une étude (Goodchild, 2010) a confirmé que l'utilisation des SIG aide à développer des modèles urbains interactifs qui améliorent l'efficacité de la gestion des ressources urbaines et des infrastructures.

➤ Les techniques de télédétection (Remote Sensing)

Les techniques de télédétection fournissent des données précises sur les changements urbains à grande échelle, contribuant à surveiller l'expansion urbaine, les changements environnementaux et la pollution urbaine. Selon une étude (Weng, 2012), les images satellitaires et les données issues de la télédétection offrent des informations détaillées sur les modèles d'utilisation des terres, permettant ainsi l'élaboration de plans urbains basés sur des preuves scientifiques précises.

➤ La modélisation et la simulation urbaines (Urban Modeling and Simulation)

Les techniques de modélisation urbaine contribuent à l'analyse de scénarios futurs pour les différents composants des systèmes urbains, aidant à prendre des décisions plus durables et efficaces. Une étude a souligné que la modélisation urbaine basée sur l'intelligence artificielle améliore la capacité prédictive des politiques urbaines, renforçant ainsi l'adaptabilité des villes aux changements futurs (Maria De Almeida et al., 2003).

Conclusion

L'analyse des villes est essentielle pour comprendre les dynamiques complexes qui régissent les espaces urbains. Ce chapitre a permis de présenter les concepts clés, les objectifs, et les approches méthodologiques utilisées dans l'analyse des villes. Le cadre méthodologique détaillé permet de structurer le processus d'analyse et d'assurer la validité des résultats. Les défis actuels, notamment liés à la collecte de données et à l'intégration des différentes informations, montrent l'importance de recourir aux nouvelles technologies pour améliorer la gestion des villes.

Chapitre II : Systèmes d'Information Géographique (SIG)

1. Introduction

Le Système d'Information Géographique (SIG) est une technologie révolutionnaire qui permet la collecte, l'analyse, et la visualisation de données géospatiales. Au croisement de la cartographie, de l'analyse statistique et des technologies de base de données, les SIG fournissent un cadre pour la modélisation et la gestion des informations spatiales, facilitant ainsi une compréhension approfondie de divers contextes géographiques et environnementaux. Historiquement, les SIG ont évolué à partir de méthodes simples de cartographie pour devenir des systèmes complexes capables d'intégrer des données de diverses sources, allant des relevés sur le terrain aux satellites. (Système d'Information Géographique (SIG), s. d.)

2. Systèmes d'Information Géographique (SIG)

2.1. Définitions

Un SIG est un système informatique de matériels, de logiciels et de processus, conçu pour permettre la collecte, la gestion la manipulation et l'affichage de données à référence spatiale en vue de résoudre des problèmes d'aménagement et de gestion. On appelle donnée à r références spatiales toute donnée pouvant être localisée de façon directe (une école, une route...) ou indirecte (une adresse, un propriétaire...) à la surface de terre. Pour transformer un objet réel en une donnée à référence spatiale, on décompose le territoire en couches thématiques (relief, routes, bâtiments...) structurées dans des bases de données numériques. Les bases de données qui alimentent les SIG doivent être géo référencées, c'est-à-dire partager un cadre commun de repérage appelé système de projection. Ce cadre commun est fixé légalement. En Algérie, il s'agit du système géodésique Nord Sahara 1956. (systemes_dinformations_geographiques, s. d.-a)

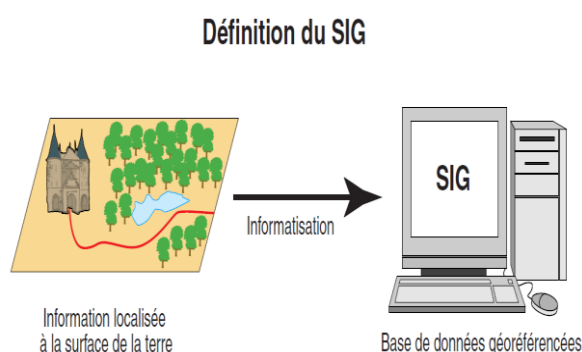


Figure 1. Définition du SIG

Un SIG composé de (systemes_dinformations_geographiques, s. d.-b)

- Ordinateurs et périphériques
- Logiciels spécialisés
- Données numériques
- Personnel qualifié
- Utilisateurs



Figure 2. Les composants d'un SIG

2.2. La fonction d'un SIG

1. Gestion des données : Un SIG est un système fondamental d'enregistrement. Vous pouvez stocker et intégrer des informations à partir de systèmes professionnels et de sources faisant autorité, amplifiant ainsi l'utilité des données.(ESRI la fonction d'un SIG, s. d.)
2. Cartographie et visualisation : De cartes et tableaux de bord numériques à l'imagerie satellite, à la technologie 3D et au SIG en temps réel, un SIG donne vie aux données, en nous aidant à mieux saisir les problématiques et à les résoudre. (ESRI la fonction d'un SIG, s. d.)
3. Analyse spatiale: La plupart des données ont une composante de localisation : tout se produit partout. Avec les outils d'analyse spatiale, nous trouvons des relations cachées et générons de nouvelles informations des données.(ESRI la fonction d'un SIG, s. d.)
4. Communication: Les cartes et les tableaux de bord communiquent rapidement des idées complexes. La science et les données élaborent une conception commune, en privilégiant la collaboration et la résolution des problèmes.(ESRI la fonction d'un SIG, s. d.)

2.3. STRUCTURE D'UN SIG

Met en évidence quatre groupes de fonctionnalités au-dessous d'une couche d'applications : l'acquisition des données géographiques d'origines diverses, la Gestion pour le stockage et la recherche des données, l'analyse spatiale pour le traitement et l'exploitation et enfin la présentation des résultats sous forme cartographique. (Abdelbaki Cherifa, 2016)

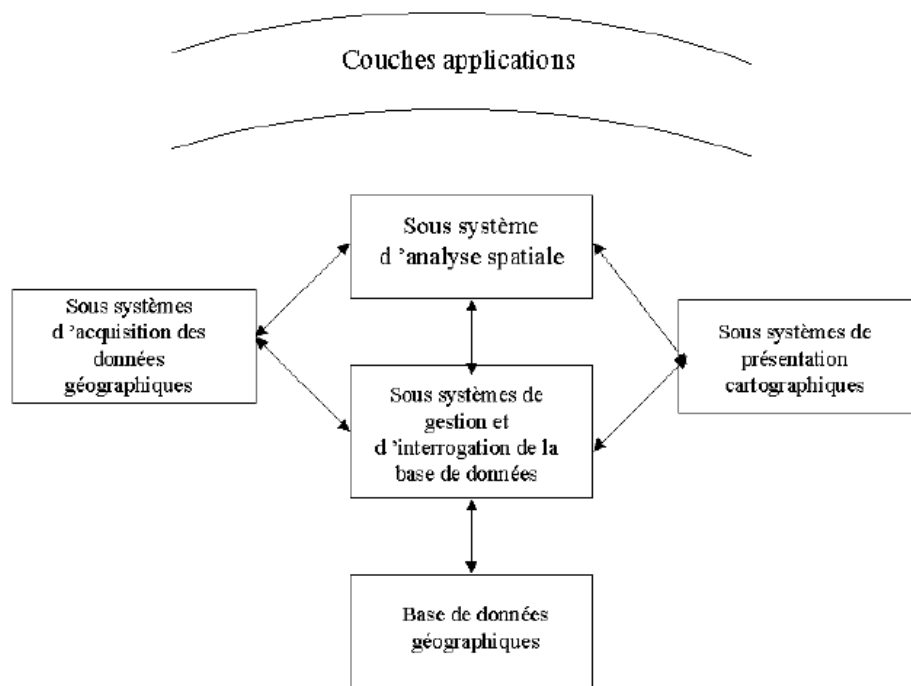


Figure 3. Structure d'un SIG

2.4. Domaines d'applications

Les approches ont mis en évidence le fait qu'un système d'information géographique est un outil de gestion et d'aide à la décision. C'est un outil de gestion pour le technicien qui doit au quotidien assurer le fonctionnement d'une activité. (Polycopié SIG_S2, s. d.)

Le SIG doit aussi être un outil d'aide à la décision pour le décideur (directeur, administrateur) qui doit bénéficier de sa puissance et disposer de cartes de synthèses pour prendre les meilleures décisions. C'est cette finalité qui permet d'employer le terme de système d'information et de donner aux SIG les domaines d'applications suivants :

Pour les grandes échelles

- La gestion foncière et cadastrale (recensement des propriétés, calcul de surfaces)
- La planification urbaine (plan d'occupation des sols et d'aménagement)
- La gestion des transports (voies de circulations, signalisation routière)
- La gestion des réseaux (assainissement, AEP, gaz, électricité, téléphone ...)
- La gestion du patrimoine (espaces verts, parcs, jardins ...)

- Les applications topographiques (travaux publics et génie civil) (Polycopié SIG_S2, s. d.)

Pour les échelles moyennes et petites

- Les études d'impact (implantation d'un centre commercial ou d'une école)
- Les études d'ingénierie routière (constructions de routes ou d'autoroutes)
- Les applications liées à la sécurité civile (prévention des risques naturels et technologiques). - La gestion des ressources naturelles (protection de l'environnement, études géologiques, climatologiques ou hydrographiques).(Polycopié SIG_S2, s. d.)

3. Information géographique :

L'information géographique est le noyau des systèmes d'informations géographiques. Si elle est bien organisée, entretenue permanence et bien représentée, gérée en, elle apporte une idéale aide à la décision.(TELEDETECTION_and_S_I_G, s. d.)

L'information géographique se compose :

- **de données descriptives** (sémantiques, tabulaires ou attributaires)
- **d'objets (géo) graphiques** (Vecteur, Raster = mode maillé ou matriciel).

Les attributs (qualifiant) : nom d'une route, type de bâtiment localisé par son adresse, nombre d'habitants d'un immeuble localisé par ses coordonnées, débit d'un cours d'eau, tension d'une ligne de transport d'énergie, type d'arbres dans un verger localisé par une parcelle etc.

Les objets géographiques : Un système de coordonnées terrestres permet de référencer les objets dans l'espace et de positionner l'ensemble des objets les uns par rapport aux autres.(TELEDETECTION_and_S_I_G, s. d.)

3.1. Composantes de l'information géographique :

Généralement pour qu'un objet spatial soit bien décrit et prêt à être utilisé par un SIG, trois Informations doivent être fournies :

- ❖ **La forme et la localisation de l'objet géographique :** La Localisation de l'objet géographique sur la surface terrestre est exprimée dans un système de coordonnées explicite c'est le niveau géométrique (ex. : coordonnées géographiques de type Longitude-Latitude ou coordonnées cartographiques issues d'une projection cartographique comme la projection Lambert). Un système de coordonnées peut être valable sur tout ou partie de la

surface terrestre ou autre (ex. : le système géodésique mondial WGS84).(TELEDETECTION_and_S_I_G, s. d.)

❖ La forme de l'objet géographique fait référence à des objets de trois types géométriques (Figure 04) :

- Point : est désigné par ses coordonnées et à la dimension spatiale la plus petite.
- Ligne : à une dimension spatiale constituée d'une succession de points proches les uns des autres.
- Polygone (zone ou surface) : est un élément de surface défini par une ligne fermée ou la ligne qui le délimite.(TELEDETECTION_and_S_I_G, s. d.)

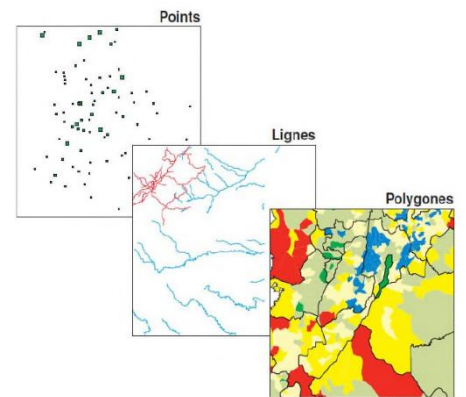


Figure 4. La forme de l'objet géographique

1. L'information relative à un objet décrit par sa

nature, son aspect : c'est les données attributaires (c'est le niveau sémantique). L'ensemble des attributs de l'objet forme ses attributs (ex. : le numéro d'une parcelle cadastrale, le nom d'une route, d'une rivière, d'une commune, etc.) ;(02_GeneralitesSIG_2012, s. d.)

2. **Les relations éventuelles avec d'autres objets ou phénomènes** : c'est le niveau topologique (ex. : la contiguïté entre deux communes, l'inclusion d'une parcelle dans une commune, l'adjacence entre les différents nœuds des tronçons constituant des parcelles cadastrales, etc.)(02_GeneralitesSIG_2012, s. d.)

3.2. Les Modes de représentation de l'information géographique dans un SIG

L'information géographique est représentée on deux modes :

1. Le mode Vecteur
2. Le Mode Raster

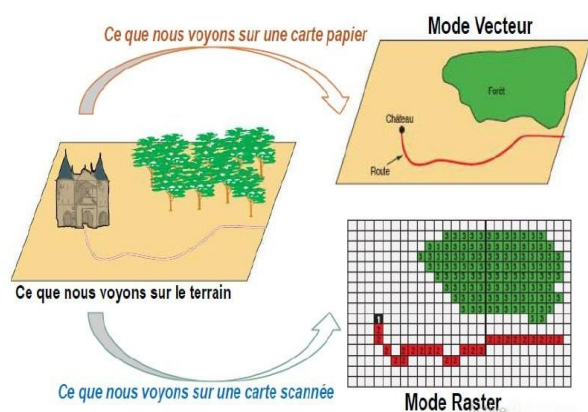


Figure 5. Les Modes de représentation de l'information géographique

3.2.1. Mode vecteur :

Ce mode répond au souci de représenter un objet de manière aussi exacte que possible. Pour transformer un objet réel en une donnée à référence spatiale, on décompose le territoire en couches thématiques (figure ci-dessous) (relief, routes, bâtiments...) structurées dans des bases de données numériques. (Gestion de bases de données et SIG, s. d.)

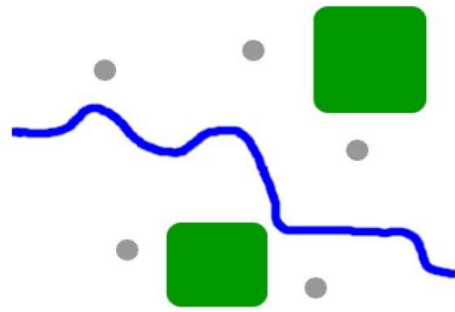


Figure 6. Mode Vecteur

Les avantages du mode vecteur sont :

- ✓ Une meilleure adaptation à la description des entités ponctuelles et linéaires.
- ✓ Une facilité d'extraction de détails.
- ✓ Une simplicité dans la transformation de coordonnées.

Les inconvénients du mode vecteur sont :

- Les croisements de couches d'information sont délicats et nécessitent une topologie parfaite. (Gestion de bases de données et SIG, s. d.)

3.2.2. Mode raster

Le mode raster ou maillé représente l'espace selon un maillage régulier appliqué sur la surface terrestre. Ce maillage se fait sous forme d'une grille formée de cellules de taille prédéterminée aux quelles sont attribuées des valeurs spécifiques. (wikimastersig Raster (Mode) 2015)

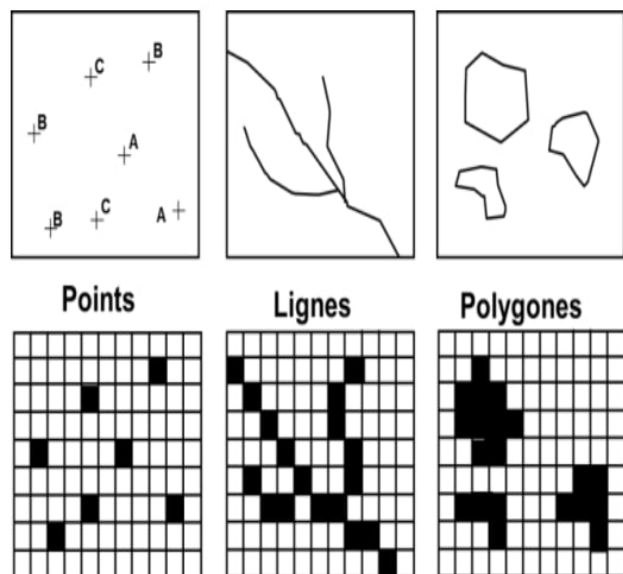


Figure 7. Représentation de mode raster

A chaque cellule est attribuée une valeur qui peut correspondre à une mesure (pollution, altitude), à une catégorie (type de végétation), à l'identifiant d'un objet (code d'une commune, barrage, numéro d'une route, d'une école), à un code couleur issu du scan d'une carte topographique ou à une valeur mesurée par un capteur placé sur un satellite. (wikimastersig Raster (Mode) 2015)

Le mode raster est très utilisé dans le domaine de la télédétection, pour stocker les images qui sont prises sur la surface terrestre.

La grille prend alors le nom d'image et les cellules sont appelées des pixels (les pixels= pictures elements).(wikimastersig Raster (Mode) 2015)

Les avantages du mode raster sont

- Meilleure adaptation à la représentation des détails surfaciques.
- Acquisition des données à partir d'un scanner à balayage.
- Meilleure adaptation à certains types de traitements numériques : filtres, classifications.(Gestion de bases de données et SIG, s. d.)

Les inconvénients du mode raster sont :

- Mauvaise adaptation à la représentation des détails linéaires.
- Obligation de parcourir toute la surface pour extraire un détail.
- Impossibilité de réaliser certaines opérations topologiques, la recherche du plus court chemin dans un réseau par exemple.(Gestion de bases de données et SIG, s. d.)

Remarque : Ces deux modes sont complémentaires. Le raster est mieux adapté à certains types d'applications (télédétection) et apporte une réponse économique à certains besoins.

4. Coordonnées d'un objet géographique et Géoréférencement

4.1. Coordonnées d'un objet géographique

Les bases de données qui alimentent les SIG doivent être géoréférencées, c'est à dire partager un cadre commun de repérage appelé système de projection. (Gestion de bases de données et SIG, s. d.)

L'objectif de mise en relation sur la localisation impose un référentiel commun et des précisions connues pour l'attribut de localisation. (Gestion de bases de données et SIG, s. d.)

Toutes les coordonnées des objets d'une base de données doivent pouvoir être exprimées ou transformées dans un même système pour pouvoir être comparées.

Deux (02) Types de systèmes de coordonnées sont utilisés dans un SIG. (Gestion de bases de données et SIG, s. d.)

- ❖ Système de coordonnées Géographiques : latitude et longitude (valeurs angulaires)
- ❖ Système de coordonnées planes ou projetées : représentation cartographique plane (valeurs métriques)

4.2. Représentations planes en Algérie

Projection UTM :

La représentation cartographique plane en vigueur adoptée en l'Algérie en 2003 est l'UTM (Universel Transverse Mercator). (Gestion de bases de données et SIG, s. d.)

UTM est une projection cylindrique conforme de l'ellipsoïde terrestre.

L'Algérie s'étale de l'Ouest à l'Est sur quatre fuseaux : le 29, 30, 31 et 32, soit de 9° à l'Ouest du méridien d'origine et à 12° à l'Est du méridien d'origine. (Gestion de bases de données et SIG, s. d.)

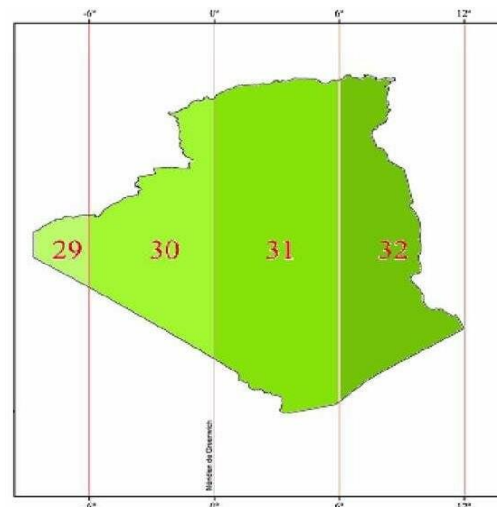


Figure 8. Projection UTM D'Algérie

Projection Lambert :

Il s'agit d'une projection conique conforme de l'ellipsoïde terrestre sur un cône tangent à un parallèle. (Gestion de bases de données et SIG, s. d.)

L'Algérie est découpée en deux zones :

- ❖ Une projection appelée « Lambert Nord » qui couvre le nord de l'Algérie.
- ❖ Une projection appelée « Lambert Sud » qui couvre le sud de l'Algérie. (Gestion de bases de données et SIG, s. d.)

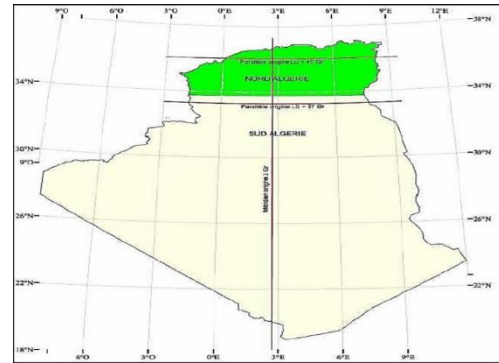


Figure 9. Projection Lambert D'Algérie

4.3. Principe du géoréférencement

Il s'agit d'opérations effectuées sur les images (cartes, plans, etc...) avant leur intégration dans un SIG. (Gestion de bases de données et SIG, s. d.)

Le **géoréférencement** consiste à appliquer un système de coordonnées à ces images afin de les mettre à l'échelle (dans un système donné). Ces images doivent être naturellement redressées au préalable. (Gestion de bases de données et SIG, s. d.)

Points de calage

Les points de calage sont des points dont les coordonnées cartographiques sont connues et utilisées pour géoréférencer ou caler une carte. (Gestion de bases de données et SIG, s. d.)

- ❖ La qualité du géoréférencement dépendra de la précision de la localisation des points de calage, de leur nombre ainsi que de leur répartition.
- ❖ Il en faut au minimum quatre (04) points.
- ❖ Plus les points sont nombreux, plus le géoréférencement est précis, mais attention : il ne faut pas sacrifier à leur nombre la qualité et le degré de confiance dans les points.
- ❖ Plus ces points sont distants et forment une surface importante (les points proches de l'alignement font des géoréférencements médiocres), plus l'image finale sera proche de la réalité du terrain (Gestion de bases de données et SIG, s. d.)

Erreur RMS

A la fin du géoréférencement le logiciel va calculer une moyenne (EQM l'Erreur Quadratique Moyenne ou RMS Root Mean Square) permettant de juger de la qualité du géoréférencement. Ce coefficient représente l'écart moyen entre les coordonnées vraies d'un point et ses coordonnées calculées par le logiciel. (Gestion de bases de données et SIG, s. d.)

5. SIG 3D

Les SIG gèrent des données vectorielles et matricielles. D'une manière générale, les données vectorielles peuvent être des points (0D), des lignes (1D), des polygones (2D) ou des volumes (3D).(Mohamed, 2014)

La troisième dimension :

La modélisation du terrain intervient dans plusieurs domaines. La cartographie, l'étude du terrain ou le déplacement de robots dans un environnement extérieur exigent la connaissance des variations d'altitude du terrain (c'est-à-dire de son relief).(Mohamed, 2014)

5.1. Le Modèle Numérique de Terrain (MNT)

C'est une représentation 3D de la surface d'un terrain ou d'un plan. Chaque paire de x et de y est associée à un z, ce qui crée un « squelette » en relief.(Mohamed, 2014)

À partir de MNT, nous pouvons créer des produits dérivés tels que des courbes de niveau, des altitudes, des plans d'étage, des calculs panoramiques, des plans de visibilité et des profils de terrain(Mohamed, 2014)

Utilisation de MNT :

- Extraction des paramètres de terrain
- Profils topographiques tracés
- Modulation du débit d'eau ou de la masse en mouvement (par exemple, avalanches et glissements de terrain).
- Création de cartes de secours
- Planification volumique 3D
- Simulation de volume(Mohamed, 2014)

5.2. Le modèle d'élévations numérique (MNE)

Il s'agit d'une d'élévations sur un terrain comprenant des plantes et des bâtiments(Mohamed, 2014)

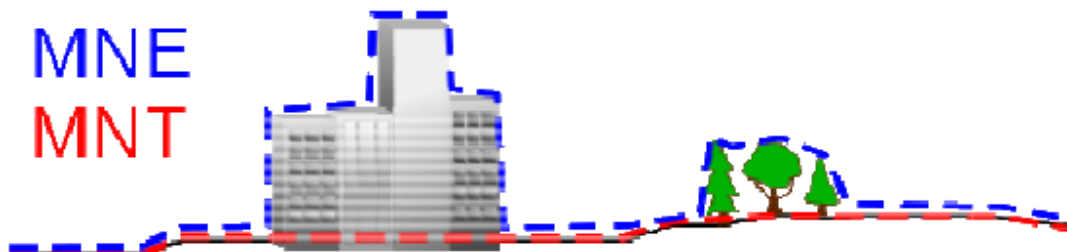


Figure 10. La difference entre MNT et MNE

Conclusion

Les systèmes d'information géographique (SIG) constituent un outil essentiel pour l'analyse des données spatiales et la prise de décision basée sur des connaissances précises. Ils permettent d'intégrer des données géographiques et descriptives dans un environnement analytique unique, facilitant les requêtes ciblées, la visualisation interactive et la modélisation réaliste des espaces urbains et environnementaux.

Une maîtrise approfondie des composantes et des fonctions des SIG nous permet de les exploiter de manière efficace et polyvalente dans divers domaines, tels que le suivi des transformations urbaines, l'analyse des structures territoriales ou encore la proposition de solutions applicables fondées sur des données fiables.

Chapitre III : TELEDETECTION

1. Introduction

La télédétection est une discipline scientifique et technique qui permet d'acquérir des informations sur la surface terrestre sans contact direct, à l'aide de capteurs embarqués sur des plateformes aériennes ou spatiales. Elle repose sur la détection et l'enregistrement de l'énergie électromagnétique réfléchie ou émise par les objets à la surface de la Terre, ce qui permet d'en analyser les caractéristiques physiques et biologiques.

Depuis les premières images satellitaires dans les années 1970 avec le lancement de la série Landsat, la télédétection a connu un développement considérable, tant au niveau de la résolution spatiale et spectrale des capteurs que des méthodes d'analyse. Aujourd'hui, elle constitue un outil fondamental dans plusieurs domaines : la cartographie, la gestion des ressources naturelles, le suivi de l'environnement, la prévision des catastrophes naturelles, ou encore l'aménagement du territoire (REMOTE SENSING AND IMAGE INTERPRETATION, s. d.) Ce chapitre vise à introduire les fondements de la télédétection, en abordant les principes physiques de l'interaction rayonnement/matière, les caractéristiques des capteurs..., ainsi que les principales techniques de traitement et d'interprétation des données. L'objectif est de fournir au lecteur une base solide pour comprendre les applications actuelles de la télédétection dans divers contextes géographiques et scientifiques.

2. Définition

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

La télédétection est le fruit de l'interaction entre *trois* éléments fondamentaux :

Une source d'énergie, une cible et un vecteur.

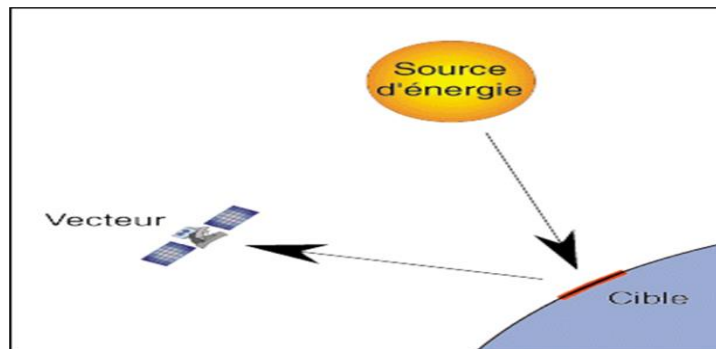


Figure 11. Les Trois éléments fondamentaux de télédétection

Formes d'acquisition d'information par les capteurs (cours télédétection, s. d.)

- Réflexion (a)
- Émission (b)
- Émission-réflexion (c).

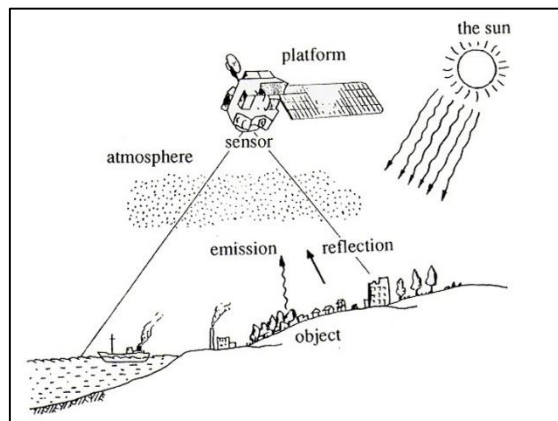


Figure 12. Formes d'acquisition d'information par les capteurs

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.(Notions fondamentales, s. d.)

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.(Notions fondamentales, s. d.)

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.(Notions fondamentales, s. d.)

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.(Notions fondamentales, s. d.)

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).(Notions fondamentales, s. d.)

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.(Notions fondamentales, s. d.)

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.(Notions fondamentales, s. d.)

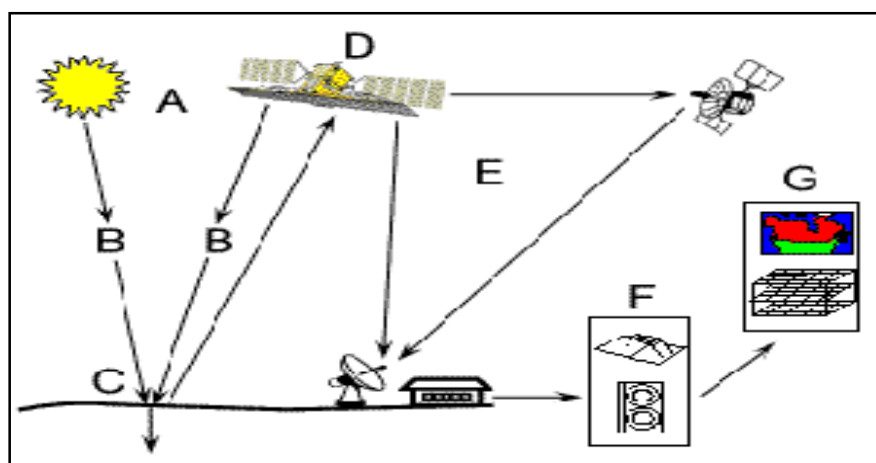


Figure 13. Processus de télédétection

3. Types de télédétection

3.1. Télédétection Passive (images optiques)

Le vecteur ne fait que capter le rayonnement réfléchi. La lumière du soleil se réfléchit sur la terre qui émet à son tour un rayonnement vers le capteur. (cours télédétection, s. d.)

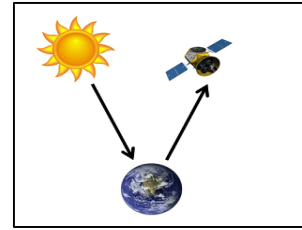


Figure 14.
Télédétection Passive

3.2. Télédétection Active (images radars)

Le vecteur émet une onde vers la cible et en mesure l'écho, cas du LIDAR (Light Detection and Ranging) utilisant une source laser et le RADAR (Radio Detection And Ranging) utilisant une source hyperfréquence. (cours télédétection, s. d.)

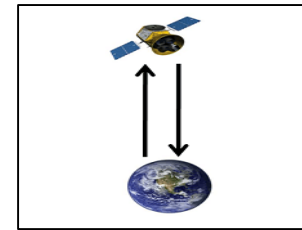


Figure 15.
Télédétection Active

4. LES DOMAINES D'APPLICATION DE LA TELEDETECTION

Étude de l'atmosphère (météorologie et climatologie)

La télédétection permet une couverture globale et fréquente de la Terre, essentielle pour la météorologie. Les satellites géostationnaires (à 36 000 km) fournissent des images régulières de vastes zones, tandis que les satellites en orbite polaire (à 900 km) offrent une meilleure précision. Les capteurs observent les nuages, mesurent les températures et la vapeur d'eau, et étudient la composition de la stratosphère (comme l'ozone). Ces données alimentent les modèles de prévision météorologique et d'évolution climatique. (LA TÉLÉDÉTECTION AÉRO-SPATIALE, s. d.)

Océanographie

La télédétection offre une vision synoptique des océans, difficile à obtenir par des moyens traditionnels. Les satellites météorologiques et océanographiques (comme ERS-1 ou TOPEX-Poseidon) utilisent des radiomètres visibles et infrarouges pour analyser la couleur de l'eau, la température de surface, la turbidité et les courants. Les radars permettent d'étudier les vagues et la dynamique océanique, tandis que les altimètres mesurent avec précision la hauteur de la surface de la mer. La télédétection est également utilisée pour étudier les glaces de mer polaires. (LA TÉLÉDÉTECTION AÉRO-SPATIALE, s. d.)

Applications terrestres

La télédétection terrestre couvre des domaines variés comme la cartographie, la géologie, l'agriculture, l'urbanisme et la surveillance des forêts. Les photographies aériennes, souvent numérisées, sont encore largement utilisées, mais les radiomètres optiques à haute résolution (comme ceux de Landsat ou SPOT) dominent désormais. Les radars imageurs, notamment aéroportés, sont utiles pour la géologie et l'étude de la végétation. Le traitement d'images satellitaires numériques est en plein essor, favorisé par la baisse des coûts informatiques. (LA TÉLÉDÉTECTION AÉRO-SPATIALE, s. d.)

5. Bases physiques de la télédétection

- LE RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Le rayonnement électromagnétique est une forme de **propagation de l'énergie** dans la nature, dont la forme qui nous est la plus familière est la lumière visible telle que la perçoit l'œil humain. Historiquement, la physique spécialisée dans l'étude du rayonnement (optique) est née de l'étude de la propagation de la lumière et de ses interactions avec les matériaux (optique géométrique). Le rayonnement a été ensuite reconnu par les physiciens comme un phénomène ondulatoire, en relation avec l'électricité et le magnétisme (optique électromagnétique) ; cette perspective a permis d'étendre considérablement le champ des connaissances sur le spectre du rayonnement électromagnétique, bien au-delà de la lumière visible. Enfin, la physique moderne a montré que le rayonnement électromagnétique pouvait également être considéré comme un déplacement de particules élémentaires représentant une quantité d'énergie (optique énergétique et quantique). (LA TÉLÉDÉTECTION AÉRO-SPATIALE, s. d.)

- Les ondes électromagnétiques :

Une onde électromagnétique correspond à la vibration simultanée dans l'espace d'un champ électrique et d'un champ magnétique. Une onde électromagnétique est une onde progressive et transversale ; le sens de la variation des champs est perpendiculaire à la direction de propagation (LA TÉLÉDÉTECTION AÉRO-SPATIALE, s. d.)

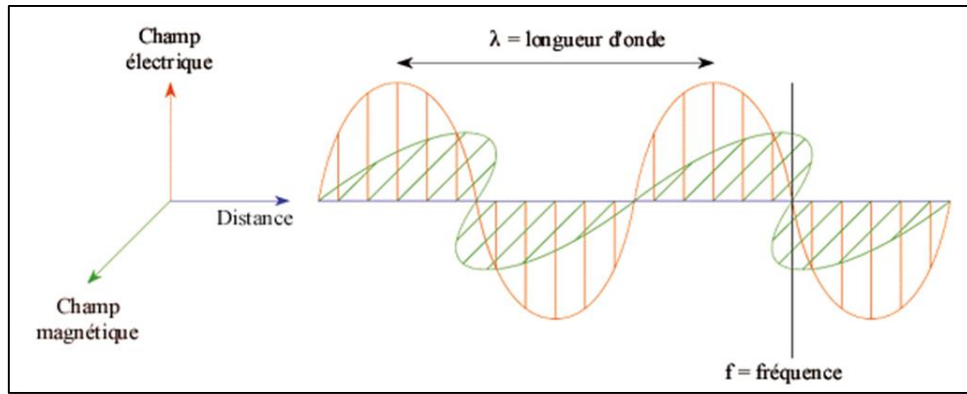


Figure 16. Caractéristique d'onde électromagnétique

La période T : c'est le temps au bout duquel le champ électrique ou magnétique retrouve sa valeur à partir d'un instant quelconque, c'est à dire effectue un cycle. L'unité est la seconde. (LA TÉLÉDÉTECTION AÉRO-SPATIALE, s. d.)

La fréquence, désignée par la lettre ν : c'est le nombre de cycles par unité de temps. L'unité de fréquence est l'Hertz (Hz). Un Hz équivaut à un cycle par seconde. Les ondes utilisées en télédétection se caractérisent par des fréquences très élevées mesurées en multiples du Hz (kHz, MHz ou GHz –gigahertz). (LA TÉLÉDÉTECTION AÉRO-SPATIALE, s. d.)

Longueur d'onde : la distance entre deux points homologues (deux crêtes ou deux creux) qu'on note λ (m). (LA TÉLÉDÉTECTION AÉRO-SPATIALE, s. d.)

- Entre la longueur d'onde et la fréquence existe la relation classique:

$$c = \nu(\text{hz}) \times \lambda(\text{m})$$

Où c est la vitesse de propagation du rayonnement dans le vide (vitesse de la lumière):

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

Il est à noter que la fréquence d'un rayonnement électromagnétique est invariable, alors que la vitesse de propagation, et donc la longueur d'onde, peut être modifiées lors du passage d'un milieu à un autre. C'est la raison pour laquelle, il vaut toujours mieux caractériser le rayonnement électromagnétique par sa fréquence, même si l'utilisation de la longueur d'onde est la plus répandue... (LA TÉLÉDÉTECTION AÉRO-SPATIALE, s. d.)

La polarisation, c'est à dire l'orientation du champ électrique dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation. La lumière visible (rayonnement solaire) est non-polarisée, c'est à dire qu'elle n'a pas d'orientation privilégiée dans ce plan. En revanche, la polarisation du

rayonnement doit être prise en compte en télédétection micro-ondes (capteurs passifs et radars).(LA TÉLÉDÉTECTION AÉRO-SPATIALE, s. d.)

L'amplitude de l'onde qui conditionne l'intensité du rayonnement ; plus l'amplitude est forte plus le flux d'énergie est intense.(LA TÉLÉDÉTECTION AÉRO-SPATIALE, s. d.)

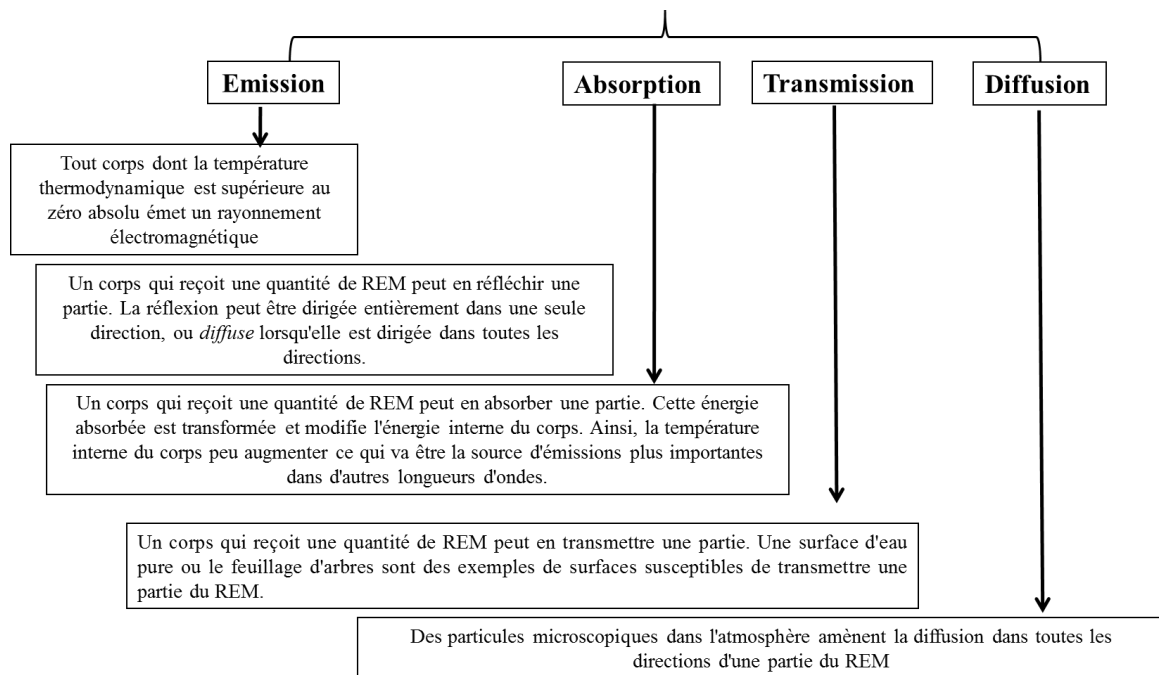


Figure 17. Propriéter des ondes électromagnétiques

- Propriétés du REM : Absorption, Réflexion, Transmission

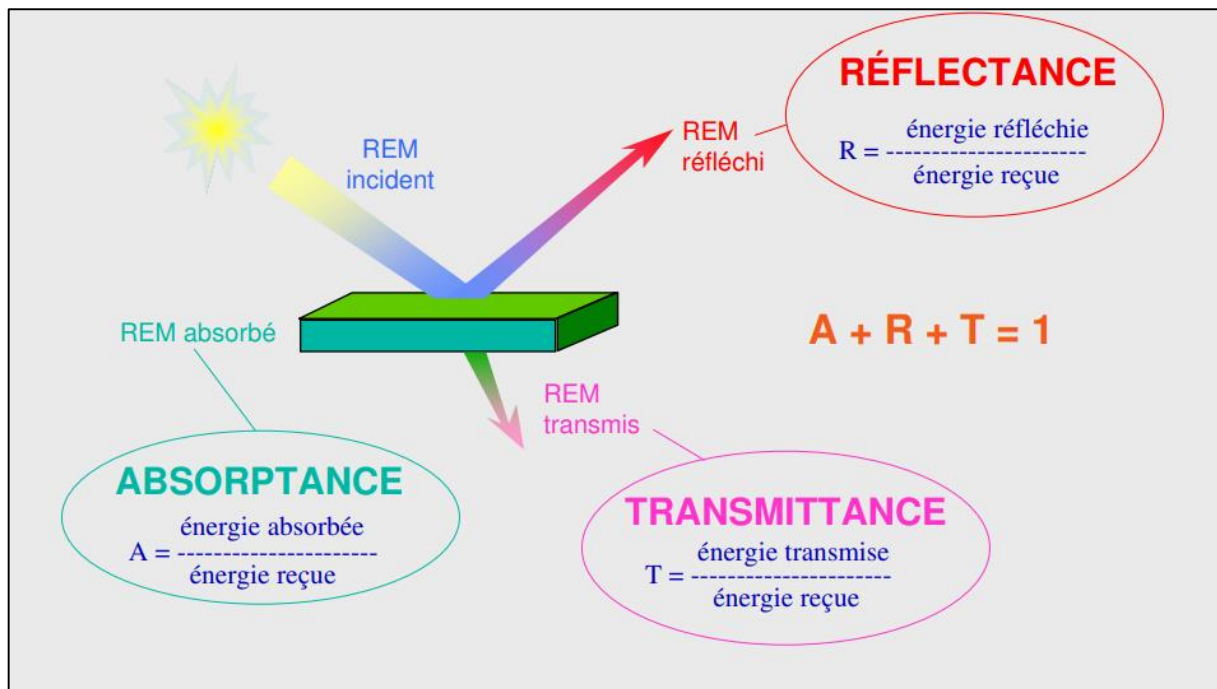


Figure 18. Propriétés du REM

$REM = REM \text{ réfléchi} + REM \text{ absorbé} + REM \text{ Transmis}$ (cours télédétection, s. d.)

6. SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

- Résultat de la décomposition du rayonnement électromagnétique en ses fréquences constituantes. (LA TÉLÉDÉTECTION AÉRO-SPATIALE, s. d.)
- lorsque la lumière passe à travers un prisme, elle se décompose en plusieurs couleurs constituantes (LA TÉLÉDÉTECTION AÉRO-SPATIALE, s. d.)

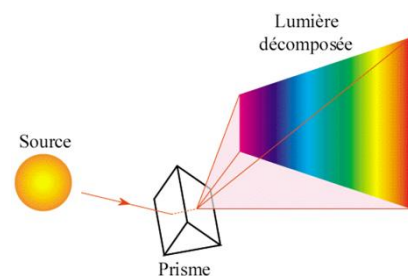


Figure 19. SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Le rayonnement électromagnétique, d'origine naturelle ou artificielle, existe pour une gamme très étendue de fréquences ou de longueurs d'onde (de 10^{-9}m à 10^5m), qui constitue le spectre électromagnétique. (LA TÉLÉDÉTECTION AÉRO-SPATIALE, s. d.)

Une partie très limitée de ce spectre, entre 0,390 μm (390 nm) et 0,7 μm (700 nm), constitue la lumière visible à laquelle est sensible l'oeil humain. Une décomposition en fonctions des longueurs d'onde de la lumière visible (lumière blanche) aboutit à distinguer les lumières colorées : violet (390 à 450 nm), bleu (450 à 490 nm), vert (490 à 580 nm), jaune (580 à 600 nm), orange (600 à 620 nm) et rouge (620 à 700 nm). Les longueurs d'onde inférieures à 390 nm (ou les fréquences supérieures à celle du violet) ne sont pas perçues par l'oeil humain: il s'agit du rayonnement ultra-violet. De même, les longueurs d'onde supérieures à 700 nm, également non-perçues par l'oeil humain, constituent le domaine infrarouge. (LA TÉLÉDÉTECTION AÉRO-SPATIALE, s. d.)

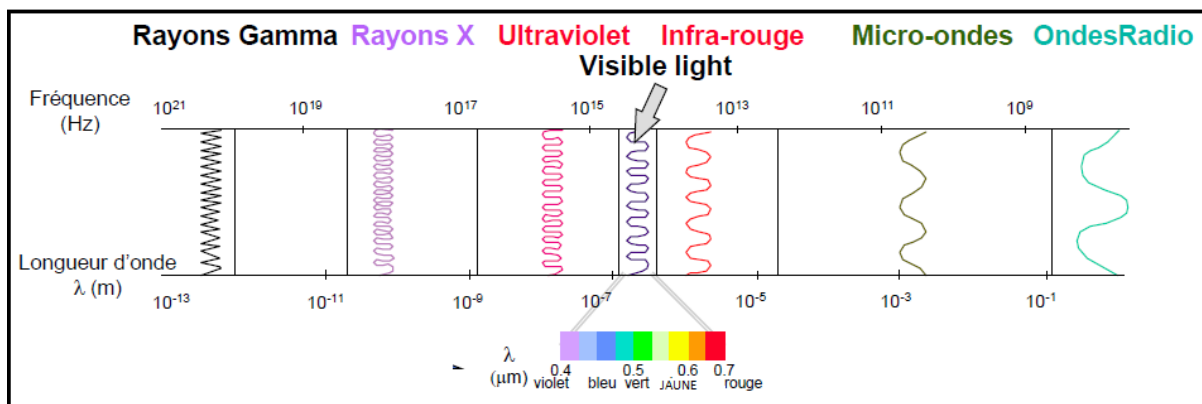


Figure 20. Caractéristique du rayonnement ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Les sources du rayonnement varient également selon le domaine du spectre :

- le rayonnement ultraviolet, visible ou infrarouge est émis par les corps, objets ou surfaces en fonction de leur température : rayonnement solaire (U.V., visible et proche infrarouge), rayonnement terrestre (infrarouge thermique). (LA TÉLÉDÉTECTION AÉRO-SPATIALE, s. d.)
- les rayonnements de très courte longueur d'onde (rayons gamma, rayons X) sont produits par les restructurations des noyaux des atomes (radioactivité). (LA TÉLÉDÉTECTION AÉRO-SPATIALE, s. d.)
- les rayonnements visibles, infrarouge ou microonde peuvent être produits artificiellement par vibration ou rotation des molécules (fluorescence, lasers, four à microondes).
- les rayonnements de grande longueur d'onde sont produits par des oscillations électroniques (antennes). (LA TÉLÉDÉTECTION AÉRO-SPATIALE, s. d.)

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.(cours télédetection, s. d.)

Les types d'orbites:(cours télédetection, s. d.)

Tableau 2. Les Types d'orbites

<i>Orbites Géostationnaires</i>	<i>Orbites à Défilement et Héliosynchrones</i>
Altitudes : 36000 Km Vitesse de rotation angulaire identique à celle de la terre Orbite équatoriale et quasi circulaire Faible résolution spatiale Très haute répétitivité	Altitudes : 600 à 1000 Km Vitesse de rotation rapide (ex : Spot, 1 tour en 101 mn) Orbite polaire et quasi circulaire Haute résolution spatiale Bonne répétitivité Orbite phasée et héliosynchrone Très bonne couverture

8. Images satellitaires

C'est une matrice de pixels.

Le terme de pixel étant la plus petite surface homogène constitutive d'une image.

Image de 5 pixels de côté (5 lignes et 5 colonnes, soit 25 pixels)(cours télédétection, s. d.)

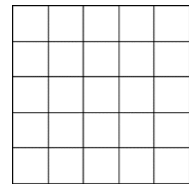


Figure 21. matrice de pixels

Chaque pixel possède une valeur radiométrique représentant la moyenne des mesures radiométriques effectuées sur la surface qu'il représente sur le terrain Association entre le contenant du pixel (sa géométrie) et son contenu (sa valeur radiométrique).(cours télédétection, s. d.)

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 22. Valeur radiométrique

Les mesures les plus fortes sont codées en blanc et les plus faibles en noir, générant ainsi un dégradé de gris. Chacun des pixels est coloré en fonction de sa valeur radiométrique, ce qui construit au final une image.(cours télédétection, s. d.)

Valeurs radiométriques entre 0 y 255: - 0 (0% de réflexion): Noir

- 255 (100% réflexion): Blanc

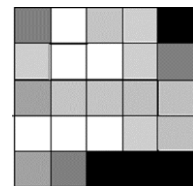


Figure 23. Visualisation des valeurs radiométriques

Ces matrices de valeurs radiométriques peuvent être visualisées :

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

Une image satellite est caractérisée par:(cours télédétection, s. d.)

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

- **Résolution spatiale ou géométrique :**

Distance la plus petite permettant de discriminer deux objets voisins. S'exprime en mètres (m) ou en kilomètres (Km) et mesure-le coté d'un pixel.(cours télédetection, s. d.)

Grande Résolution : centaines de mètres voire plusieurs kilomètres.

Fine Résolution :

Quelques dizaines de mètres à un mètre

Identification des réseaux de communication

Distinguer des objets spatiaux de petite taille (bâtiments, petites parcelles agricoles)(cours télédetection, s. d.)

- **Résolution temporelle ou répétitivité**

- Correspond à la période entre deux acquisitions de la même scène.

- Cette résolution ne dépend pas du capteur mais de l'orbite et du mode de manœuvre du satellite.

- Le satellite SPOT offre la possibilité d'assurer une excellente résolution temporelle. La résolution temporelle de SPOT est de 26 jours, 16 jours pour LANDSAT TM et 14.5 jours pour NOAA-AVHRR.(cours télédetection, s. d.)

- **Résolution spectrale**

Correspond aux bandes de longueurs d'onde auxquelles les capteurs sont sensibles

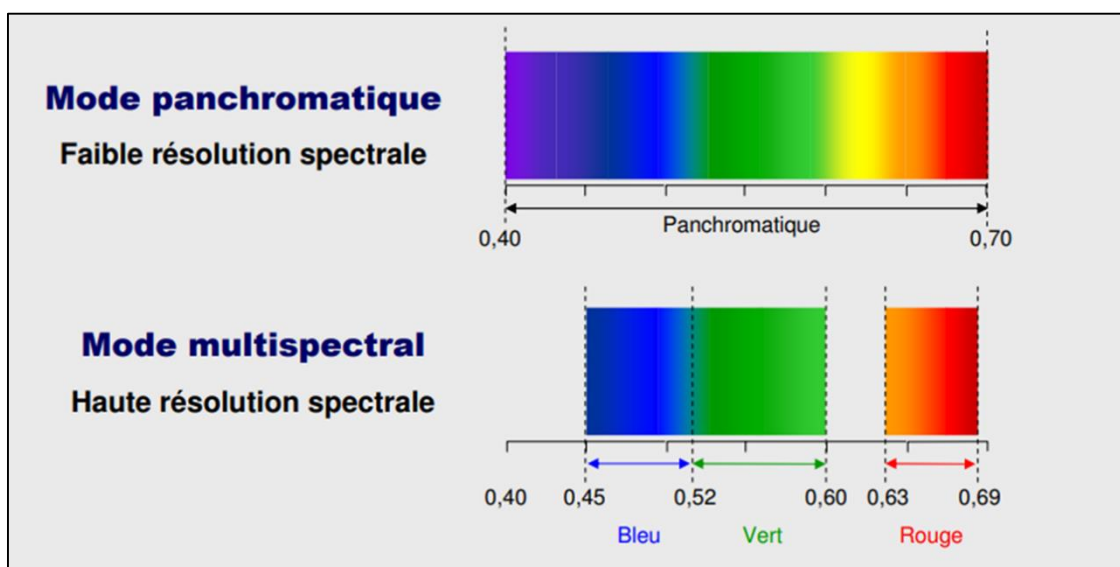


Figure 24. Les deux modes de la résolution spectrale

Est l'aptitude du capteur à distinguer des rayonnements électromagnétiques de fréquences différentes. Plus le capteur est sensible à des différences spectrales fines, plus la résolution spectrale du capteur est élevée. (cours télédetection, s. d.)

Plus la résolution spectrale est élevée, plus l'intervalle de longueurs d'onde est fin pour une bande ou un canal donné.

Il est préférable d'avoir trois bandes spectrales : vert, bleu et rouge, qu'une seule bande spectrale visible.

- **Résolution radiométrique et numérique**

La capacité de reconnaître de petites différences dans le spectre électromagnétique.

Plus la résolution radiométrique d'un capteur est fine, plus le capteur est sensible à de petites différences dans l'intensité de l'énergie reçue. (cours télédétection, s. d.)

La résolution numérique est très liée à la résolution radiométrique.

Chaque quantité d'énergie mesurée en kilojoules est transformée en compte numérique ou valeurs radiométrique.

Plus la gamme des comptes numériques est étendue, plus la résolution numérique est grande.

Ainsi, dans la plupart des images, la gamme possible est de 255 valeurs.

8.1. Représentation des données

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. (Cour tldF, s. d.)



Figure 25. Représentation par Image

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. (Cour tldF, s. d.)

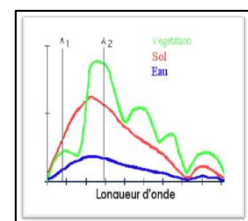


Figure 26. Représentation par signature spectral

8.2. 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. (Cour tldF, s. d.)

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)

Chaque couleur est une combinaison singulière des trois couleurs primaires

Blanc addition des trois couleurs primaires à intensité maximale.(CTeledetection, s. d.)

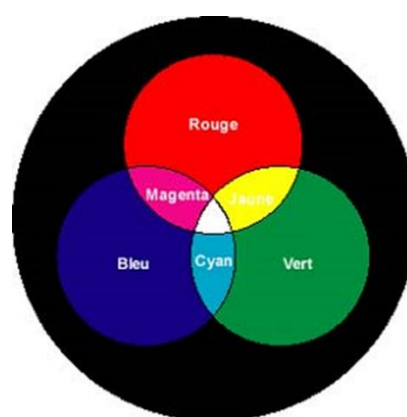


Figure 27. Le codage RVB

Les types de composition

Tableau 3. Les types de composition

(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

8.3. Prétraitement des images

Il s'agit d'un processus de traitement numérique appliqué aux images satellitaires brutes exposées à diverses sources de distorsion afin de les rendre plus exploitables pour des analyses ultérieures.(Cour tldF, s. d.)

Les corrections de des distorsions peuvent être classées en deux catégories:

- 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.(cours télédétection, s. d.)
- 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.(cours télédétection, s. d.)

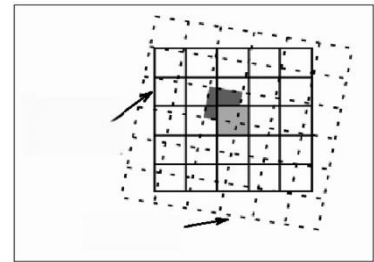


Figure 28. Corrections géométriques

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

9. CLASSIFICATION DE L'IMAGE

Il existe deux types de classification d'image :

- La classification supervisée
- La classification non supervisée.

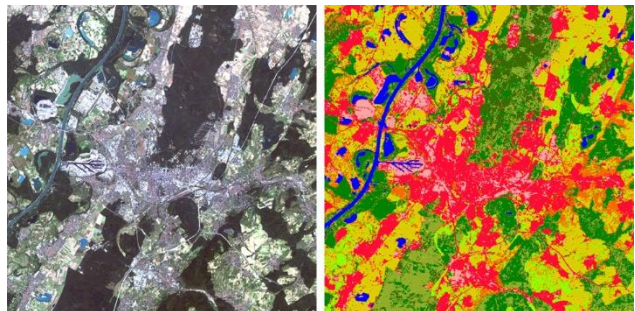


Figure 29 . Les types de classification d'image

9.1. Classification non supervisée

La classification non supervisée est une méthode d'analyse d'image qui regroupe automatiquement les pixels en différentes classes en fonction de leur similarité spectrale, sans connaissance préalable du terrain. Elle est généralement utilisée dans des contextes exploratoires ou lorsque les classes d'occupation du sol ne sont pas connues à l'avance. (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2015)

9.2. Classification supervisée

La classification supervisée repose sur la sélection d'échantillons représentatifs par un analyste, afin de former un ensemble d'apprentissage qui servira à identifier les classes d'information dans l'image. Grâce à l'algorithme de classification, l'ordinateur génère une signature spectrale propre à chaque classe, permettant ainsi une classification précise. Ce procédé est particulièrement adapté aux données d'occupation du sol (LULC - Land Use and Land Cover), qui nécessitent une différenciation claire entre les catégories telles que les zones urbaines, agricoles ou forestières. (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2015)

10. Les indices de télédétection

Les indices spectraux sont utilisés pour mettre en évidence des caractéristiques ou des phénomènes spécifiques dans les images de télédétection, Nous créons des indices spectraux en transformant les données spectrales en utilisant des rapports entre les bandes pour réduire les données en informations significatives. (Indices gallery, s. d.)

Il existe une très grande variété d'indices qui s'appliquent à des études sur la végétation, les sols, le milieu urbain, le milieu géologie ...etc. (Indices gallery, s. d.)

10.1. Les indices de végétation

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

La végétation:

- Réfléchit fortement dans le Proche Infra Rouge (Canal PIR)
- Et absorbe fortement dans le Rouge (Canal Rouge, R)

- Les autres types de surface comme le sol nu et l'eau ont des réflectivités presque égales dans ces deux zones du spectre.

Il est donc facile de différencier la végétation des autres types de surface en utilisant cette transformation.(Indices gallery, s. d.)

NDVI

(En anglais Normalized Difference Vegetation Index) L'indice de végétation par différence normalisé est l'indice le plus utilisé, il permet de mesurer l'intensité de vert des forêts d'une zone donnée. Sa formule est la suivante :(Indices gallery, s. d.)

$$NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R}$$

Indice normé qui va de -1 à +1

- de [0 ; +1] c'est une végétation de+ en + couvrante et active
- de [-1 ; 0] ce sont les eaux et les zones humides
- autour de 0 ce sont les sols nus (Indices gallery, s. d.)

NDWI

(Normalized Difference Water Index) Indice de stress hydrique Il permet de déceler lorsque les végétaux sont en état de stress hydrique et sont par conséquent très utiles pour le suivi de la végétation en zone sèche. Il utilise la bande spectrale du moyen infrarouge à la place de la bande rouge.(Indices gallery, s. d.)

Cet indice varie en fonction de la teneur en eau des feuilles.

$$NDWI = \frac{PIR - MIR}{PIR + MIR}$$

MIR est la réflectance dans la bande infrarouge moyenne.

PIR est la réflectance dans la bande proche infrarouge.(Indices gallery, s. d.)

ARVI (Atmospherically Resistant Vegetation Index)

L'indice ARVI est un indice de végétation utilisé en télédétection pour améliorer la précision de l'estimation de la couverture végétale, notamment dans les zones affectées par des perturbations atmosphériques telles que la poussière ou la fumée, qui réduisent l'effet des aérosols

atmosphériques sur les images satellites, en particulier dans la bande bleue, qui est la plus sensible à la diffusion par les particules atmosphériques.(Indices gallery, s. d.)

$$ARVI = NIR - (2R-B) / PIR + (2R- B)$$

- NIR : proche infrarouge (Near Infrared)

- R : bande rouge

- B : bande bleue

Remarque : - Le NDVI ne prend pas suffisamment en compte les effets atmosphériques.

- L'ARVI est conçu pour être plus résistant aux perturbations atmosphériques, ce qui le rend plus fiable dans des conditions atmosphériques instables.(Indices gallery, s. d.)

10.2. Les Indices hydrographiques

Les indices hydrographiques en télédétection sont des indices spectraux utilisés pour la détection et la délimitation des surfaces en eau (comme les rivières, les lacs, les zones humides...) à partir d'images satellitaires. Ils exploitent les propriétés spectrales spécifiques de l'eau, notamment sa forte absorption dans le proche infrarouge (NIR) et sa faible réflectance dans le visible, en particulier dans la bande bleue.(Indices gallery, s. d.)

Exemples d'indices hydrographiques :

L'indice NDMI :

Indice d'humidité par différence normalisé, cet indice est utilisé pour surveiller les niveaux de sécheresse.(Indices gallery, s. d.)

$$NDMI = PIR - IRC1 / PIR + IRC1$$

PIR est la réflectance dans la bande proche infrarouge.

IRC1 est la réflectance dans la première bande infrarouge à onde courte.

10.3. Les indices paysagers

Les indices paysagers sont des mesures quantitatives utilisées en écologie du paysage (écologie spatiale) pour analyser la structure spatiale d'un paysage donné. Ils permettent de quantifier la composition, la configuration et la dynamique des éléments du paysage, comme les forêts, les zones agricoles, les zones urbaines, les plans d'eau, etc.(Indices gallery, s. d.)

L'indice NDBI:

L'indice d'urbanisation par différence normalisé (NDBI) utilise les canaux proches infrarouges et infrarouges à onde courte pour mettre en évidence les agglomérations.(Indices gallery, s. d.)

$$NDBI = (IRC - PIR) / (IRC + PIR)$$

11. Occupation et couverture du sol (Land Use and Land Cover)

Les termes **occupation du sol** (*Land Use*) et **couverture du sol** (*Land Cover*) sont souvent confondus et utilisés de manière interchangeable dans la littérature scientifique ainsi que dans la pratique quotidienne. Il est donc essentiel de bien les définir et de comprendre leur signification afin de les utiliser de manière correcte, pertinente et efficace.(Antonio Di Gregorio , 2005, s. d.)

La **couverture du sol** se réfère à l'ensemble des éléments biotiques (vivants) et abiotiques (non vivants) observables à la surface de la Terre et dans la couche immédiate du sous-sol, selon la définition de Meyer et Turner (1992). Parmi les types de couverture du sol les plus courants, on retrouve : les forêts, les zones arbustives, les prairies, les terres cultivées, les terres stériles, la neige et la glace, les zones urbaines, ainsi que les plans d'eau (y compris les eaux souterraines). Ainsi, ce concept ne se limite pas uniquement à la végétation qui recouvre le sol, mais englobe également les structures humaines comme les routes, les bâtiments, ainsi que certaines caractéristiques du sous-sol comme les nappes phréatiques.(Antonio Di Gregorio , 2005, s. d.) Quant à l'**occupation du sol**, elle se définit comme la manière dont l'homme utilise ou exploite un territoire donné. En d'autres termes, la couverture du sol constitue la manifestation visible de l'occupation du sol.(Antonio Di Gregorio , 2005, s. d.) Par exemple, une parcelle recouverte de végétation peut être identifiée comme une forêt à partir d'observations au sol ou d'images satellites ; cependant, cette même forêt peut être utilisée à des fins de production, de loisirs, de conservation ou même à des fins religieuses. En somme, la couverture du sol représente l'aspect physique observable, tandis que l'occupation du sol repose sur la fonction ou l'objectif socio-économique de l'utilisation de la terre. Une parcelle de terrain peut n'avoir qu'un seul type de couverture (par exemple une forêt), mais peut remplir plusieurs usages (récréatif, éducatif, écologique...)(Antonio Di Gregorio , 2005, s. d.)

Changements dans la couverture et l'occupation du sol (Land-Cover and Land-Use Change)

Les changements dans la couverture du sol peuvent être classés en deux grandes catégories : **la conversion** et **la modification**.

La **conversion** consiste en un changement d'une catégorie de couverture à une autre, par exemple la transformation d'une zone agricole en zone urbaine.(Antonio Di Gregorio , 2005, s. d.)

La **modification**, quant à elle, désigne un changement de condition au sein d'une même catégorie de couverture, comme la dégradation forestière. Selon Meyer et Turner (1994), cette dégradation peut être causée par des changements phénologiques, la réduction de la biomasse, une baisse de la densité du couvert végétal, une ouverture de la canopée, une infestation d'insectes, des inondations ou encore des dommages dus aux tempêtes.(Antonio Di Gregorio , 2005, s. d.)

En général, la conversion est plus facile à détecter et à surveiller à l'aide de données issues de la télédétection, contrairement à la modification, qui est souvent un processus de long terme nécessitant des données multi-annuelles et multi-saisonnières pour une évaluation précise.(Antonio Di Gregorio , 2005, s. d.)

11.1. Méthodologie d'utilisation et de couverture des terres (LULC)

La classification supervisée repose sur l'entraînement d'un modèle de classification à l'aide d'échantillons représentatifs (zones d'entraînement) pour distinguer différentes catégories d'utilisation et de couverture des terres. Des zones représentatives sont sélectionnées pour chaque catégorie (telles que l'agriculture, les forêts, les zones urbaines), en s'appuyant sur des connaissances de terrain ou des sources de données fiables. Le modèle de classification entraîné est ensuite appliqué à l'image satellite pour attribuer à chaque pixel une catégorie spécifique, produisant ainsi une carte illustrant la répartition spatiale des différentes catégories.(Antonio Di Gregorio , 2005, s. d.) .

12. La température de surface terrestre (LST)

12.1. Définition

La température de surface terrestre (LST) est une variable climatique importante, liée au bilan énergétique de surface ainsi qu'à l'état thermique intégré de l'atmosphère dans la couche limite planétaire. Traditionnellement, la LST faisait référence à la température standard de l'air en surface, mesurée à l'aide d'un thermomètre abrité situé entre 1,5 et 3,5 mètres au-dessus d'une surface herbeuse, plane et bien ventilée.(Farah et al., 2021)

Avec l'avènement de la technologie satellitaire, un autre type de LST, appelé température de surface satellitaire ou "température de peau" (skin temperature), est désormais disponible à l'échelle mondiale (Jin, 2004). Les produits LST dérivés des satellites fournissent une estimation de la température cinétique de la "peau" de la surface terrestre, c'est-à-dire le milieu de surface agrégé vu par le capteur jusqu'à une profondeur d'environ 12 μm .(Halder et al., 2022)

$$LST = \frac{T_B}{1 + \left(\frac{\lambda \cdot T_B}{\rho}\right) \ln \varepsilon}$$

Où:

T_B = Brightness Temperature (en Kelvin)

λ = longueur d'onde du canal thermique

ε = émissivité de la surface

$\rho = \frac{h \cdot c}{\sigma}$, avec :

h = constante de Planck

c = vitesse de la lumière

σ = constante de Boltzmann(Halder et al., 2022)

L'indice UTFVI (Urban Thermal Field Variation Index)

Les effets de l'îlot de chaleur urbain de surface (SUHI) sont souvent décrits à l'aide de l'indice UTFVI (Urban Thermal Field Variation Index). Les singularités du SUHI et de l'UTFVI résultent de plusieurs facteurs influençant la température de surface terrestre, les paramètres psychrométriques et l'intensité lumineuse, tels que les vagues de chaleur et les modifications de la surface terrestre (Gorai et al., 2024)

La formule suivante a été utilisée pour déterminer l'UTFVI :

$$\text{UTFVI} = (T_s - T_{\text{mean}}) / T_{\text{mean}}$$

Où :

T_s : désigne la température de surface (LST) en kelvin,

T_{mean} : représente la température moyenne de surface (LST) en kelvin.

L'indice SUHI (L'îlot de chaleur urbain de surface)

L'îlot de chaleur urbain de surface (SUHI) constitue un indicateur clé pour l'analyse de l'équilibre thermique dans les zones urbaines. Son étude permet de mieux comprendre les dynamiques spatiales de la température de surface, notamment dans les grandes agglomérations. Afin de quantifier cette variation thermique.(Gorai et al., 2024)

L'indice SUHI est calculé selon la formule suivante :

$$\text{SUHI} = (T_s - T_{\text{mean}}) / SD$$

Où :

T_s : correspond à la température de surface (Land Surface Temperature, LST) exprimée en kelvin,

T_{mean} : désigne la température moyenne de surface,

SD : représente l'écart type des valeurs de LST extraites de l'image satellitaire.

CONCLUSION

Enfin, après avoir défini la télédétection et exploré ses concepts fondamentaux, il apparaît clairement que ce domaine scientifique constitue l'un des piliers essentiels de la compréhension et de l'analyse des villes complexes. La télédétection ne se limite pas à la simple collecte de données, mais offre un ensemble d'outils analytiques avancés permettant une lecture globale et dynamique de la ville, tant sur le plan temporel que spatial.

Elle permet de surveiller l'expansion urbaine, d'évaluer l'occupation du sol, de détecter les transformations environnementales et de mettre en évidence les déséquilibres dans les structures urbaines. Cela favorise la formulation de décisions urbanistiques basées sur des données objectives et précises. Ainsi, la télédétection s'impose comme un instrument indispensable dans l'élaboration d'un urbanisme durable, grâce à sa capacité à produire des indicateurs quantitatifs mesurables et régulièrement actualisables.

**Chapitre IV : Analyse spatio-temporelle de l'expansion
urbaine de la ville de Tlemcen entre 1995 et 2025 à l'aide des
SIG et de la télédétection**

1. Introduction

Face à l'accélération du phénomène urbain à l'échelle mondiale, le besoin en outils capables de gérer d'importants volumes de données géographiques se fait de plus en plus pressant. Ce développement urbain rapide soulève des enjeux complexes, tels que la fragmentation des espaces, la pression sur les ressources naturelles, et les déséquilibres socio-spatiaux. C'est dans ce contexte que la **télédétection**, associée aux **systèmes d'information géographique (SIG)**, s'impose comme un levier fondamental pour l'analyse urbaine contemporaine. Ces technologies permettent de modéliser l'espace, de suivre les dynamiques d'occupation du sol, et de comprendre les interactions environnementales, sociales et économiques au sein des villes. L'intégration de la télédétection dans les approches d'analyse urbaine ne constitue donc pas un simple choix technique, mais bien une orientation stratégique vers des villes, capables de répondre aux défis du futur tout en préservant leurs ressources.

2. Travaux antérieurs

- **Évaluation de l'impact des changements d'occupation et d'utilisation du sol sur la dynamique de la température de surface à l'aide de Google Earth Engine : étude de cas de la municipalité de Tlemcen, nord-ouest de l'Algérie (1989–2019)**

Dans le cadre de l'évaluation de l'impact des changements d'occupation du sol sur les dynamiques thermiques urbaines, une étude récente menée par Imene Selka et al. (2024) s'est penchée sur la commune de Tlemcen sur une période de 30 ans (1989–2019). Les chercheurs ont mobilisé la plateforme Google Earth Engine (GEE) en exploitant des données Landsat pour analyser la variation spatio-temporelle de la température de surface terrestre (LST) en relation avec les transformations du paysage urbain. (Selka et al., 2024)

Les résultats obtenus montrent une augmentation significative de la LST, fortement liée à l'expansion des zones urbaines et à la régression des surfaces végétalisées. L'étude souligne l'effet tampon du couvert végétal, qui contribue à atténuer les hausses de température, en particulier dans les zones périphériques. Elle met également en évidence l'efficacité de l'utilisation des outils de télédétection et des systèmes d'information géographique pour surveiller les évolutions environnementales à long terme. (Selka et al., 2024)

Enfin, les auteurs insistent sur la nécessité d'intégrer les considérations climatiques dans la planification urbaine afin de limiter les effets des îlots de chaleur urbains, en préservant les espaces verts et en adoptant des stratégies de développement durable.(Selka et al., 2024)

- **Variation spatio-temporelle des formes du relief et de l'îlot de chaleur urbain de surface dans une mégapole fluviale : Étude de Gorai et al. (2024) – Mégapole fluviale de Kolkata (Inde)**

Une recherche approfondie menée par Namita Gorai et al. (2024) s'est intéressée à la variation spatio-temporelle de la température de surface (LST) et à l'effet d'îlot de chaleur urbain de surface (SUHI) dans la municipalité de Kolkata, en Inde, entre 1991 et 2021. En combinant des images Landsat (TM et OLI/TIRS) et des indices géospatiaux (NDVI, NDBI, NDMI, NDWI, NDBaI), l'étude a permis d'observer l'impact direct de l'expansion urbaine sur la dynamique thermique régionale.(Gorai et al., 2024)

Les résultats mettent en évidence :(Gorai et al., 2024)

- Une augmentation de la température de surface de 7,72 °C pour les maxima et 5,81 °C pour les minima en 30 ans.
- Une perte importante de végétation (-1354 ha), d'espaces herbacés (-2286 ha), et de surfaces d'eau (-434 ha).
- Un gain net de 4729 ha de zones urbanisées, au détriment de la couverture naturelle.
- Une corrélation positive entre l'indice bâti (NDBI) et la LST, et négative entre la végétation (NDVI) et la LST.
- Le recours aux indices SUHI et UTFVI a permis de caractériser la sévérité de l'effet thermique urbain selon six classes d'intensité.
- Les zones les plus affectées par le réchauffement sont Khidirpur, Sealdah, Kalighat, et l'aéroport Netaji Subhash Chandra Bose.

L'étude souligne l'urgence d'adopter une planification urbaine durable, de préserver les espaces verts et de surveiller l'évolution des températures par télédétection pour limiter les effets écologiques néfastes de l'urbanisation.(Gorai et al., 2024)

3. Présentation de la zone d'étude

La ville de Tlemcen est l'une des grandes cités historiques du nord-ouest de l'Algérie. Elle bénéficie d'un emplacement géographique stratégique, située au pied de l'Atlas tellien, à une altitude variante entre 800 et 900 mètres au-dessus du niveau de la mer. Elle s'inscrit dans la région montagneuse connue sous le nom de monts de Tlemcen, et profite d'un climat méditerranéen semi-humide, caractérisé par une forte amplitude thermique saisonnière et des précipitations relativement abondantes. Ces conditions en font une zone favorable à diverses activités agricoles, notamment la culture de la vigne, de l'olivier et des céréales.(Abdelkader Tahar, s. d.)

Du point de vue de la géographie humaine, Tlemcen constitue un centre urbain aux fonctions multiples, alliant les dimensions culturelle et économique. Elle a historiquement représenté un carrefour de civilisations, ce qui se reflète dans son tissu urbain ainsi que dans les caractéristiques démographiques de sa population.(Abdelkader Tahar, s. d.)

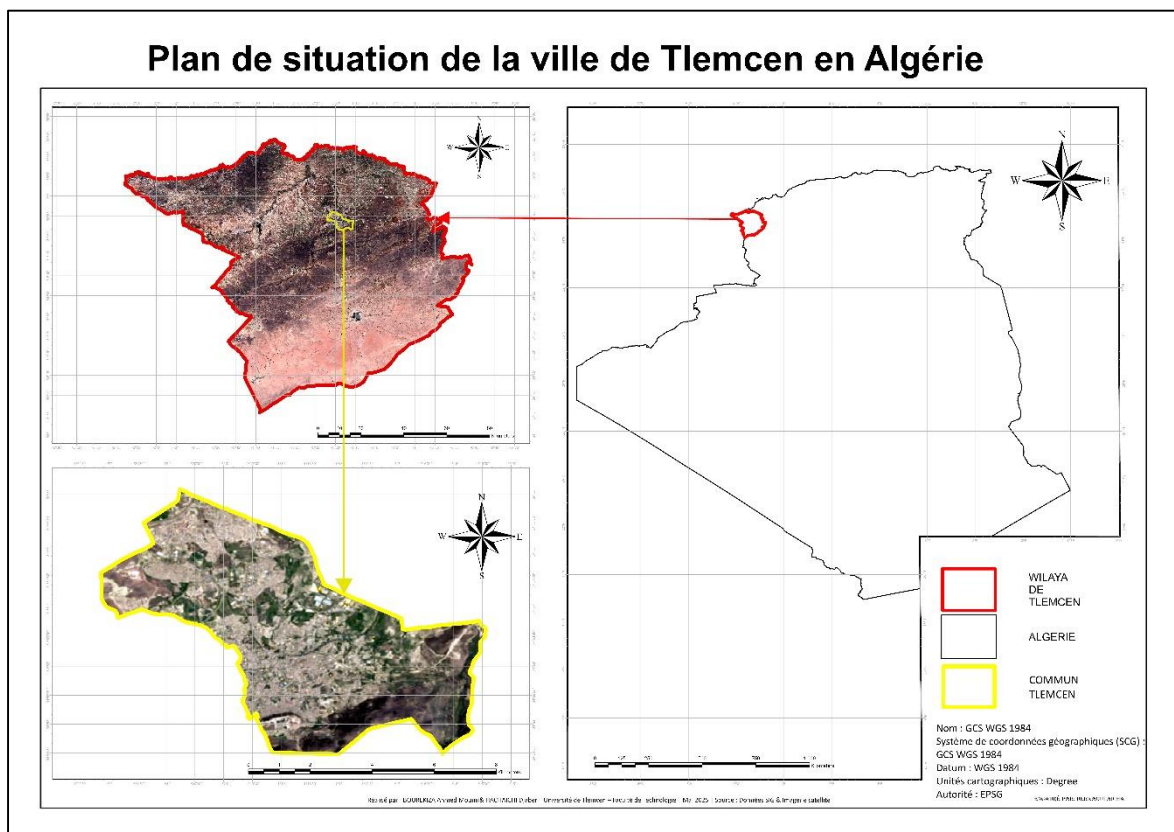


Figure 30. Plan de Situation de La ville de Tlemcen

4. Matériel et données utilisées

4.1. Logiciels et outils

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, 2023, s. d.)



Figure 31. Logo Arcgis Pro

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, 2023, 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, 2023, 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.

4.2.Données spatiales

Tableau 4. Données spatiales

Année	Satellite	La date	Type d'image	Résolution spatiale	Source
1995	Landsat 5 TM	09/06/1995	Multispectrale	30 m	https://www.usgs.gov/
2005		04/06/2005			
2015	Landsat 8 OLI	16/06/2015			
2025	Landsat 9	24/04/2025		10 m / 20 m	

Remarque : l'image de 2025 est issue de la dernière acquisition disponible et représente la situation urbaine actuelle.

4.3.Données auxiliaires

- Plan d'occupation des sols de la ville.
- Modèle Numérique de Terrain (**MNT**) pour l'analyse hydrologique
- **Administrative boundaries** (les limites ou frontières administratives) (**ADM**)

5. Prétraitement des images

- Géoréférencement, reprojection au système UTM zone 31N (datum : WGS 84) :

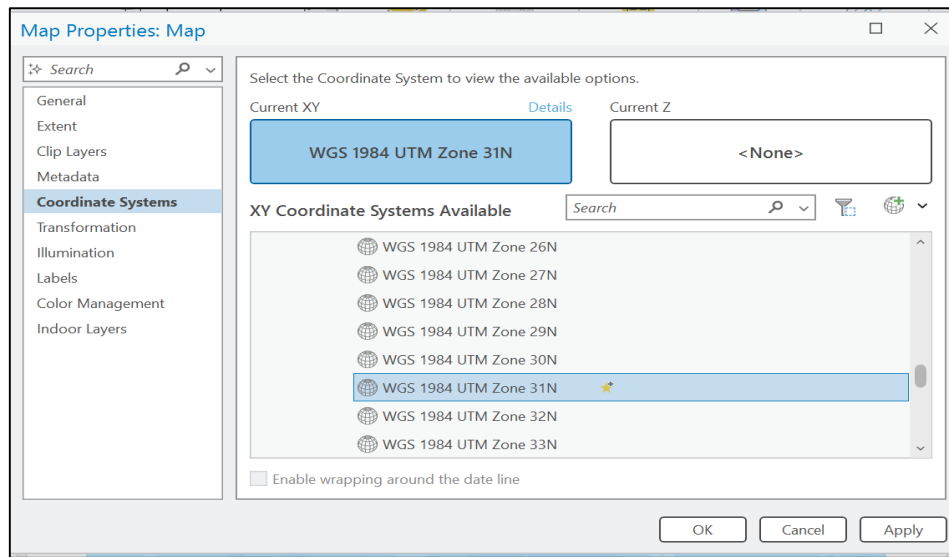


Figure 32. la processus de Géoréférencement

La ville de Tlemcen, située dans le nord-ouest de l'Algérie, présente une morphologie urbaine marquée par une forte densité au centre et une extension progressive vers les périphéries. Afin d'assurer une précision spatiale optimale lors du traitement des données, les couches utilisées ont été géoréférencées et reprojetées dans le système de coordonnées UTM, zone 31N, adapté à la localisation géographique de Tlemcen.(Tlemcen, Algérie, s. d.)

Extractions : Pour extraire la zone d'étude correspondant à la ville de Tlemcen à partir de l'image satellitaire, on utilise l'outil "**Extract by Mask**" disponible dans ArcGIS Pro. Cet outil se trouve en suivant le chemin : *Analysis > Tools > Spatial Analyst Tools > Extraction > Extract by Mask*.

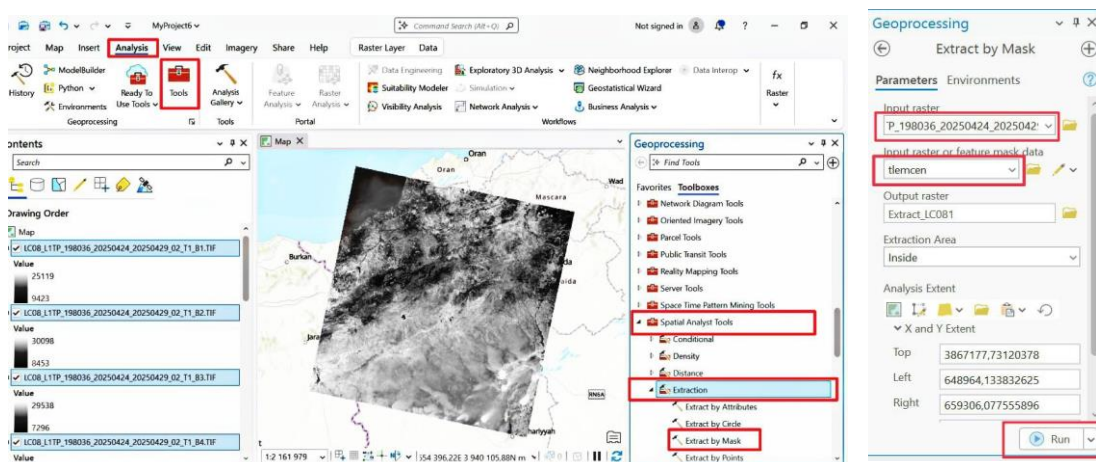


Figure 33. Les étapes d'extractions

L'image raster est d'abord sélectionnée comme couche d'entrée, puis on spécifie le masque d'extraction, qui correspond à une couche vectorielle délimitant les frontières administratives de la commune de Tlemcen. Ensuite, on définit le nom du fichier de sortie ainsi que son emplacement de sauvegarde. Une fois l'outil exécuté, un nouveau raster est généré, contenant uniquement les données situées à l'intérieur des limites de la zone d'intérêt. Cette étape est essentielle pour concentrer l'analyse uniquement sur le territoire urbain étudié.

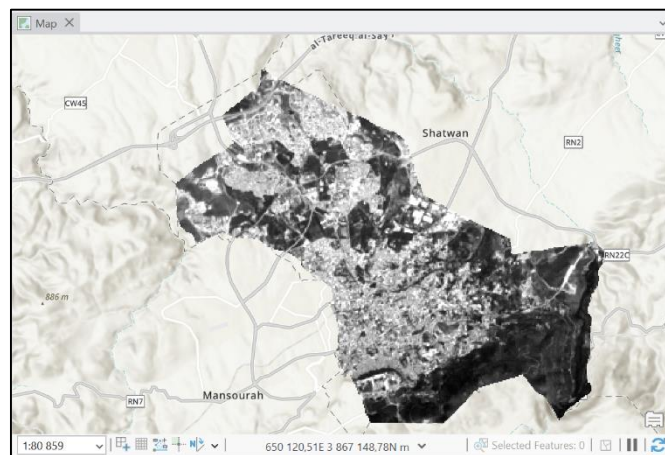


Figure 34. Image raster de Tlemcen

- Composition colorée :

Constitue une étape essentielle dans l'analyse de l'image satellitaire de la ville de Tlemcen, afin d'améliorer l'interprétation visuelle des composantes du paysage urbain. Deux types de compositions ont été générés :

- Le **composite en couleurs réelles (True Color)**, basé sur les bandes 4 (rouge), 3 (vert) et 2 (bleu), qui simule la vision humaine et présente les objets au sol dans leurs couleurs naturelles.

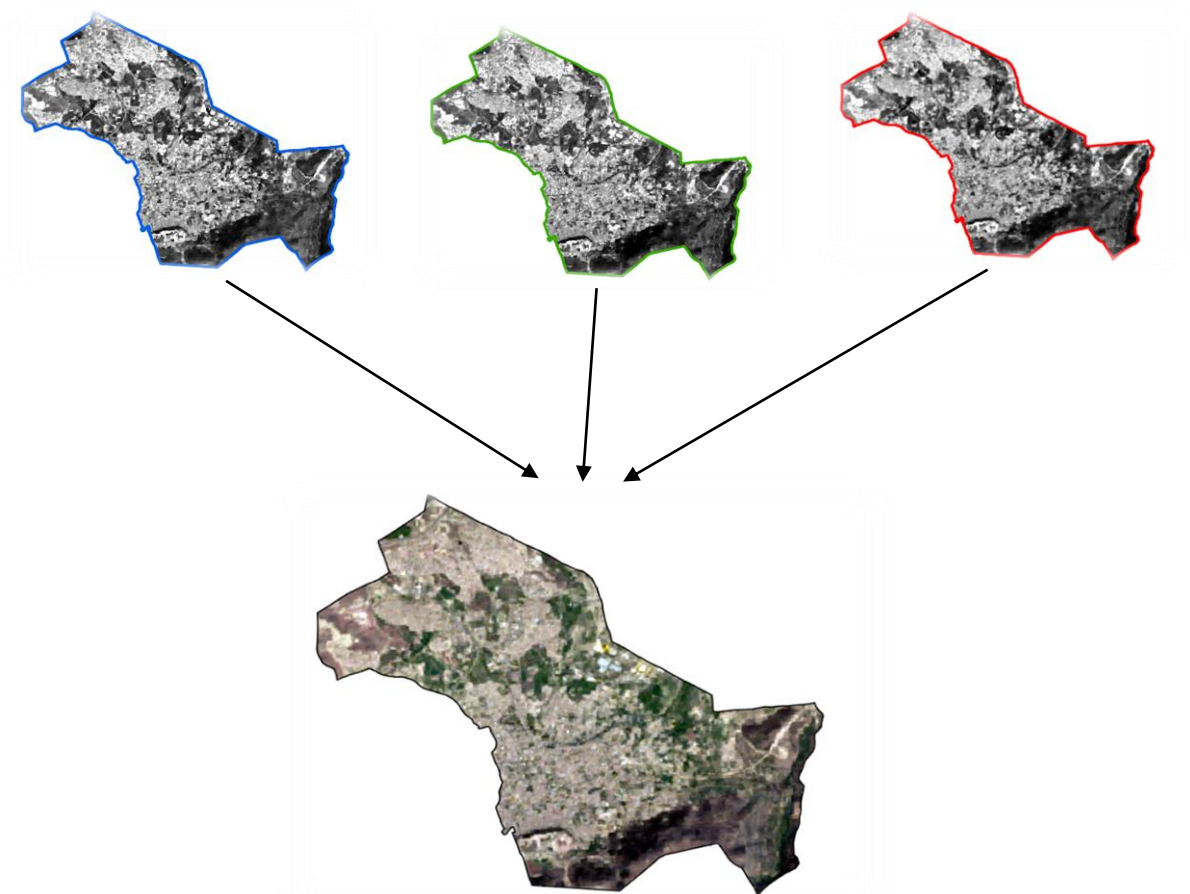


Figure 35. Composition colorée de Tlemcen

- Le **composite en couleurs fausses (False Color)**, utilisant les bandes 5 (infrarouge proche), 4 (rouge) et 3 (vert), met en évidence la végétation en rouge vif, tout en facilitant la distinction des zones urbaines et des plans d'eau. Cette variété de compositions permet une meilleure lecture de l'image satellitaire et une identification plus précise des types d'occupation du sol dans le tissu urbain de Tlemcen.

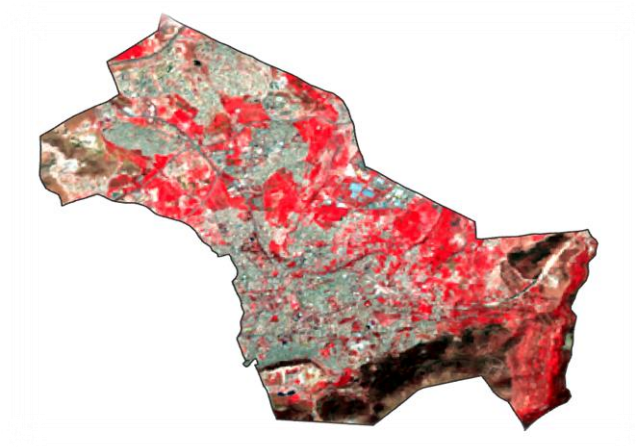


Figure 36. Composite en couleurs fausses de Tlemcen

6. Méthodologie de travail

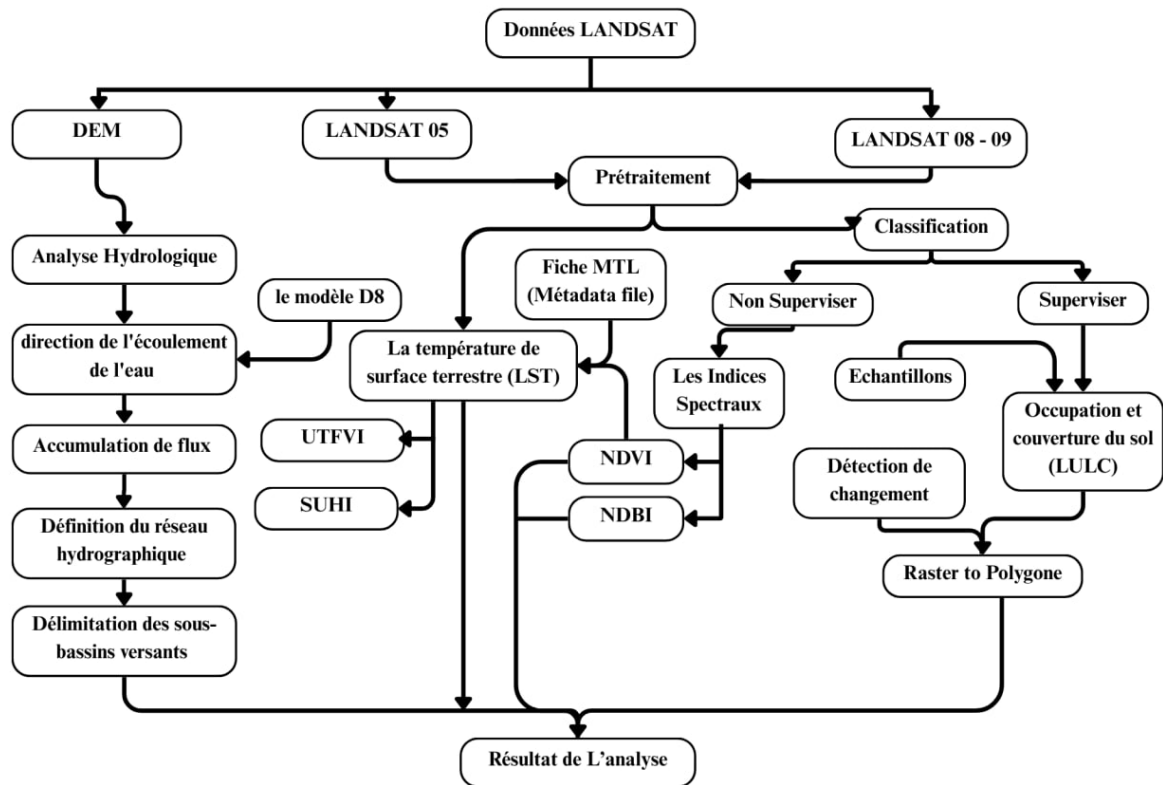


Figure 37. Méthodologie de travail

7. Caractéristiques hydrologiques de Tlemcen

Dans le cadre de cette analyse a été réalisée afin d'identifier les principaux éléments du réseau hydrographique de la ville de Tlemcen et d'évaluer leur interaction avec le tissu urbain. À l'aide du Modèle Numérique de Terrain (MNT), les outils de traitement hydrologique d'ArcGIS Pro ont permis de dériver plusieurs couches essentielles : la direction d'écoulement (Flow Direction), l'accumulation des flux (Flow Accumulation), et le tracé des lignes de drainage. Ces données ont ensuite été utilisées pour délimiter les bassins versants et identifier les zones potentiellement sujettes à l'accumulation d'eau ou aux inondations. Cette étape s'avère cruciale pour comprendre la dynamique de l'eau en milieu urbain et pour appuyer les recommandations en matière de gestion durable de l'espace et de prévention des risques hydriques.

7.1. La représentation numérique du relief de la région de Tlemcen

Le Modèle Numérique d'Élévation (MNE) permet de modéliser le relief, d'identifier les directions d'écoulement et les zones d'accumulation des eaux. Grâce à lui, les outils SIG peuvent générer des réseaux hydrographiques et délimiter les bassins versants. La qualité des résultats dépend directement de la précision du MNE utilisé.

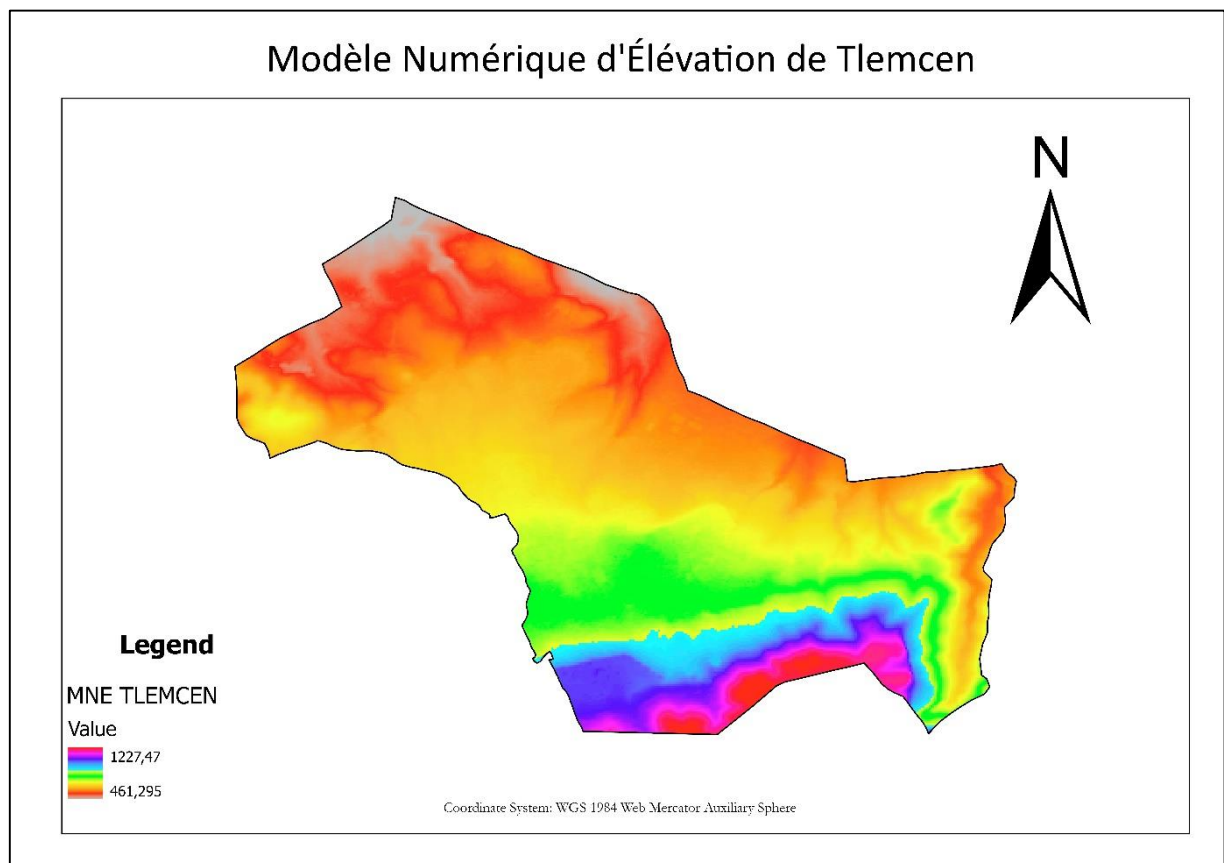


Figure 38. Modèle Numérique d'Élévation (MNE) Tlemcen

Selon le Modèle Numérique d'Élévation (MNE), l'altitude topographique de la ville de Tlemcen varie entre un minimum d'environ 461,30 mètres au-dessus du niveau de la mer et un maximum atteignant 1227,47 mètres. Cette variation d'altitude reflète la diversité du relief de la région, qui comprend des plaines basses, des vallées, ainsi que des zones montagneuses entourant la ville, notamment les montagnes de Tlemcen. Ces différences topographiques constituent un facteur essentiel influençant le régime d'écoulement des eaux de surface, la répartition de la couverture végétale, ainsi que le développement urbain et les infrastructures dans la région.

7.2.Détermination de la direction de l'écoulement de l'eau à l'aide du modèle D8

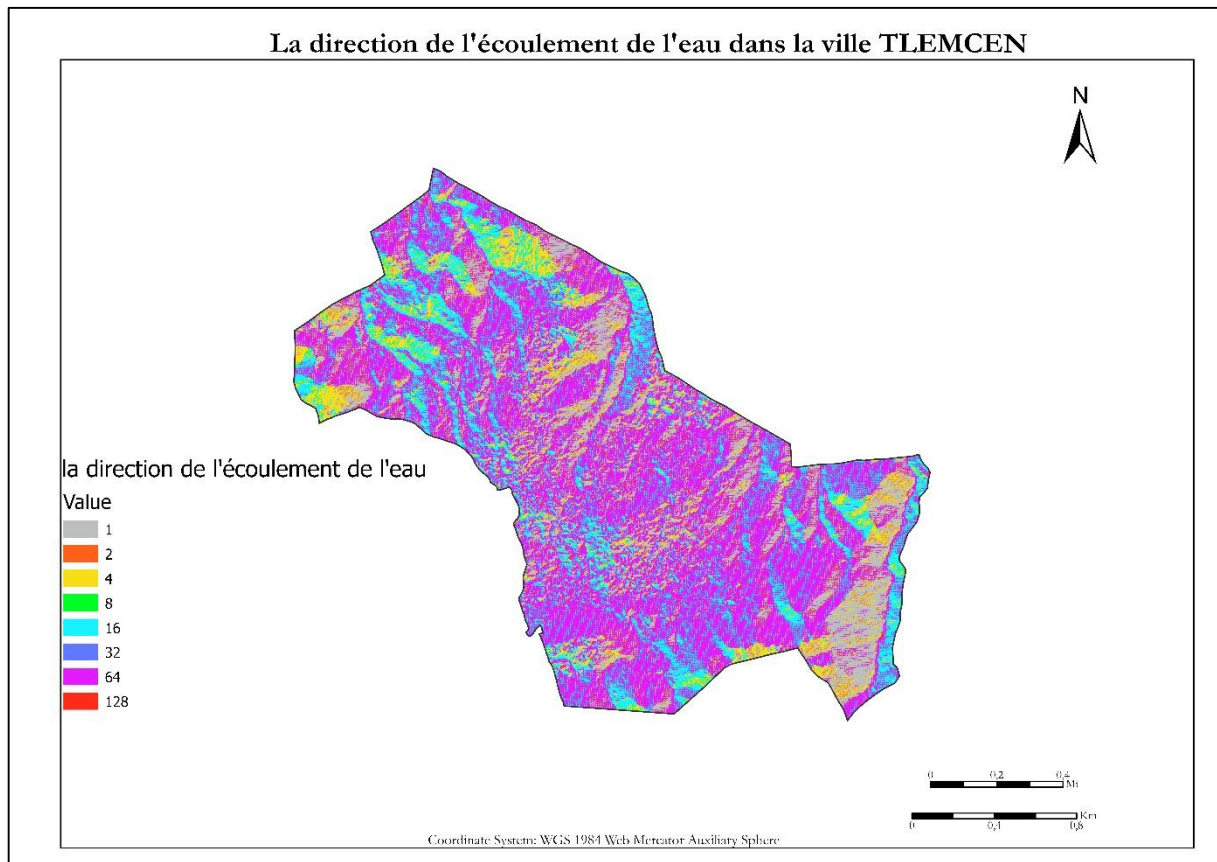


Figure 39. La direction de l'écoulement de l'eau de Tlemcen

À cette étape, le modèle **D8** a été utilisé pour déterminer la direction de l'écoulement de l'eau dans le réseau de drainage de la ville de **Tlemcen**. Ce modèle repose sur la division de chaque cellule de la grille en huit directions principales, comme illustré dans la première figure, où chaque direction est codée par un numéro binaire représentant le sens potentiel de l'écoulement : est (1), sud-est (2), sud (4), sud-ouest (8), ouest (16), nord-ouest (32), nord (64) et nord-est (128).

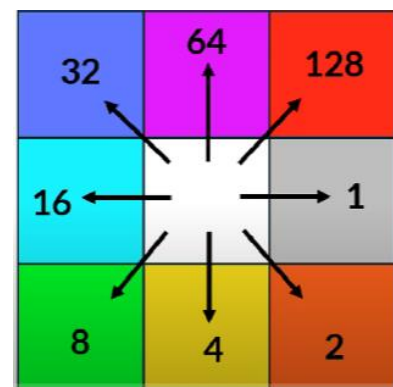


Figure 40. Le modèle D8

La direction de l'écoulement dans chaque cellule est calculée en fonction de la **plus grande pente** vers les cellules voisines, ce qui permet de tracer une carte représentant les chemins d'écoulement à travers les différents sous-bassins, comme illustré dans la deuxième figure. Cette carte contribue à l'analyse des dynamiques hydrologiques et à l'identification des zones les plus susceptibles d'accumuler les eaux ou de subir des inondations.

7.3.Accumulation de flux

Lors du calcul de l'accumulation de flux (Flow Accumulation), le raster apparaît en noir et blanc ou en nuances de gris, ce qui reflète l'intensité de l'écoulement de l'eau vers chaque cellule. Les zones blanches représentent une forte accumulation de flux, indiquant les principaux chemins de drainage tels que les rivières ou les ruisseaux. En revanche, les zones noires ou sombres correspondent à une faible accumulation, c'est-à-dire des cellules recevant peu ou pas d'eau.

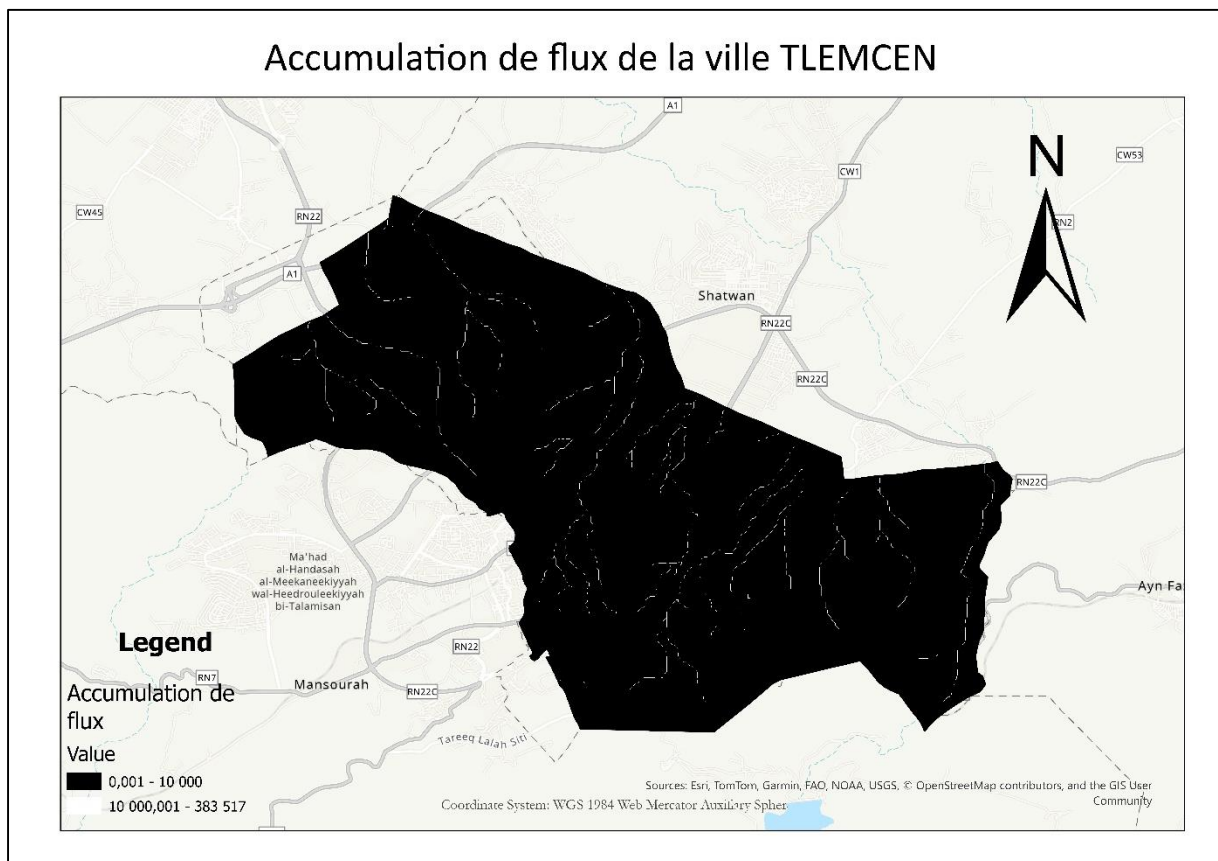


Figure 41. Accumulation de flux de Tlemcen

La carte présentée illustre l'accumulation de flux hydrologique dans la ville de **Tlemcen**. Les zones en noir représentent les valeurs d'accumulation, variant entre **0,001** et **10 000**, tandis que les accumulations plus élevées, comprises entre **10 000** et **383 517**, sont également identifiées. Ces valeurs traduisent l'intensité de l'écoulement de l'eau, permettant ainsi de visualiser les chemins de concentration naturelle du ruissellement à travers le territoire. L'utilisation d'un fond cartographique détaillé offre une compréhension claire de l'implantation urbaine par rapport aux flux hydrologiques, facilitant ainsi l'analyse du risque d'inondation et l'aménagement territorial.

7.4.Définition du réseau hydrographique (Stream Definition)

Créer un réseau de rivières ou de cours d'eau à partir du raster d'accumulation de flux (Flow Accumulation). Cela se fait en définissant un seuil d'accumulation, de sorte que les cellules dont la valeur dépasse ce seuil soient considérées comme faisant partie d'un cours d'eau ou d'une rivière.

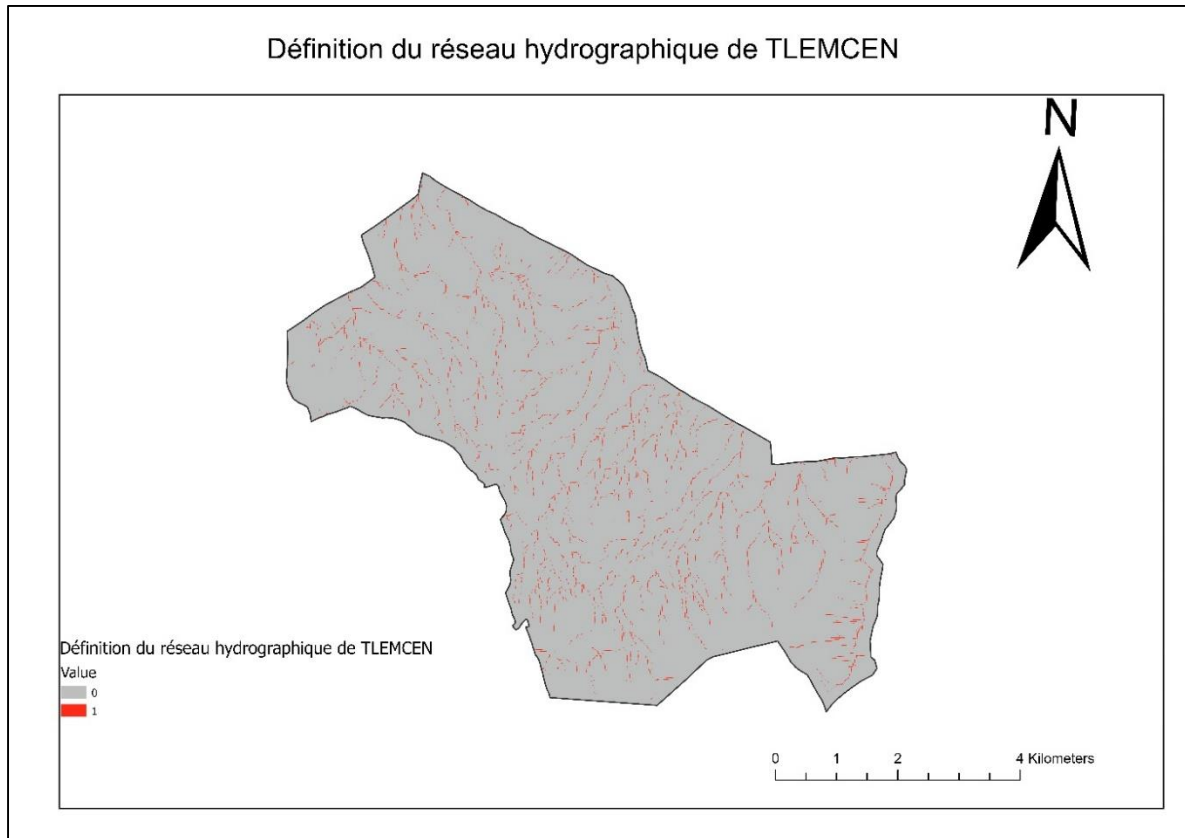


Figure 42. Définition du réseau hydrographique Tlemcen

Raster binaire (Binary Raster) :

Valeur 1 : représente le réseau de rivières ou de cours d'eau.

Valeur 0 : représente les zones non fluviales.

L'application d'un seuil d'accumulation de 1000 sur le raster de flux a permis d'identifier les cours d'eau potentiels sous forme raster. Ces flux sont concentrés dans les zones basses, ce qui constitue une base pour extraire le réseau hydrographique vectoriel.

7.5.Délimitation des sous-bassins versants de la ville de Tlemcen

Nous avons élaboré cette carte finale, qui représente le réseau de drainage et les bassins versants de la ville de Tlemcen, classés selon les valeurs d'accumulation de flux ou de débit d'eau :

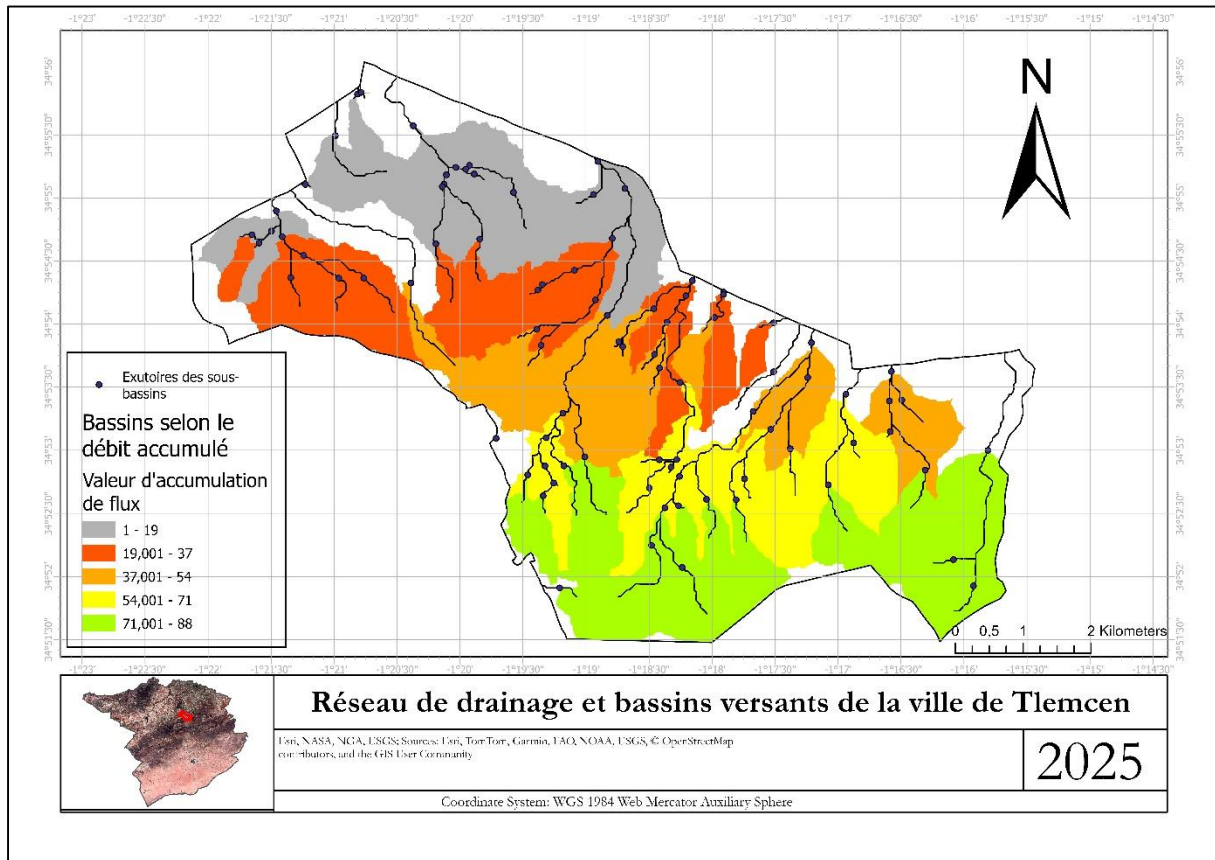


Figure 43. Délimitation des sous-bassins versants de la ville de Tlemcen

Composantes principales de la carte :

- Le réseau hydrographique :
Représenté sous forme de tracés noirs illustrant les rivières principales et secondaires, il montre les directions d'écoulement de l'eau à travers les différents bassins, contribuant ainsi à l'identification des points critiques lors de débits élevés.
- Les sous-bassins (Sous-bassins) :
Ils sont classés selon les valeurs d'accumulation de flux comme suit :
 - Gris (1 - 19) : représente un débit très faible, reflétant des terrains élevés ou un drainage rapide, réduisant ainsi le risque d'inondation.
 - Orange (19 001 - 37) : indique un débit faible à moyen, signalant le début de l'accumulation d'eau dans certaines zones, avec un potentiel d'accumulation limité.

- Jaune (37 001 - 54) : représente un débit moyen, indiquant des parcours d'eau à écoulement modéré nécessitant un suivi périodique pour garantir un drainage efficace.
- Vert (54 001 - 71) : reflète un débit relativement élevé, indiquant une accumulation accrue dans les sous-bassins, susceptible de provoquer des inondations locales en cas de fortes pluies.
- Jaune clair (71 001 - 88) : représente un débit très élevé, nécessitant des réseaux de drainage robustes pour éviter les inondations, en particulier dans les zones urbaines.
- Exutoires des Sous-bassins :
 La carte montre ces exutoires sous forme de points bleus répartis à travers les différents sous-bassins. Leur fonction principale est de drainer les eaux accumulées vers les cours d'eau principaux ou vers les points de décharge finaux tels que les rivières ou les lacs. Ces points jouent un rôle clé dans la gestion du flux hydrologique. En cas d'obstruction ou de réduction de leur capacité, ils peuvent provoquer des inondations locales et exercer une pression accrue sur les réseaux secondaires. Ils représentent donc des sites stratégiques nécessitant un entretien régulier et une surveillance constante, en particulier durant les saisons de fortes précipitations.

7.6. Caractéristiques hydrologique dans les sous-bassins de la ville TLEMCEN :

Les valeurs indiquées dans la légende de la carte représentent une mesure du nombre de cellules accumulées dans le sens de l'écoulement hydrologique, exprimant ainsi le volume d'eau collecté dans les voies de drainage de chaque zone. Il s'agit d'un indicateur scientifique du niveau d'écoulement de surface et du degré d'exposition des sous-bassins aux risques d'inondation.

Cette analyse comprend :

- Zones en gris : Débit très faible avec un drainage naturel fluide dû à un relief élevé.
- Zones en orange : Débit faible à moyen ; début d'accumulation dans certains parcours.
- Zones en jaune : Débit moyen reflétant des voies de drainage modérées, avec certains risques pendant les saisons pluvieuses.
- Zones en vert : Accumulation relativement élevée, indiquant un risque accru d'inondation.
- Zones en jaune clair : Débit très élevé ; ces zones nécessitent des interventions structurelles pour renforcer les réseaux de drainage et prévenir les catastrophes potentielles.

Ces valeurs sont utilisées dans la modélisation hydrologique comme un outil pour identifier les points critiques et planifier un aménagement urbain durable, visant à réduire les risques liés à

la montée des eaux et à renforcer la résilience des infrastructures face aux événements climatiques extrêmes.

8. Utilisation et couverture des terres

L'analyse spatio-temporelle de l'occupation du sol constitue une étape essentielle pour comprendre les dynamiques d'évolution urbaine. Dans ce cadre, une classification supervisée des images satellitaires a été réalisée à différentes périodes, permettant d'identifier les changements majeurs dans l'organisation de l'espace urbain et périurbain. L'approche adoptée repose sur l'utilisation conjointe d'images à haute résolution et des outils d'analyse offerts par un SIG, afin d'obtenir une cartographie thématique précise des types d'occupation du sol (LULC).

8.1. Les étapes principales de l'application LULC sous ArcGIS Pro

- **Préparation de l'image hybride**

Une image satellite en fausse couleur a été importée et superposée à une couche de référence (World Imagery) pour améliorer la précision visuelle. Les bandes spectrales (correspondant au proche infrarouge, rouge et vert) ont été ajustées pour faciliter la différenciation des classes.

- **Accès aux outils de classification**

Depuis l'onglet *Imagery*, on accède à **Classification Tools**, puis à l'outil **Training Samples Manager** afin de préparer les échantillons pour la classification supervisée.

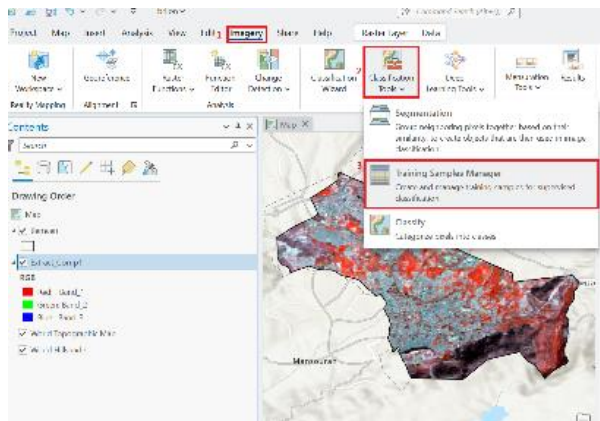


Figure 44. Préparer les échantillons pour la classification supervisée.

- **Création des échantillons d'entraînement (Training Samples)** Plusieurs polygones représentatifs des différentes classes (Eau, Urbain, Terre aride, Forêt, Agricole) ont été

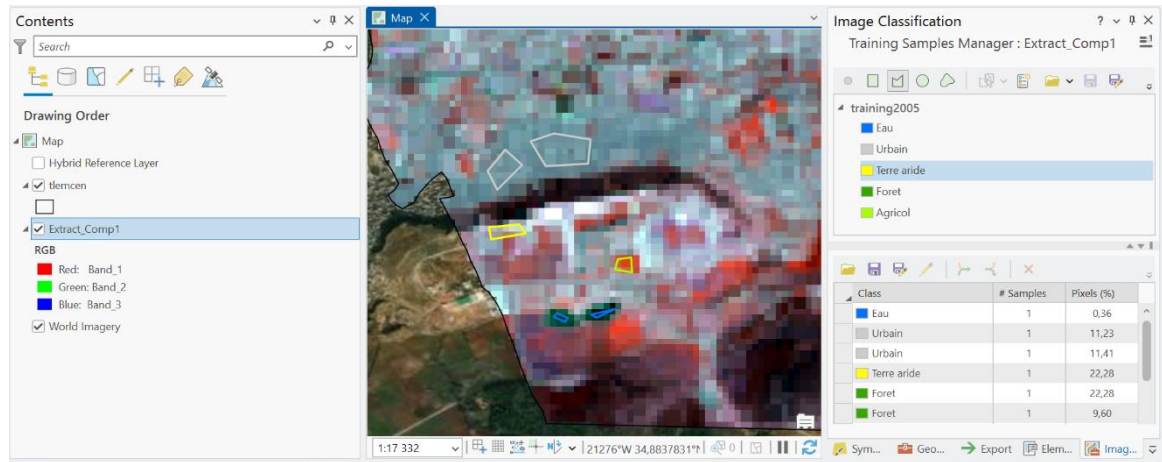


Figure 45. Création des échantillons d'entraînement

Dessinés manuellement sur l'image pour permettre au logiciel d'extraire les caractéristiques spectrales de chaque classe.

- **Exécution de la classification**

À partir des échantillons créés, un algorithme de classification (par exemple : Maximum Likelihood) est appliqué pour générer une carte classifiée représentant la répartition des types d'occupation du sol.

8.2. Analyse de l'évolution de l'occupation du sol (LULC) à Tlemcen (1995 - 2025)

Cette analyse repose sur l'exploitation des images satellitaires (type Landsat) et la classification des occupations du sol dans la ville de Tlemcen à quatre dates clés : 1995, 2005, 2015 et 2025. L'objectif est de comprendre la dynamique spatiale urbaine et environnementale à travers une approche quantita

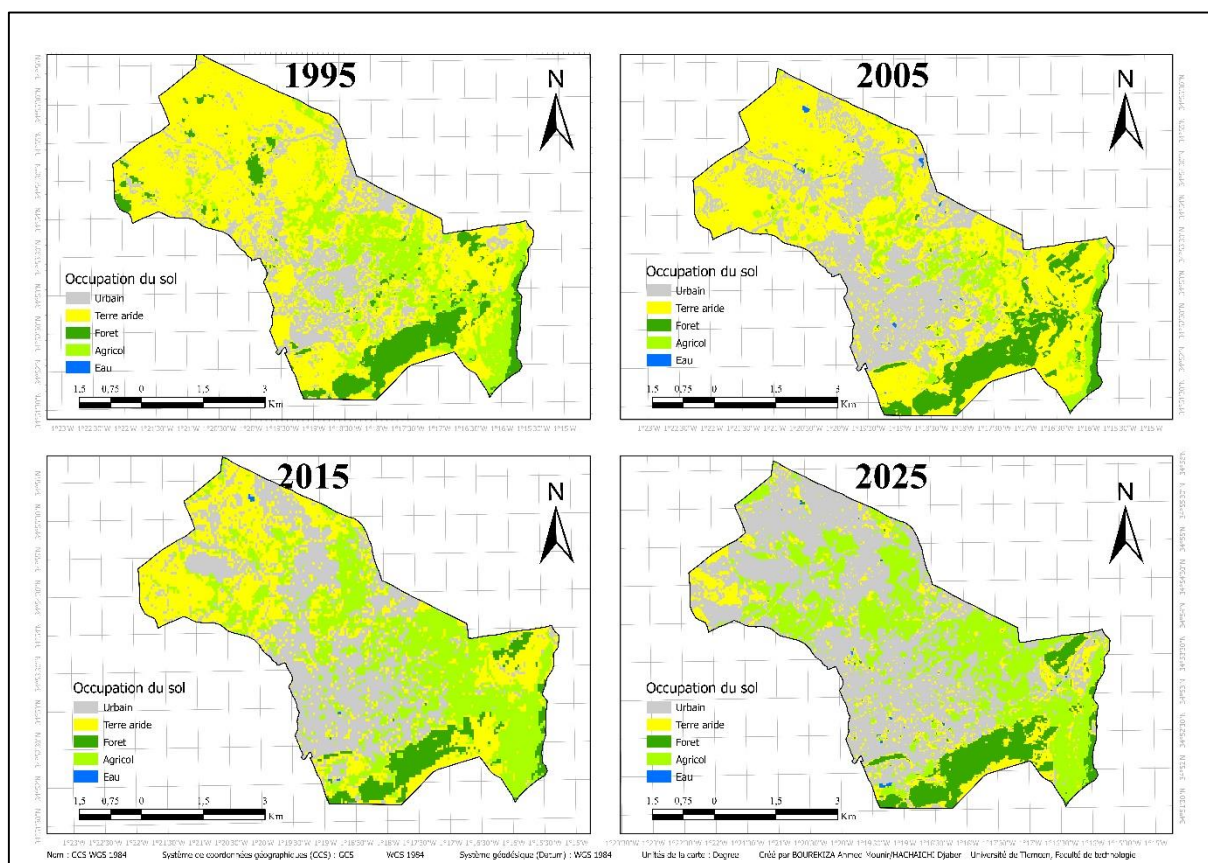


Figure 46. L'évolution de l'occupation du sol (LULC) à Tlemcen (1995 - 2025)

Tableau 5. l'évolution de l'occupation du sol (LULC) à Tlemcen (1995 - 2025)

Class_name	Urbain	Terre aride	Foret	Agricol	Eau
1995	7,21446177	23,7822309	4,1401885	6,96437957	0
2005	9,10896174	17,7976954	3,93147524	11,2574279	0,01122667
2015	13,6750724	13,2538554	2,48327462	12,6483976	0,02896864
2025	20,9849955	5,14829688	3,6694293	12,2440891	0,05210013

Analyse et interprétation

L'évolution de l'occupation du sol à Tlemcen entre 1995 et 2025 révèle des dynamiques spatiales marquées par une urbanisation rapide. La superficie urbaine est passée de 7,21 km² à 20,98 km², enregistrant une augmentation de près de 191%. Cette croissance urbaine s'est effectuée principalement au détriment des terres arides et agricoles.

Les terres arides ont connu une forte diminution, passant de 23,78 km² à 5,15 km² (-78%). Cela traduit une conversion importante de ces espaces en zones urbaines ou agricoles. Par ailleurs, les terres agricoles ont enregistré une croissance significative de 6,96 à 12,24 km² (+76%), probablement en lien avec des politiques d'aménagement ou d'extension agricole.

La superficie forestière a légèrement diminué de 4,14 à 3,67 km² (-11%), ce qui reste modéré mais appelle à une vigilance environnementale. Quant aux surfaces en eau, bien qu'elles soient très faibles, elles montrent une légère croissance, probablement liée à l'apparition de petits plans d'eau ou à une meilleure détection.

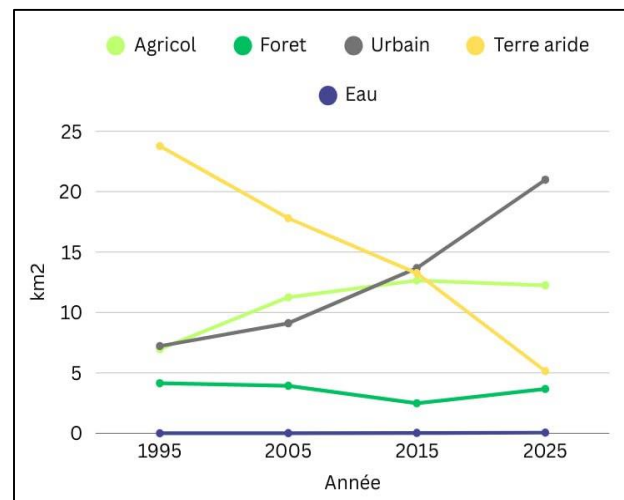


Figure 47. L'évolution de l'occupation du sol (LULC) à Tlemcen (1995 - 2025)

8.3. Détection des changements de l'utilisation et de l'occupation du sol

La détection de changement (Change Detection) est une méthode dans ArcGIS Pro qui permet de comparer deux images raster prises à des dates différentes afin d'identifier et de quantifier les modifications survenues dans l'occupation du sol (LULC) au fil du temps.

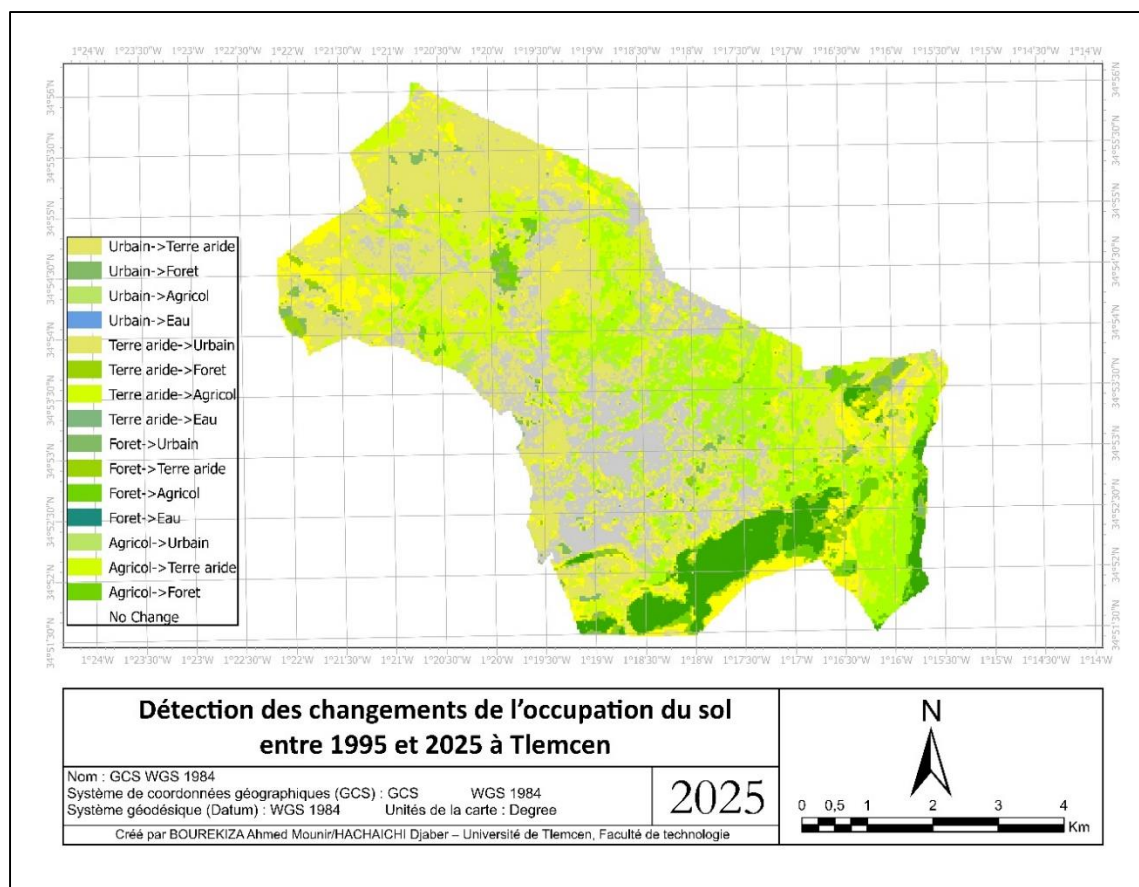


Figure 48. Détection des changements de l'utilisation et de l'occupation du sol entre 1995 et 2025 à Tlemcen

Tableau 6. Détection des changements de l'utilisation et de l'occupation du sol

Nom de classe	Surface (km2)	Nom de classe	Surface (km2)
Agricol->Foret	0,277786973	Terre aride->Agricol	6,139844319
Agricol->Terre aride	0,537208969	Terre aride->Eau	0,045918668
Agricol->Urbain	1,327340955	Terre aride->Foret	0,594887012
Foret->Agricol	0,587300114	Terre aride->Urbain	13,18861339
Foret->Eau	0,002416664	Urbain->Agricol	0,672312481
Foret->Terre aride	0,429155017	Urbain->Eau	0,005077466
Foret->Urbain	0,482272259	Urbain->Foret	0,150140415
No Change	17,02020489	Urbain->Terre aride	0,635103186

L'évolution de l'occupation des sols dans la province de Tlemcen entre 1995 et 2025 reflète d'importantes dynamiques spatiales et temporelles qui montrent comment les schémas d'occupation des sols évoluent sous l'effet de multiples interactions humaines et environnementales. Cette carte est un outil visuel et analytique essentiel pour comprendre comment la croissance urbaine, l'expansion agricole et le changement climatique affectent l'occupation des sols dans la région.

L'étalement urbain : il s'agit de la transformation de terres agricoles ou stériles en zones urbaines, en particulier dans le nord et le nord-ouest de l'État. Ce phénomène est dû à la croissance démographique et à l'expansion non planifiée des centres urbains, qui exercent une pression croissante sur les terres agricoles productives.

Transformation de l'agriculture : Les activités agricoles ont connu une expansion notable, en particulier dans les zones qui étaient auparavant considérées comme des terres stériles, peut-être grâce à des projets de mise en valeur agricole ou au développement de méthodes d'irrigation. Toutefois, dans certains cas, ce phénomène s'accompagne d'une perte de terres forestières, ce qui soulève des questions environnementales liées à la perte de biodiversité.

Couvert forestier : La carte indique une diminution des zones forestières dans certaines régions, alors que dans d'autres, elles se sont légèrement étendues, reflétant une variation des politiques environnementales et de boisement au niveau local. Ce changement est un indicateur important de l'impact des activités humaines sur l'environnement naturel, en particulier dans les régions du sud et de l'ouest de l'État.

Stabilité de l'utilisation des sols : Les zones relativement inchangées (en gris) occupent un espace important, indiquant des zones de stabilité fonctionnelle et d'utilisation des terres, soit en tant que réserves naturelles, soit en tant que terres non développées.

9.1. Analyse de l'évolution de l'indice NDVI entre 1995 et 2025

Analyse et interprétation

En 1995, de vastes zones présentaient une couverture végétale dense. Mais avec le temps, et notamment jusqu'à l'année 2005, nous avons constaté un recul progressif de cette couverture, surtout dans les zones les plus denses. Ce déclin pourrait être dû à l'expansion urbaine, à une exploitation excessive des terres, ou encore à des conditions climatiques difficiles comme les périodes de sécheresse.

2. De 2005 à 2015 : Dégradation marquée de la végétation

Durant cette période, nous avons observé une baisse significative des valeurs de l'indice NDVI, ce qui indique une forte dégradation de la couverture végétale. Ce recul peut être lié à la surexploitation des sols (pâturage intensif, déforestation), ainsi qu'à la faiblesse des précipitations. Il semble aussi que les efforts de protection de l'environnement durant cette décennie n'aient pas été suffisants ou efficaces.

3. Année 2025 : Signes de stabilisation et de récupération partielle

En 2025, les données obtenues à partir des images satellites montrent une amélioration relative dans certaines zones par rapport aux années précédentes. Nous avons enregistré une légère hausse des valeurs du NDVI, notamment dans les zones les plus touchées auparavant. Cette amélioration peut être expliquée par des actions concrètes sur le terrain telles que les campagnes de reboisement, les projets de préservation de l'environnement, ou encore une amélioration des conditions climatiques récentes. La sensibilisation des populations a également pu jouer un rôle important dans la réduction de la pression exercée sur les ressources naturelles.

En conclusion, À travers cette analyse, nous pouvons conclure que la couverture végétale dans la région a connu un déclin progressif, notamment entre 2005 et 2015, mais que des signes d'amélioration ont été observés ces dernières années.

9.2. Analyse de l'évolution de l'indice NDBI entre 1995 et 2025

Dans le cadre de cette étude, nous avons analysé les changements liés à l'urbanisation dans la zone d'étude sur une période de 30 ans, en utilisant l'indice **NDBI (Normalized Difference Built-up Index)**, extrait des images satellites Landsat. L'objectif principal est de comprendre comment les zones bâties ont évolué avec le temps et quels facteurs ont influencé cette expansion.

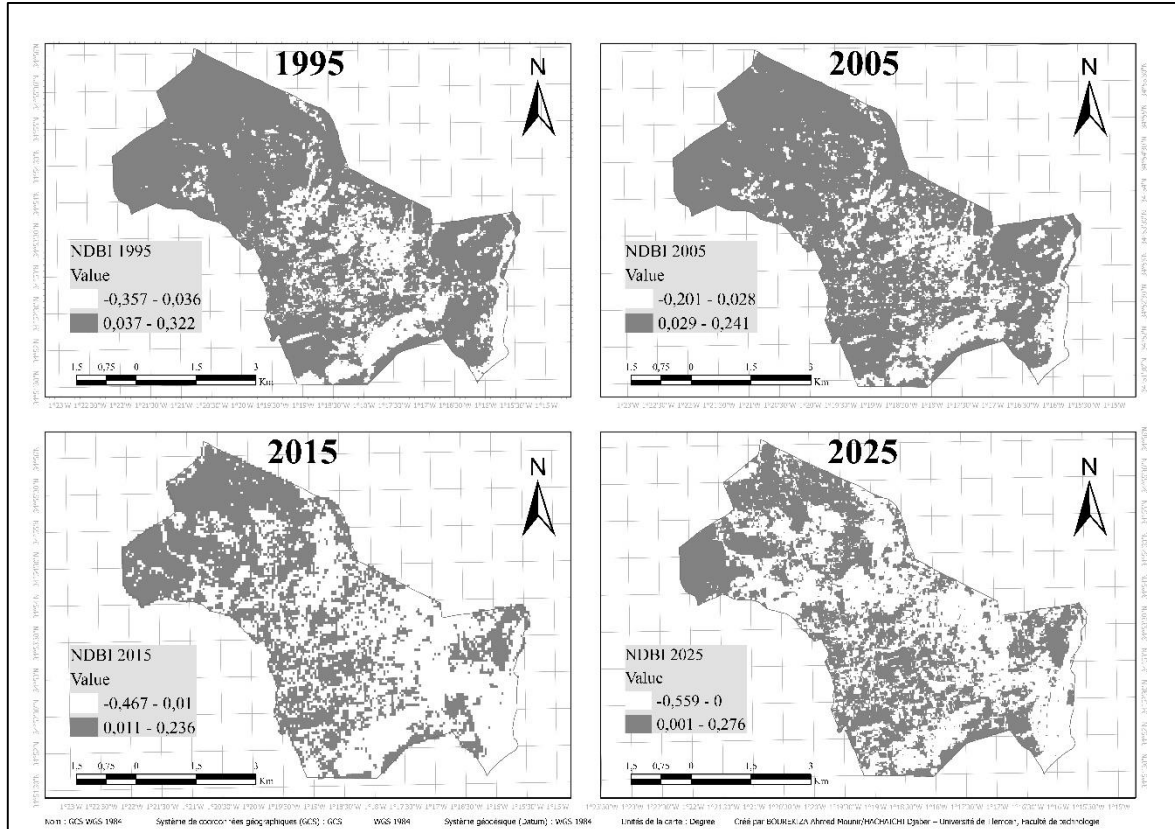


Figure 50. L'évolution de l'indice NDBI entre 1995 et 2025

Analyse et interprétation

1. De 1995 à 2005 : Début de l'extension urbaine

- En 1995, les résultats de l'indice NDBI montrent que les zones urbanisées étaient limitées, et que la majorité du territoire était naturelle ou agricole.
- Entre 1995 et 2005, on constate un début d'expansion urbaine, notamment en périphérie des agglomérations.
- Cette croissance peut s'expliquer par la pression démographique ou l'absence d'un bon plan d'aménagement urbain à cette époque

2. De 2005 à 2015 : Urbanisation rapide

- Durant cette décennie, les surfaces bâties ont augmenté de manière significative, ce qui se reflète dans les valeurs élevées du NDBI.
- Cela indique une urbanisation rapide, probablement sous forme de nouveaux quartiers ou de projets d'infrastructure.
- Cette croissance s'est souvent faite au détriment des zones naturelles ou agricoles.

3. Année 2025 : Stabilisation relative

- Les données de 2025 montrent que l'urbanisation continue, mais à un rythme plus lent.
- Cela peut s'expliquer par une saturation des zones déjà urbanisées ou par l'introduction de politiques de régulation urbaine.
- Il se peut aussi que les efforts se concentrent désormais sur l'amélioration des infrastructures existantes plutôt que sur la création de nouvelles extensions

9.3. Analyse de l'évolution LST entre 1995 et 2025

À travers l'analyse de l'indice NDBI, on peut distinguer plusieurs phases principales dans l'évolution de la zone d'étude, Cela reflète clairement l'impact des activités humaines, notamment en raison de l'absence d'une planification urbaine efficace durant certaines périodes. L'analyse de l'évolution de LST (La température de surface terrestre) entre 1995 et 2025 revêt une importance particulière pour évaluer l'impact de l'urbanisation sur l'environnement local, notamment dans un contexte de forte expansion urbaine et de densification du tissu bâti. À travers l'exploitation de données satellitaires couvrant les années **1995, 2005, 2015 et 2025**, nous avons appliqué une approche spatio-temporelle afin de détecter les variations des températures de surface (LST) dans la ville.

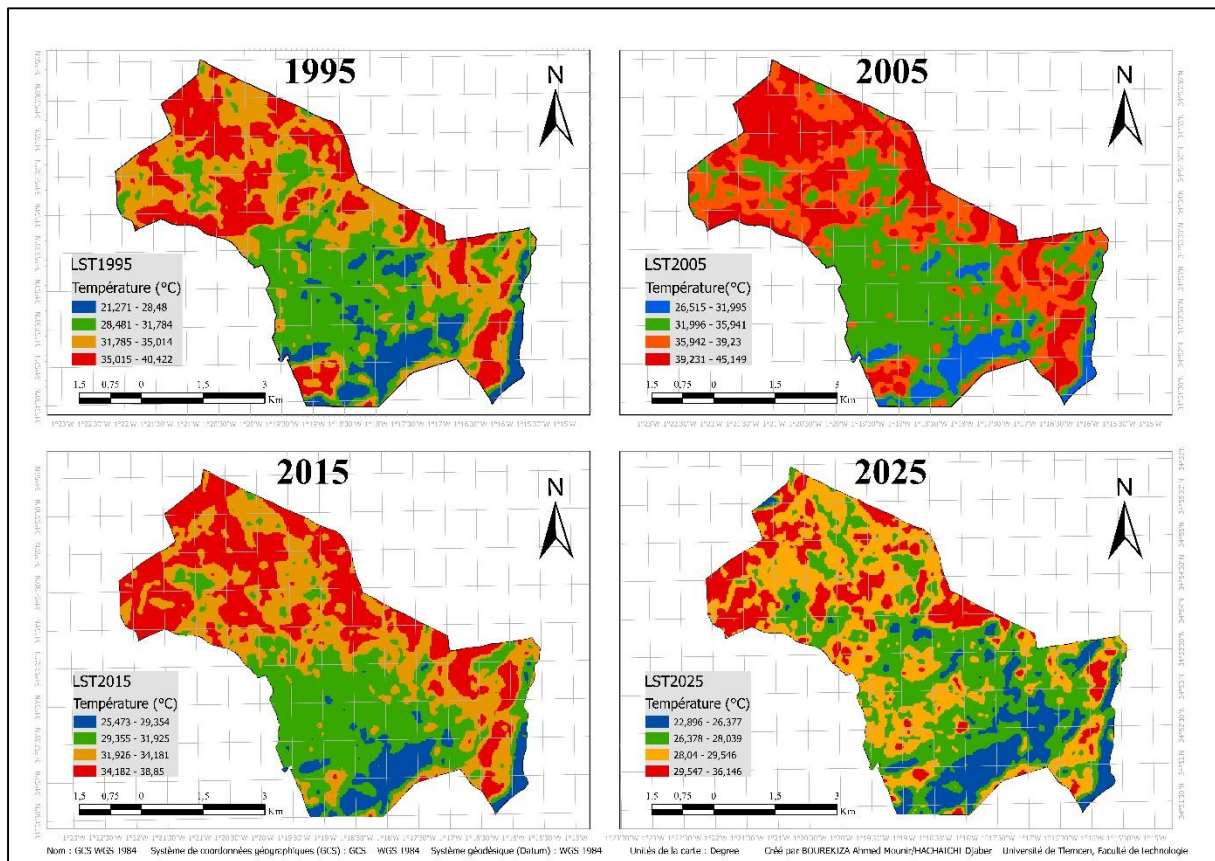


Figure 51. L'évolution de LST (La température de surface terrestre) entre 1995 et 2025

Analyse et interprétation

Les cartes de La température de surface terrestre (LST) de Tlemcen montrent des changements thermiques évidents au cours des quatre périodes étudiées, reflétant la dynamique des changements urbains et environnementaux dans la ville.

En 1995, les températures variaient de 21,27°C à 40,42°C, reflétant un contraste thermique entre le centre-ville et les zones périphériques. Les zones où les températures sont les plus élevées se concentrent dans les zones exposées ou arides, tandis que les zones avec de la végétation enregistrent des températures plus basses.

En 2005, une augmentation significative de la température a été observée, avec des valeurs allant de 26,51°C à 45,14°C, ce qui représente la température moyenne la plus élevée au cours de la période étudiée. Cette hausse thermique est attribuée à l'importante expansion urbaine qu'a connue la ville au cours de la première décennie du millénaire, caractérisée par la réduction des espaces verts et l'augmentation des surfaces dures telles que le béton et l'asphalte, ce qui a conduit à l'accentuation du phénomène d'"îlot de chaleur urbain", en particulier dans les nouveaux quartiers et les zones industrielles du nord-est de la ville.

En 2015, les températures ont commencé à se stabiliser, oscillant entre 25,47°C et 38,85°C. Bien que certains points chauds subsistent dans les zones bâties, l'extension de certains espaces verts a contribué à atténuer l'impact thermique, en particulier dans le centre de la ville et autour de Wadi Tafna.

En 2025, elle montre une diminution relative des valeurs maximales, avec des températures comprises entre 22,89°C et 36,14°C, ce qui peut être attribué à une amélioration relative de la gestion des espaces urbains, ou à un ralentissement du rythme de l'expansion urbaine, avec une tentative de réintégrer la végétation dans la planification urbaine. Cependant, certaines zones conservent encore des niveaux thermiques élevés, en particulier dans les zones industrielles et les périphéries de la ville à forte densité urbaine.

Remarque : cette analyse permet d'identifier la répartition des zones chaudes et des zones fraîches dans le tissu urbain, et de suivre leur évolution au fil du temps. Pour interpréter ces résultats de manière plus approfondie, des indicateurs spectraux complémentaires tels que le NDVI (indice de végétation) et le NDBI (indice des zones bâties) ont été mobilisés, en raison de leur rôle essentiel dans la compréhension du lien entre la structure de l'occupation du sol et le comportement thermique de la surface

9.4.Évaluation spatio-temporelle de l'intensité des îlots de chaleur urbains (SUHI) dans la ville de Tlemcen

Dans le cadre de ce travail, le **phénomène des îlots de chaleur urbains de surface (SUHI – Surface Urban Heat Island)** a été analysé, en tant que manifestation environnementale majeure liée à l'expansion urbaine intense. Le SUHI se caractérise par une élévation significative de la température de surface dans les zones urbaines par rapport aux zones rurales ou naturelles environnantes, en raison du remplacement des surfaces naturelles (comme le sol et la végétation) par des matériaux artificiels (asphalte, béton, etc.).

Cette analyse a été appliquée à la **ville de Tlemcen**, qui connaît une dynamique d'urbanisation notable au cours des dernières années. La **température de surface (LST)** a été extraite à partir de données satellitaires, puis comparée à la répartition de la **végétation (NDVI)** et des **zones bâties (NDBI)**. Ce croisement de données a permis d'identifier les zones chaudes au sein du tissu urbain de Tlemcen, qui coïncident généralement avec des secteurs à forte densité bâtie et à faible couverture végétale.

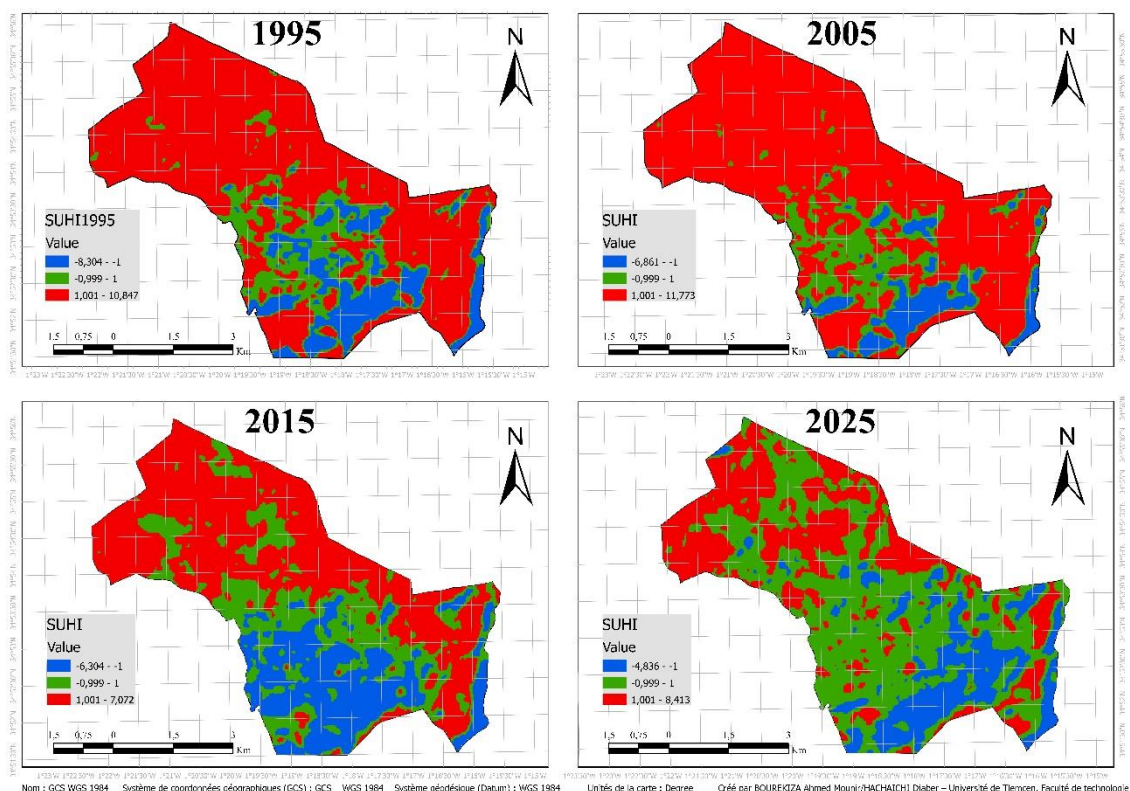


Figure 52. Évaluation spatio-temporelle de l'intensité des îlots de chaleur urbains (SUHI) dans la ville de Tlemcen

L'analyse de la différence de température de surface entre les zones urbaines et rurales a révélé une diminution progressive de l'intensité du phénomène SUHI au fil des années. Cet écart était d'environ **4,77 °C** en 1995, puis est passé à **4,26 °C** en 2005, à **1,39 °C** en 2015, pour atteindre seulement **0,98 °C** en 2025.

Cette baisse continue peut être attribuée à une **amélioration notable de la couverture végétale au sein du tissu urbain**, ce qui a contribué à atténuer les effets thermiques liés à l'urbanisation

9.5. Évaluation spatio-temporelle D'Indice de variation du champ thermique urbain (UTFVI) dans la ville de Tlemcen

L'indice UTFVI (Urban Thermal Field Variance Index) reflète la variabilité du stress thermique induit par l'expansion urbaine dans l'environnement bâti. Cet indice met en évidence l'influence du type de couverture de surface (végétale, urbaine ou Terre aride) sur la température de surface.

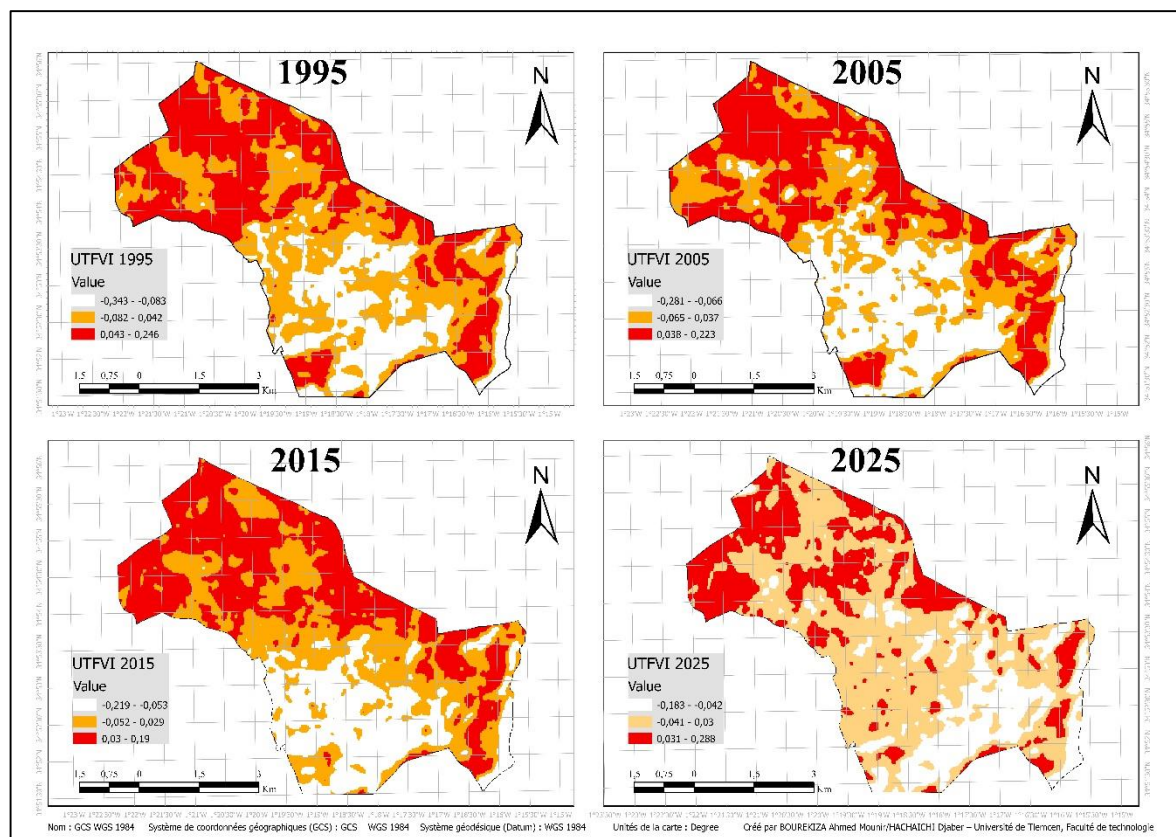


Figure 53. Évaluation spatio-temporelle D'Indice de variation du champ thermique urbain (UTFVI) dans la ville de Tlemcen

Année 1995 – Phase de stress thermique élevé

- La carte montre une forte dominance des zones rouges (valeurs UTFVI entre 0,043 et 0,246), notamment au nord-ouest et au centre, reflétant une prédominance de terrains nus.
- Les zones orange (valeurs intermédiaires entre -0,092 et 0,042) sont présentes de manière plus limitée, principalement au sud et au sud-est, ce qui indique une densité urbaine.
- La végétation est presque absente, comme en témoignent les faibles zones à valeurs négatives (entre -0,343 et -0,083).

En 1995, la ville souffrait d'un déséquilibre thermique important dû à une urbanisation dense sans compensation végétale

Année 2005 – Début d'une transition thermique

- On observe une légère diminution des zones rouges, notamment au sud et à l'est, ce qui suggère un début d'introduction de couvert végétal.
- Les zones à valeurs intermédiaires sont plus visibles dans le centre urbain.
- De nouvelles zones à valeurs négatives (entre -0,281 et -0,066) apparaissent,

En 2005 marque un tournant vers une amélioration du confort thermique urbain, probablement grâce à des politiques d'aménagement ou de verdissement ciblées

Année 2015 – Amélioration notable de l'équilibre thermique

- La carte montre une expansion significative des zones végétalisées (valeurs négatives), surtout au sud-est et au centre.
- Les valeurs intermédiaires (zones urbaines modérées) dominent, ce qui reflète une réduction des terrains nus.
- Les zones rouges se concentrent désormais uniquement dans les poches nord-ouest.

Cette phase indique une efficacité des stratégies urbaines et écologiques dans la réduction du stress thermique, avec une expansion marquée du couvert végétal

Année 2025 – Stabilisation thermique atteinte

- La carte révèle une diminution claire des zones à stress thermique élevé, avec une augmentation importante des zones à valeur négative.
- Les zones intermédiaires dominent l'espace urbain, traduisant une urbanisation plus équilibrée.
- Les zones critiques persistent au nord et au nord-est, mais en proportion réduite.

En 2025, la ville atteint une situation de quasi-équilibre thermique.

10. Relations entre les indicateurs étudiés

10.1. Relation entre NDVI et NDBI

Dans le but d'analyser la relation entre la végétation et les zones urbanisées, deux indices ont été utilisés : **le NDVI** (Normalized Difference Vegetation Index) et **le NDBI** (Normalized Difference Built-up Index), extraits à partir d'images satellitaires.

Pour étudier le lien statistique entre ces deux indices, nous avons eu recours à **la matrice de corrélation**, un outil d'analyse qui permet de mesurer la force et le sens de la relation entre deux variables continues, à l'aide du **coefficient de corrélation de Pearson (r)**, calculé à partir des valeurs pixel à pixel. Les résultats obtenus révèlent une **corrélation négative** entre le NDVI et le NDBI, ce qui signifie que plus une zone est couverte par de la végétation (valeurs élevées de NDVI), moins elle est urbanisée (valeurs faibles de NDBI), et inversement. Cela nous a conduits aux résultats suivants :

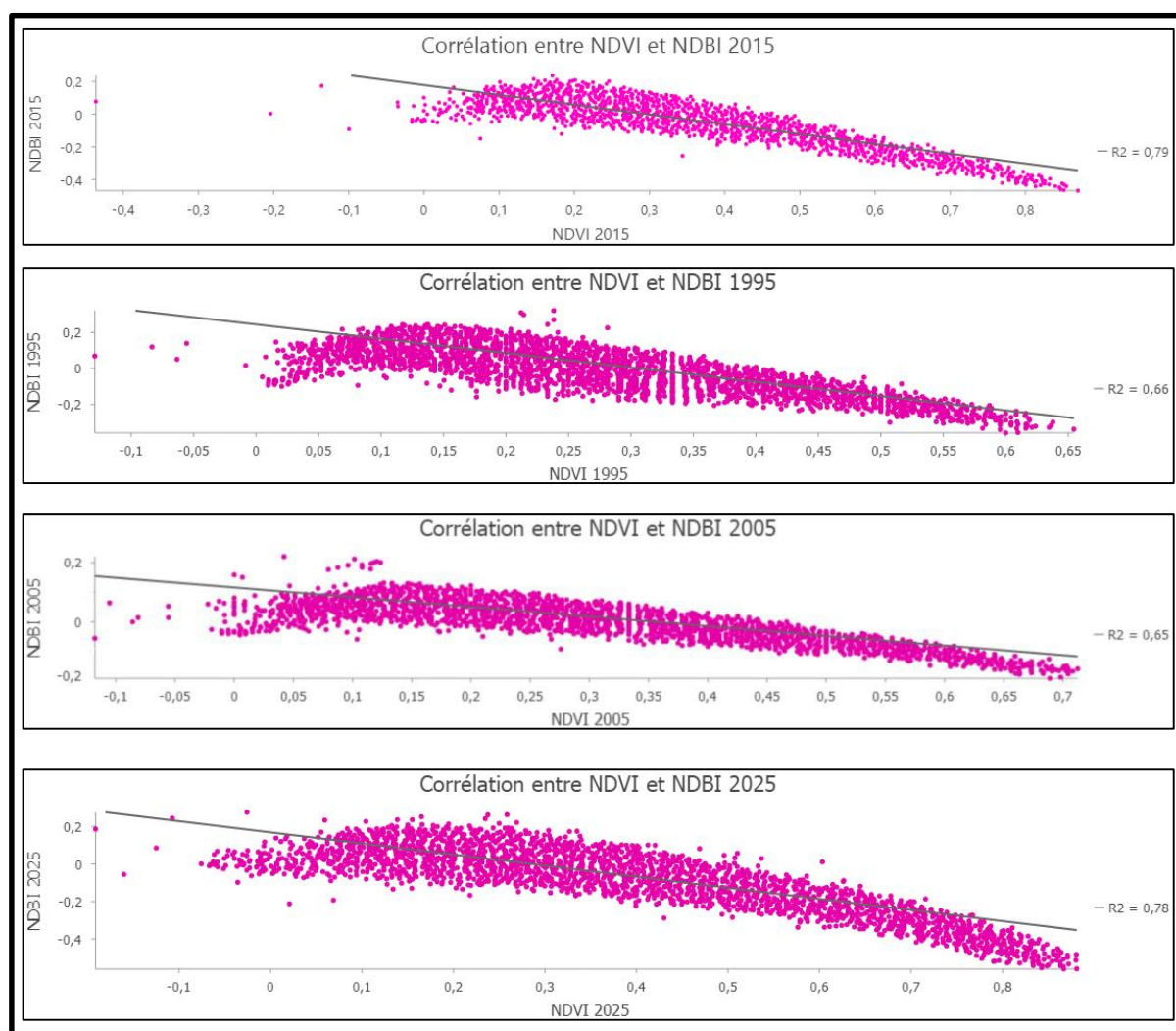


Figure 54. Matrice de corrélation entre NDBI et NDVI

Les relations de corrélation observées entre les différents indicateurs étudiés confirment les dynamiques spatiales attendues dans le contexte urbain. La relation **inverse et négative** entre le NDVI et le NDBI met clairement en évidence l'opposition entre les zones fortement végétalisées et les zones fortement urbanisées. En effet, les résultats montrent que plus les valeurs du NDVI sont élevées, plus celles du NDBI sont faibles, et vice versa. Étant donné que **tous les coefficients de corrélation obtenus sont sortis négatifs**, cela renforce l'idée d'une **relation inverse constante** entre ces deux indices, soulignant l'effet du développement urbain sur la réduction des espaces verts.

10.2. Relation NDVI–LST

Il s'agit d'une **relation inverse forte**. Plus la densité de végétation (NDVI) est élevée, plus la température de surface (LST) est faible. Cette tendance est particulièrement visible en 2025, avec des zones végétalisées présentant une atténuation thermique marquée.

10.3. Relation NDBI–LST

C'est une **relation directe**. L'expansion des zones construites (NDBI élevé) s'est accompagnée d'une élévation significative des températures de surface, notamment entre 2005 et 2015, en raison de l'utilisation de matériaux absorbant la chaleur (béton, bitume).

10.4. SUHI

A permis de mesurer l'écart thermique entre les zones urbaines et rurales. Ces écarts sont fortement influencés par les valeurs faibles de NDVI et élevées de NDBI.

10.5. UTFVI

Cet indice a permis de classer l'intensité du stress thermique urbain. Les zones fortement végétalisées présentent des valeurs faibles de l'UTFVI (faible stress), tandis que les zones urbanisées denses sont associées à des niveaux de stress thermique plus élevés.

11. Discussion à la lumière des études précédentes

- L'étude de **Selka et al. (2024)** sur la ville de Tlemcen confirme la corrélation entre l'urbanisation et l'augmentation de la température de surface, ainsi que le rôle clé de la végétation dans la régulation thermique.
- La recherche de **Gorai et al. (2024)** sur la mégapole de Kolkata montre des relations entre NDVI, NDBI et LST suivent la même logique.
- L'étude de **Selka et al. (2024)** sur la ville de Tlemcen montrent que la ville de Tlemcen a connu d'importantes transformations dans l'occupation et l'utilisation des sols entre 1995 et 2025. Les surfaces urbaines sont passées de 7,21 km² à 20,98 km² (+191 %), principalement au détriment des terres nues, qui ont diminué de 78 %. Les terres agricoles ont quant à elles augmenté de 76 %, tandis qu'une légère régression de 11 % a été observée au niveau des zones forestières.

Ces tendances rejoignent celles observées dans l'étude de Selka et al. (2024), qui a souligné que la conversion des espaces naturels ou agricoles en zones construites constitue un facteur déterminant dans l'élévation de la température de surface et la régression de la couverture végétale.

Ces mutations révèlent l'impact des dynamiques anthropiques sur l'environnement urbain et soulignent l'importance du suivi des changements LULC comme outil d'aide à la planification territoriale durable.

Conclusion

À la lumière de l'analyse spatio-temporelle de l'occupation du sol et des indicateurs thermiques dans la ville de Tlemcen, il apparaît clairement que les mutations urbaines des trente dernières années ont provoqué des déséquilibres environnementaux notables. L'expansion rapide des zones bâties a contribué à l'élévation de la température de surface, tandis que la réduction du couvert végétal a amplifié le phénomène des îlots de chaleur urbains.

Cependant, les données de 2025 révèlent une certaine stabilisation thermique, en partie grâce à la réintroduction d'espaces verts. Ces résultats soulignent l'importance d'intégrer les indicateurs NDVI, NDBI, LST, SUHI et UTFVI dans les outils de diagnostic urbain, en vue d'une planification durable et climatique des villes.

Conclusion générale

Cette étude s'est consacrée à l'analyse spatio-temporelle de l'occupation et de l'utilisation du sol dans la ville de Tlemcen, en mobilisant les images satellitaires et les outils des systèmes d'information géographique sur une période de trente ans (1995–2025). L'objectif principal était de comprendre les dynamiques de transformation du paysage urbain et leurs impacts sur les conditions thermiques de surface.

Les hypothèses initiales supposaient une expansion marquée des zones bâties au détriment du couvert végétal, entraînant une élévation des températures de surface (LST) et une intensification de l'effet d'îlot de chaleur urbain (SUHI). Les données Landsat, croisées avec les indices NDVI, NDBI, LST, SUHI et UTFVI, ont permis de valider ces hypothèses dans une large mesure.

Les résultats ont mis en évidence une croissance urbaine rapide (+191 %), au détriment des terres nues et d'une partie des espaces naturels, contribuant à une augmentation significative du stress thermique dans plusieurs quartiers, comme en témoignent les valeurs élevées de l'indice UTFVI.

La comparaison avec les études de Selka et al. (2024) et Gorai et al. (2024) montre que les changements dans l'occupation du sol constituent un facteur déterminant dans la compréhension des déséquilibres thermiques en milieu urbain.

Sur le plan opérationnel, cette étude recommande l'intégration systématique des indicateurs géospatiaux dans les stratégies de planification urbaine. Un suivi régulier des changements LULC via la télédétection est essentiel pour anticiper les pressions anthropiques et orienter les actions vers une ville plus résiliente et durable.

Enfin, les perspectives de recherche pourraient inclure des comparaisons intercommunales, l'étude des impacts microclimatiques des matériaux de construction, ou encore l'utilisation de modèles prédictifs pour simuler l'évolution des dynamiques urbaines.

Bibliographie

Ouvrage :

- 370250328-Levy-Et-Lassault-Dictionnaire-de-La-Geographie. (s. d.).
- Bertrand, M., Blot, F., Dascon, J., Gambino, M., Milian, J., & Molina, G. (s. d.). Géographie et représentations : De la nécessité des méthodes qualitatives.
- Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2015. (s. d.).
- UN-Habitat (Éd.). (2020). The value of sustainable urbanization. UN-Habitat.
- Notions fondamentales. Centre canadien de télédétection (s. d.).
- REMOTE SENSING AND IMAGE INTERPRETATION. Chipman. Keifer .7th (s. d.).

Thèses et mémoires :

- TELEDETECTION_and_S_I_G. Dr ASSOMA (2014).
- Abdelbaki Cherifa. (2016). SIG : Cours et travaux pratiques. Unpublished. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32223.66723>
- Polycopié SIG_S2. (s. d.).
- 02_GeneralitesSIG_2012. (s. d.).
- Mohamed, M. (2014). Kaddour Hicham. Galloua Mohamed El Amine.
- Batty, M. (s. d.). Big data, smart cities and city planning.
- World urbanization prospects : The 2018 revision. (2019). United Nations.
- Cour tldF M.Bounaceur. (s. d.).
- Claude Kergomard: LA TÉLÉDÉTECTION AÉRO-SPATIALE. (s. d.).
- CTeledetection CTS Mme SAAD. (2018).
- L'analyse urbaine.Mme. HAOUARI (2020).
- Cours télédétection. Mme. Asia(2018).
- Systemes_d'informations_geographiques. Mme ADJROUD (s. d.-a).
- Gestion de bases de données et SIG. (s. d.).

Revues et articles scientifiques :

- Angel, S., Parent, J., Civco, D. L., Blei, A., & Potere, D. (2011). The dimensions of global urban expansion: Estimates and projections for all countries, 2000–2050. *Progress in Planning*, 75(2), 53-107. <https://doi.org/10.1016/j.progress.2011.04.001>
- Carpentier-Postel, S. (2021). C. Aschan-Leygonie, C. Cunty, P.-A. Davoine, Les systèmes d'information géographique. Principes, concepts et méthodes : Armand Colin, 267 p. Mappemonde, 131. <https://doi.org/10.4000/mappemonde.5703>
- Farah, A., Algouti, A., Algouti, A., Ifkirne, M., & Rafik, A. (2021). Remote Sensing for Spatio-temporal Mapping of Land surface temperature and Surface Energy Fluxes in the Bouregreg-Chaouia Region of Morocco. *Journal of Environmental and Agricultural Studies*, 2(1), 23-35. <https://doi.org/10.32996/jeas.2021.2.1.4>
- Goodchild, M. F. (2010). Twenty years of progress : GIScience in 2010. *Journal of Spatial Information Science*, 1, 3-20. <https://doi.org/10.5311/JOSIS.2010.1.2>
- Gorai, N., Bandyopadhyay, J., Halder, B., Ahmed, M. F., Molla, A. H., & Lei, T. M. T. (2024). Spatio-Temporal Variation in Landforms and Surface Urban Heat Island in Riverine Megacity. *Sustainability*, 16(8), 3383. <https://doi.org/10.3390/su16083383>
- Halder, B., Bandyopadhyay, J., Khedher, K. M., Fai, C. M., Tangang, F., & Yaseen, Z. M. (2022). Delineation of urban expansion influences urban heat islands and natural environment using remote sensing and GIS-based in industrial area. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(48), 73147-73170. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20821-x>
- Jin, M. (2004). Analysis of Land Skin Temperature Using AVHRR Observations. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(4), 587-600. <https://doi.org/10.1175/BAMS-85-4-587>
- Laiche, M., & Si-Mohammed, D. (2018). Dynamiques D'urbanisation De La Ville D'Alger:, Quelles Opportunités Pour Le Développement Territorial. 665, *مجلة الباحث*. <https://doi.org/10.35156/0505-000-018-047>
- Li, S., & Ma, Y. (2014). Urbanization, Economic Development and Environmental Change. *Sustainability*, 6(8), 5143-5161. <https://doi.org/10.3390/su6085143>

- Maria De Almeida, C., Batty, M., Vieira Monteiro, A. M., Câmara, G., Soares-Filho, B. S., Cerqueira, G. C., & Pennachin, C. L. (2003). Stochastic cellular automata modeling of urban land use dynamics : Empirical development and estimation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 27(5), 481-509. [https://doi.org/10.1016/S0198-9715\(02\)00042-X](https://doi.org/10.1016/S0198-9715(02)00042-X)
- Miller, H. J., & Goodchild, M. F. (2015). Data-driven geography. *GeoJournal*, 80(4), 449-461. <https://doi.org/10.1007/s10708-014-9602-6>
- Selka, I., Mokhtari, A., Tabet Aoul, K., Bengusmia, D., Kacemi, M., & Djebbar, K. (2024). Assessing the Impact of Land Use and Land Cover Changes on Surface Temperature Dynamics Using Google Earth Engine : A Case Study of Tlemcen Municipality, Northwestern Algeria (1989–2019). *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 13(7), 237. <https://doi.org/10.3390/ijgi13070237>
- Seto, K. C., Güneralp, B., & Hutyrá, L. R. (2012). Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(40), 16083-16088. <https://doi.org/10.1073/pnas.1211658109>
- Weng, Q. (2012). Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas : Requirements, methods, and trends. *Remote Sensing of Environment*, 117, 34-49. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.030>
- Belguidoum, S. (2008). La ville en question—Analyse des dynamiques urbaines en Algérie.
- Denise, P. (2010). Une théorie géographique des villes.
- RD-Annual-Report-2021-fre. (s. d.).

Sites web :

- Abdelkader Tahar. (s. d.). Consulté 1 juin 2025, à l'adresse <https://books.openedition.org/pup/46285>
- Antonio Di Gregorio , 2005. (s. d.). Consulté 1 juin 2025, à l'adresse <https://www.fao.org/4/y7220e/y7220e00.htm#Contents>
- Esri, 2023. (s. d.). Consulté 1 juin 2025, à l'adresse <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/resources>
- ESRI la fonction d'un SIG. (s. d.). Consulté 31 mai 2025, à l'adresse <https://www.esri.com/fr-fr/what-is-gis/overview>

- Indices gallery. (s. d.). Consulté 31 mai 2025, à l'adresse <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/data/imagery/indices-gallery.htm>
- Système d'Information Géographique (SIG). (s. d.). Consulté 31 mai 2025, à l'adresse <https://www.smappen.fr/sig/>
- Wikimastersig Raster (Mode) 2015. (s. d.). Consulté 31 mai 2025, à l'adresse https://www.univ-st-etienne.fr/wikimastersig/doku.php/glossaire:raster_mode
- Tlemcen, Algérie. (s. d.). Consulté 1 juin 2025, à l'adresse <https://dateandtime.info/fr/citycoordinates.php?id=2475687>

Table des matières

Remerciements

إهداء

RésuméI

ملخص.....I

Abstract..... II

Listes des Figures VII

Liste des Tableaux.....IX

Introduction générale..... 1

1. L'objet de la recherche 2

2. Problématique..... 3

3. Hypothèses 3

4. Objectifs de la recherche 4

5. Méthodologie 5

Chapitre I: Analyse des villes - Fondements théoriques

1. Introduction..... 7

2. Concepts clés de l'analyse des villes 7

3. La méthode d'analyse des villes 7

4. Cadre méthodologique pour l'analyse des villes..... 8

5. Défis et perspectives de l'analyse des villes 9

6. La nécessité d'outils d'analyse avancés pour une gestion urbaine durable..... 10

Conclusion..... 11

Chapitre II : Systèmes d'Information Géographique (SIG) 12

1. Introduction 13

2. Systèmes d'Information Géographique (SIG) 13

2.1. Définitions 13

2.2. La fonction d'un SIG..... 14

2.3.	STRUCTURE D'UN SIG	15
2.4.	Domaines d'applications	15
3.	Information géographique :.....	16
3.1.	Composantes de l'information géographique :.....	16
3.2.	Les Modes de représentation de l'information géographique dans un SIG.....	17
3.2.1.	Mode vecteur :.....	18
3.2.2.	Mode raster.....	18
4.	Coordonnées d'un objet géographique et Géoréférencement.....	20
4.1.	Coordonnées d'un objet géographique	20
4.2.	Représentations planes en Algérie	20
4.3.	Principe du géoréférencement.....	21
5.	SIG 3D.....	22
5.1.	Le Modèle Numérique de Terrain (MNT)	22
5.2.	Le modèle d'élévations numérique (MNE)	22
	Conclusion.....	23
	Chapitre III : TELEDETECTION	24
1.	Introduction	25
2.	Définition	25
3.	Types de télédétection	28
3.1.	Télédétection Passive (images optiques)	28
3.2.	Télédétection Active (images radars)	28
4.	LES DOMAINES D'APPLICATION DE LA TELEDETECTION	28
5.	Bases physiques de la télédétection	29
6.	SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE	32
7.	La définition d'une orbite	34
8.	Images satellitaires	35
8.1.	Représentation des données	37

8.2. Visualisation des images	38
8.3. Prétraitement des images	39
9. CLASSIFICATION DE L'IMAGE	39
9.1. Classification non supervisée	40
9.2. Classification supervisée	40
10. Les indices de télédétection	40
10.1. Les indices de végétation	40
10.2. Les Indices hydrographiques	42
10.3. Les indices paysagers	42
11. Occupation et couverture du sol (Land Use and Land Cover)	43
12. La température de surface terrestre (LST)	45
CONCLUSION	47
Chapitre IV : Analyse spatio-temporelle de l'expansion urbaine de la ville de Tlemcen	
entre 1995 et 2025 à l'aide des SIG et de la télédétection	48
1. Introduction	49
2. Travaux antérieurs	49
3. Présentation de la zone d'étude	51
4. Matériel et données utilisées	52
4.1. Logiciels et outils	52
4.2. Données spatiales	53
4.3. Données auxiliaires	53
5. Prétraitement des images	54
6. Méthodologie de travail	57
7. Caractéristiques hydrologiques de Tlemcen	57
7.1. La représentation numérique du relief de la région de Tlemcen	58
7.2. Détermination de la direction de l'écoulement de l'eau à l'aide du modèle D8	59
7.3. Accumulation de flux	60

7.4.	Définition du réseau hydrographique (Stream Definition)	61
7.5.	Délimitation des sous-bassins versants de la ville de Tlemcen	62
7.6.	Caractéristiques hydrologique dans les sous-bassins de la ville TLEMEN :	63
8.	Utilisation et couverture des terres	64
8.1.	Les étapes principales de l'application LULC sous ArcGIS Pro	64
8.2.	Analyse de l'évolution de l'occupation du sol (LULC) à Tlemcen (1995 - 2025)	66
8.3.	Détection des changements de l'utilisation et de l'occupation du sol	68
9.	Calcul d'indices spectraux	70
9.1.	Analyse de l'évolution de l'indice NDVI entre 1995 et 2025	70
9.2.	Analyse de l'évolution de l'indice NDBI entre 1995 et 2025.....	72
9.3.	Analyse de l'évolution LST entre 1995 et 2025	74
9.4.	Évaluation spatio-temporelle D'Indice de variation du champ thermique urbain (UTFVI) dans la ville de Tlemcen	77
10.	Relations entre les indicateurs étudiés	79
10.1.	Relation entre NDVI et NDBI.....	79
10.2.	Relation NDVI–LST	80
10.3.	Relation NDBI–LST	80
10.4.	SUHI.....	80
10.5.	UTFVI	80
11.	Discussion à la lumière des études précédentes	81
	Conclusion.....	81
	Conclusion générale	82
	Bibliographie.....	84