



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة زيان عاشور-الجلفة
Université Ziane Achour – Djelfa
كلية علوم الطبيعة و الحياة
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département de sciences de Terre et l'univers
Mémoire de fin d'étude

En vu de l'obtention du diplôme académique de master en géographie et
Aménagement de territoire

Spécialité : Aménagement Urbaine

THEME

**La Modélisation Prospective de la Dynamique
Urbaine par le module LCM
Cas la ville d'El-Mniaa**

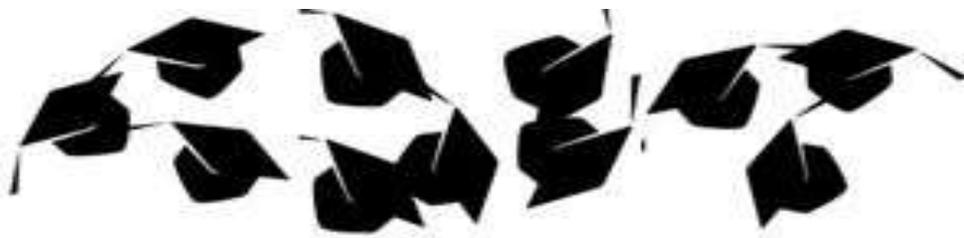
Préparé par :

- BOUREGBA Souad

Devant le jury :

Président : Mr. RABHI Bader Eddine Université de Djelfa
Promoteur : Mr. SEHL Boujemaa Université de Djelfa
Examineur: Mr. BENKHELIF Ammar Université de Djelfa

Année Universitaire :2022/2023



Remerciements

Tout d'abord nous rendons grâce à Dieu, lui qui nous a permis d'être bien portant afin d'effectuer ce travail du début jusqu'à la fin.

Nous remercions nos parents respectifs pour leurs soutiens durant notre parcours de formation.

Nos remerciements vont, à notre directeur de mémoire, le **Dr. SAHL Boujema**, il qui nous a guidés avec ses orientations, ses conseils et ses critiques tout au long de ce travail de recherche en nous laissant la liberté dont on avait besoins. On ne peut que lui être reconnaissant surtout pour ses qualités intellectuelles et humaines.

Nous remercions également tout le personnel de Club Géo.

Nos remerciements vont aussi au membre du jury, pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer ce travail et de participer à la soutenance.

Et enfin, nous sommes reconnaissants envers tous les enseignants de l'Université Ziane Achour de DJELFA (Aménagement de territoire) pour leur contribution à notre formation, et également à nos camarades, amis pour leurs aides précieuses.





Dédicace

Avec tous mes sentiments de respect, avec l'expérience de ma reconnaissance, je dédie ma remise de diplôme et ma joie

A mon paradis, à la prunelle de mes yeux, à la source de ma joie et mon bonheur, ma lune et le fil d'espoir qui allumer mon chemin, ma moitié, ma chère maman (DOUIDA Aicha)

A celui qui m'a fait une femme.ma source de vie, d'amour et d'affection, à mon support qui était toujours à mes cotes pour me soutenir et m'encourage, à mon prince papa (Mohammed)

A mes sœur (Fatima ; Yamina ; Asma ; Meriem et Sara) et mes frère (Ismail ; Ibrahim ; kada ; kheider et Hamid) qui n'ont pas cessée de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études. Que Dieu les protège et leurs offre la chance et le bonheur.

A mes anges de la maison (Fadwa ; Rafah ; Ahmed Reda ; Mohammed Amin ; Abd elrahmane et Minat)

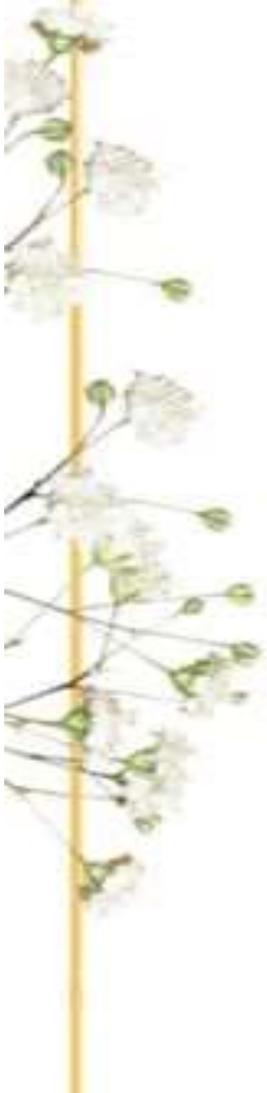
A mes grands-mères (zaouiya), mes oncles et mes tantes. Que Dieu leur donne une longue et joyeuse vie.

A mon cher ami Mohammed D Puisse Dieu vous donne santé, bonheur

A tous les cousins, les voisins et les amis que j'ai connu jusqu'à maintenant. Merci pour leurs amours et leurs encouragements.

Sans oublier mon encadreur Dr. SAHL Boujamaa ; et l'équipe de Club Géo

SOUAD



Sommaire

Remerciements.....	
Dédicace.....	
Introduction générale:	2

Chapitre I

Notion Théoriques

Introduction.....	6
I. La télédétection	7
I-1/- Définitions :	7
I-2/- L’historique de la télédétection	8
I-3/- Les domaines de l’application de la télédétection	9
I-4/- Les principes de la télédétection.....	10
I-4-1/- Source d’énergie ou d’illumination	10
I-4-2/- Rayonnement et atmosphère	10
I-4-3/- Interaction avec la cible.....	11
I-4-4/- Enregistrement de l’énergie par le capteur	11
I-4-5/- Transmission, réception et traitement	11
I-4-6/- Interprétation et analyse	11
I-4-7/- Application	11
I.5.Détection passive et active	11
I-6/- Satellite LANDSAT.....	12
I-6-1/- Le satellite LANDSAT 5.....	12
I-6-2/- Le satellite LANDSAT 7.....	13
I-6-3/- Le satellite LANDSAT 8.....	13
I-7/- Les compositions colorées (vraie / fausse couleur)	14
I-8/- Qu’est-ce qu’une image ?	15

I-8-1/- La résolution d'une image :.....	16
A/- La résolution spatiale :.....	16
B/- La résolution spectrale.....	16
C/- La résolution temporelle.....	16
D/- La Résolution radiométrique :.....	17
I-8-2/- Traitements des images.....	17
A/- Le prétraitement :	17
B/- Rehaussement de l'image.....	17
C/- Transformation de l'image.....	17
D/- Les indices.....	18
I-9/- Classification et analyse.....	19
I-9-1/- Classification non supervisé.....	19
I-9-2/- Classification supervisé.....	20
Google Earth Engine.....	20
II/- Le module LCM.....	21
III/- Le logiciel « Terrset ».....	21
Conclusion.....	23

Chapitre II

Présentation de la zone d'étude

Introduction.....	25
II-1 Situation géographique:.....	26
II-2 Caractéristiques physiques et naturelles :.....	28
II-2-1 Topographie et relief.....	28
II-2-2 Géologie et Hydrologie.....	28
II-2-3 Géomorphologie de la ville:.....	28
II-3 LES CONDITIONS CLIMATIQUES:.....	31
II-3-1- La température.....	31

II-3-2- La pluviométrie	33
II-3-2-1- Variations annuelles des précipitations.....	33
II-3-2-2- Variations moyennes mensuelles des précipitations :.....	34
II-3-2-3- l'humidité :	35
II-3-3- Les vents :	36
II-3-4- L'insolation :	37
II-3-5- Diagramme ombrothermique :	38
II-4 Etude démographique et socio-économique :	39
II-4-1- Evolution de la population :	39
II-4-2- L'estimation de la population de 2022	40
II-4-3- L'accroissance naturel :	41
II-4-4- La structure de la population PAR ÂGE ET PAR SEXE	41
II-4-5- Répartition économique de la population d'El-Menia :	43
Conclusion	45

Chapitre III

Matériels et Méthodes

Introduction.....	47
III-1- Justification des choix	47
III-1-2- Justification des dates et saisons	47
III-1-3- Justification du choix du model	48
III-2- Classification des images satellitaires :	48
III-2-1- Prétraitements et traitement	48
III-2-1-2- Corrections radiométriques et atmosphériques.....	48
III-2-2- Le traitement d'images	49
III-2-2-2- Les compositions colorées.....	49
III-2-2-3- La fusion : Multi-spectral / Panchromatique	51
III-2-2-4- Analyse en composantes principales (ACP).....	52

III-2-2-5- La colorimétrie (RVB → IHS)	52
III-2-2-6- Application des différents indices	52
III-2-7- Classification	55
III-2-7-1- Echantillonnage	55
III-2-8- Applications des classificateurs	56
III-2-9- Validation des cartes d'occupation :	57
III-3- La modélisation des changements :	58
III-3-1- Identification des facteurs explicatifs :	58
III-3-1-1- Facteur Lithologie	58
III-3-1-2- Facteur pentes	58
III-3-1-3- Facteurs Voirie	59
III-3-1-4- Centre urbain	59
III-3-2- Spatialisation et la validation des facteurs de changements	59
III-3-3- Validation des facteurs	59
III-3-4- Le choix du modèle de simulation de l'étalement urbain	59
III-3-5- Fonctionnement du modèle LCM	60
III-3-6- Méthodes d'évaluation des simulations produites par LCM :	63

Chapitre IV

Résultats et discussion

Introduction.....	67
IV-1-Évolution spatio-temporelle de la ville de Meniaa :	68
IV-2-L'évolution des classes de l'occupation du sol de Meniaa :	69
IV-3- La carte d'occupation de la ville de Meniaa à l'horizon 2030 :	71
VI-4- Occupation prospective du scénario tendanciel	72
VI-5- Matrice de transition 2010-2021	72
VI-6- Validation du modèle	73
VI-7- Budgétisation globale des (erreurs/exactitudes)	73

VI-8-Occupation du la ville de el meniaa à l'horizon 2045 :	74
VI-9-Analyse des changements pour chaque classe d'occupation du sol (2021-2030):	77
VI-10-Matrice de transition 2021-2030 :.....	77
VI-11-Contribution au changement net en classe urbaine	78
VI-12-Contribution au changement net en classe Agriculture	79
Conclusion	81
Conclusion Générale :.....	83
Références bibliographiques.....	85

Résumé

Liste des Figures

Figure 1 : Résumé d'indices de végétation définis à partir de données de télédétection	19
Figure 2 : Situation géographique de la zone Etude.....	27
Figure 3 : Les grandes unités géomorphologiques	29
Figure 4 Les grandes unités géomorphologiques	30
Figure 5: Oasis d'El Meniaa	31
Figure 6: Température moyenne mensuelle (2008-2017)	32
Figure 7: Précipitations annuelles (2008-2017)	34
Figure 8: Précipitation moyenne mensuelle (2008-2017)	35
Figure 9: L'humidité relative moyenne mensuelle du l'air (2008-2017).....	36
Figure 10: La vitesse moyenne mensuelle du vent (2008-2017).....	37
Figure 11: Moyenne mensuelle de l'insolation (2008-2017)	38
Figure 12: Diagramme ombrothermique établi avec la moyenne des précipitations et des températures de la station d'El-Goléa (2008-2017)	39
Figure 13: la structure de la population par âge et par sexe	43
Figure 14: : Répartition économique de la population d'El-Menia 2019.....	44
Figure 15 : Traitement de l'image tm4, LANDSAT 5	49
Figure 16 : Exemple d'une composition colorée vraies couleurs 123.	50
Figure 17: Exemple d'une composition colorée fausses couleurs 234	51
Figure 18: Application de l'indice IBS.	53
Figure 19 : La composition des 3 indices NDWI, NDVI et IB.	54
Figure 20: La composition des 3 indices NDWI, NDVI et IB	55
Figure 21 : Outil de digitalisation des zones d'entraînement « Digitize »	56
Figure 22 : le classificateur Maximum likelihood.....	57
Figure 23 : les 2 classificateurs Mindist et Piped.....	57

List des Tableau

Tableau 1 : température moyenne mensuelle (2008-2017)	32
Tableau 2 : Précipitation annuelle (2008-2017)	33
Tableau 3 Précipitation moyenne mensuelle (2008-2017).....	34
Tableau 4 L'humidité relative moyenne mensuelle du l'air (2008-2017).....	35
Tableau 5 : La vitesse moyenne mensuelle du vent (2008-2017)	37
Tableau 6: moyenne mensuelle de l'insolation (2008-2017)	37
Tableau 7: moyenne des précipitations et des températures (2008-2017)	38
Tableau 8: Evolution de la population	40
Tableau 9 : L'accroissance naturel	41
Tableau 10 La structure de la population par âge et par sexe d'année 2018.....	42
Tableau 11 : Répartition économique de la population d'El-Menia 2019	43
Tableau 12: Valeurs de l'indice de Kappa pour les trois cartes d'occupation des sols	68
Tableau 13:Présente la superficie et le pourcentage de chacune des classes d'occupation des sols pour les trois années choisies	69
Tableau 14: Matrice de transition.....	72
Tableau 15: Budgétisation globale	73
Tableau 16: Matrice de transition.....	74
Tableau 17: Matrice de transition (2021-2030).....	77
Tableau 18: Contribution au changement net en classe urbaine	78
Tableau 19: Contribution au changement net en classe Agriculture	79

Introduction Général

Introduction générale:

Le changement d'occupation des sols est l'évolution dans le temps et dans l'espace des catégories de cette occupation, soit vers un stade d'extrême dégradation ou soit vers un état d'équilibre plus ou moins stable (Adjinda et Hounton, 1997) : elle rend donc compte de l'ensemble des variabilités spatio-temporelles.

Ces changements naturels ou anthropiques dans l'environnement global. Par exemple, les changements dus à l'utilisation des terres et à la couverture des sols (e.g., urbanisation), aux ressources en eau et à leur qualité, à la surexploitation des ressources (surpâturage) ou à la fragmentation des milieux naturels (Sala et al. 2000) susceptible de modifier la capacité de la Terre. Ces multiples changements sont étroitement liés entre eux et interagissent avec les changements climatiques.

Dans la plupart des études générales, on a intégré une approche d'évaluation de la dynamique de l'occupation des terres en l'appuyant, avec une enquête socio-économique, sur les facteurs explicatifs des changements observés. Tchibozo (1981) a montré que la dynamique du milieu naturel est très liée à l'interaction des facteurs climatiques, tels que la température, l'humidité du sol. Nombre de géographes physiques appuient cette conception des facteurs explicatifs de la dynamique du milieu, dont Tchamié et Bouraïma (1997), qui soulignent que la répartition des formations végétales est non seulement liée aux facteurs climatiques mais également à la nature des sols et à la topographie. Par contre, d'autres réservent une part considérable d'explication des changements aux activités humaines.

En Algérie, l'équilibre de l'écosystème saharien a été pour longtemps assuré par une harmonie très rigide entre l'homme et le milieu extrême dans lequel il vit. Cet équilibre a été à l'origine des pratiques humaines ancestrales qui pouvaient assurer la durabilité et la régénération des ressources naturelles essentiellement par la présence de l'eau. Cependant, ce territoire qui fut l'espace du nomadisme et des grandes transhumances, a subi des modifications profondes ces dernières décennies, par l'apparition de nouvelles pratiques, étrangères au mode de vie des populations sahariennes notamment l'agriculture intensive et l'urbanisation. La conséquence de ces modifications étant une dégradation de plus en plus importante ressentie à tous les niveaux du territoire saharien.

Les approches d'étude de la dynamique de l'occupation des terres varient en fonction des disciplines scientifiques et des échelles spatiales d'analyse (Verburg, 2000).

Les chercheurs des sciences sociales utilisent des approches essentiellement descriptives. À une échelle spatiale plus grande, les géographes et les écologistes étudient les changements intervenus dans l'occupation des terres à partir des observations directes en se servant des techniques de la télédétection et des systèmes d'information géographique (SIG) (Lambin et al.,1999). À l'aide de ces techniques, ces spécialistes évaluent la dynamique de l'occupation des terres par des études multi-dates.

Cependant, il est important de noter que la modélisation prospective est basée sur des hypothèses et des données disponibles au moment de l'analyse. Les prédictions futures peuvent être influencées par de nombreux facteurs imprévisibles tels que les changements économiques, les politiques gouvernementales, les catastrophes naturelles, etc. Par conséquent, les résultats de la modélisation prospective doivent être interprétés avec prudence et mis à jour régulièrement pour refléter les nouvelles informations et les changements de contexte.

C'est pour cette raison que nous allons aborder le sujet de La modélisation prospective de la dynamique urbaine dans le cas de la ville d'El Meniaa; s'appuyant sur une étude diachronique des images satellitaires acquises en (2000, en 2010 et en 2021, pour analyser la dynamique d'occupation du sol dans la zone d'étude, notamment les changements de l'occupation des sols et la dynamique urbaine de la région d'El Menia.

Notre étude vise à analyser la dynamique spatiale et les changements arrivés pour des différents types d'occupation du sol ; qui se sont regroupés en 7 types : l'urbain, le sel, l'eau, hmada, l'agriculture ; le palmier et le sable.

Objectif de travail :

L'objectif principal de ce travail est d'appliquer le modèle Land Change Modler (LCM) qui permette de produire une prédiction à l'horizon de 2030 de l'occupation du sol de la ville de Meniaa, en prenant en compte l'imprécision et les lacunes de connaissances liées à cette problématique, des données disponibles, et en associant un degré de confiance aux résultats produits. La réalisation de cet objectif nécessite notamment la détermination des classes d'occupation des sols et la définition des facteurs qui motivent les changements passés et à venir.

En conséquence, la définition et la mise en œuvre d'une méthode de prédiction des changements future de l'occupation des sols, ce travail est structuré en sept chapitres :

- Le premier chapitre présente cadre théorique, la problématique générale et les divers enjeux du suivi et de la prédiction de l'occupation et de l'utilisation des sols. Une analyse des méthodes permettant d'effectuer une modélisation prédictive des modes d'occupation et d'utilisation des sols est donc réalisée afin de retenir une approche et d'utiliser un modèle adapté.
- Le deuxième chapitre est consacré pour la description du cadre physique et le cadre socio-économique de région du Meniaa, pour comprendre et avoir une idée claire sur les potentialités et les contraintes naturels et anthropiques de la région.

Le troisième chapitre décrit la méthodologie suivie pour l'élaboration de la carte d'occupation des sols future (2030) de la région de Meniaa et les méthodes utilisées pour réduire les sources d'incertitude liées à l'élaboration de cette carte.

Le quatrième chapitre discute la carte prospective de l'occupation des sols à l'horizon 2030, et l'impact des changements future sur l'environnement et l'activité socio-économique des populations.

Chapitre I

Notion Théoriques

Introduction

Le premier chapitre de cette recherche exposera les références conceptuelles de la recherche. Elle comportera les notions théoriques relatifs cités dans l'hypothèse, basés essentiellement sur une recherche bibliographique ; à savoir : la télédétection et le module LCM.

I. La télédétection

La télédétection apporte une information nouvelle, différente et spatialement localisée. En particulier, elle est la source principale d'information pour les études de la transformation du globe dans le cadre de programmes internationaux de recherche sur les changements planétaires et, à ce titre, elle intervient directement dans le développement de la conscience écologique de nos sociétés. (Bonn, F., Rochon, G., Précis de télédétection vol.1, 1993)

I-1/- Définitions :

Le mot télédétection (en anglais « *remotesensing* ») désigne l'ensemble des techniques qui permettent d'étudier à distance des objets ou des phénomènes. Le néologisme « *remotesensing* » fait son apparition aux Etats-Unis dans les années soixante, lorsque des capteurs nouveaux viennent compléter la traditionnelle photographie aérienne. Le terme de télédétection a été introduit officiellement dans la langue française en 1973¹ ; et sa définition officielle est la suivante : « L'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci » (Commission interministérielle de terminologie de la télédétection aérospatiale, 1988).

“TÉLÉDÉTECTION: Technique aérospatiale qui utilise l'énergie électromagnétique pour obtenir de l'information de la surface de la Terre et de l'atmosphère environnante sans contact direct.”²

Selon le centre canadien de la télédétection « La télédétection est la technique qui, par l'acquisition d'images, permet d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre sans contact direct avec celle-ci. La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information. » Dans la plupart des cas, la télédétection implique une interaction entre l'énergie incidente et les cibles. Le processus de la télédétection au moyen de systèmes imageurs comporte les sept étapes que nous élaborons ci-après. Notons cependant que la télédétection peut également impliquer l'énergie émise et utiliser des capteurs non-imageurs.

¹ Cours de Professeur Claude Kergomard, Ecole Normale Supérieure, Paris

² MANUEL de TÉLÉDÉTECTION SPATIALE Elaboré par: Francisco Eugenio González Javier Marcello RuizFerran Marqués Acosta,

Appliquée à l'observation de la Terre, la télédétection désigne la technique d'acquisition d'images et les techniques de traitement de ces images dans le but d'obtenir des informations sur la surface de la Terre, sans contact direct avec celle-ci¹.

La télédétection est la discipline scientifique qui regroupe l'ensemble des connaissances et des techniques utilisées pour l'observation, l'analyse, l'interprétation et la gestion de l'environnement à partir de mesures et d'images obtenues à l'aide de plateformes aéroportées, spatiales, terrestres ou maritimes, elle suppose l'acquisition d'information à distances, sans contact direct avec l'objet détecté²

I-2/- L'historique de la télédétection

L'histoire des techniques de la télédétection peut être découpée en cinq grandes époques :

- De 1856, date à laquelle, pour la première fois, un appareil photographique a été installé de façon fixe à bord d'un ballon, à la première guerre mondiale, se déroule l'époque des pionniers, pendant laquelle sont explorées les possibilités de la photographie aérienne verticale pour la cartographie ; les lois fondamentales de la stéréoscopie et de la photogrammétrie sont découvertes à la fin du XIXe siècle.
- De la première guerre mondiale à la fin des années 50, la photographie aérienne devient un outil opérationnel pour la cartographie, la recherche pétrolière, la surveillance de la végétation. On assiste à un progrès continu de l'aviation, des appareils photographiques et des émulsions (couleur, infrarouge noir et blanc, infrarouge fausse couleur). Les méthodes de la photo-interprétation sont précisées et codifiées. - la période qui commence en 1957 et s'achève en 1972 marque les débuts de l'exploration - de l'Espace et prépare l'avènement de la télédétection actuelle. Le lancement des premiers satellites, puis de vaisseaux spatiaux habités à bord desquels sont embarqués des caméras, révèle l'intérêt de la télédétection depuis l'espace. Parallèlement, les radiomètres-imageurs sont mis au point et perfectionnés, de même que les premiers radars embarqués à bord d'avions. La première application opérationnelle de la télédétection spatiale apparaît dans les années 60 avec les satellites météorologiques de la série ESSA.

¹ siteGéoBretagne, Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL), Région Bretagne

² Site de l'Université de Sherbrooke, Faculté des lettres et sciences humaines, Département de géomatique appliquée, Québec

- Le lancement en 1972 du satellite ERTS (rebaptisé ensuite Landsat 1), premier satellite de télédétection des ressources terrestres, ouvre l'époque de la télédétection moderne. Le développement constant des capteurs et des méthodes de traitement des données numériques ouvre de plus en plus le champ des applications de la télédétection et en fait un instrument indispensable de gestion de la planète, et, de plus en plus, un outil économique.
- Depuis les années 70, on assiste à un développement continu de la télédétection, marqué notamment par : - l'augmentation de la résolution spatiale des capteurs, déjà évoquée. - la diversification des capteurs qui utilisent des domaines de plus en plus variés et spécialisés du spectre électromagnétique. Dans les années 90, on assiste ainsi à la multiplication des satellites équipés de capteurs actifs, radars en particulier. Dans le domaine du rayonnement visible et infrarouge, les capteurs à très haute résolution spectrale sont aujourd'hui d'utilisation courante dans leur version aéroportée et font leur apparition à bord de satellites. - la diffusion des données sur une base commerciale, envisagée dès le lancement du programme SPOT en 1986, se traduit aujourd'hui par le lancement de satellites de télédétection par des sociétés privées.

Les données de télédétection deviennent l'objet d'un marché concurrentiel. La diffusion accélérée et l'augmentation de la puissance des ordinateurs contribue de façon continue à promouvoir de nouvelles méthodes d'utilisation des données toujours plus abondantes que fournit la télédétection spatiale. Les données des satellites météorologiques et océanographiques sont aujourd'hui un auxiliaire indispensable de la prévision numérique du temps et du climat et font l'objet d'une assimilation directe par les modèles numériques. Les images de télédétection destinées à l'observation fine de la surface terrestre, y compris les photographies aériennes traditionnelles, sont, sous forme numérique, intégrées aux Systèmes d'Information Géographique.¹

I-3/- Les domaines de l'application de la télédétection

Parallèlement, les applications de la télédétection se sont multipliées, dans de nombreux domaines de la météorologie et de la climatologie, de l'océanographie, de la cartographie ou de la géographie. Quel que soit le domaine d'application considéré, une bonne interprétation des documents de télédétection ou une bonne utilisation des données numériques nécessite la compréhension des principes physiques sur lesquels est fondée la technique de télédétection employée¹ ; Par exemple, l'application de la télédétection dans

¹ Cours de Professeur Claude Kergomard, Ecole Normale Supérieure, Paris

l'étude des surfaces continentales font fréquemment appel à des données à faible résolution spatiale. C'est ici le cas du suivi de la végétation continentale observée par les radiomètres optiques (visible et proche infrarouge) AVHRR des satellites météorologiques de la NOAA. L'activité chlorophyllienne est mesurée à partir d'un indice de végétation.¹

I-4/- Les principes de la télédétection

Le principe de la télédétection peut être schématisé ainsi : la surface de la Terre reçoit un rayonnement (par exemple émis par le soleil) et le réfléchit vers l'espace. Le rayonnement réfléchi est enregistré par un capteur (par exemple à bord d'un satellite), converti en données numériques, renvoyées à une station de réception située sur Terre. Ces données numériques, ou images, sont ensuite analysées et traitées afin d'en extraire des informations utiles.²

Ainsi, la télédétection permet d'acquérir des informations sur la surface de la Terre, inédites et complémentaires de celles déjà couramment utilisées (données in situ, données statistiques, etc.). On peut par exemple cartographier et suivre l'évolution de la végétation, des surfaces bâties, des parcelles agricoles, obtenir des informations sur l'humidité des sols, sur la température de surface de la Terre, etc. Autant d'informations utiles pour établir des diagnostics et/ou orienter et évaluer des politiques locales en aménagement du territoire.³

Le processus de la télédétection au moyen de systèmes imageurs comporte les sept étapes que nous élaborons ci-après.

I-4-1/- Source d'énergie ou d'illumination

À l'origine de tout processus de télédétection se trouve nécessairement une source d'énergie pour illuminer la cible.

I-4-2/- Rayonnement et atmosphère

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.

¹ Cours de Professeur Claude Kergomard, Ecole Normale Supérieure, Paris

² Site GéoBretagne, Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL).

³ Site de l'Université de Sherbrooke, Faculté des lettres et sciences humaines, Département de géomatique appliquée, Québec

I-4-3/- Interaction avec la cible

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.

I-4-4/- Enregistrement de l'énergie par le capteur

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 enregistré).

I-4-5/- Transmission, réception et traitement

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).

I-4-6/- Interprétation et analyse

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.

I-4-7/- Application

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.¹

I.5.Détection passive et active

L'énergie du Soleil est soit réfléchi (la portion visible) ou absorbée et retransmise (infrarouge thermique) par la cible. Les dispositifs de télédétection qui mesurent l'énergie disponible naturellement sont des capteurs passifs. Le capteur passif peut seulement percevoir l'énergie réfléchi lorsque le Soleil illumine la Terre. Il n'y a donc pas d'énergie solaire réfléchi le soir, tandis que l'énergie dégagée naturellement (l'infrarouge thermique) peut être perçue le jour ou la nuit.

Un capteur actif produit sa propre énergie pour illuminer la cible : il dégage un rayonnement électromagnétique qui est dirigé vers la cible. Le rayonnement réfléchi par la cible est alors perçu et mesuré par le capteur. Le capteur actif a l'avantage de pouvoir prendre des mesures à n'importe quel moment de la journée ou de la saison. Les capteurs actifs utilisent les longueurs d'onde qui ne sont pas produites en quantité suffisante par le

¹ centre canadien de télédétection

Soleil telles que les hyperfréquences ou pour mieux contrôler la façon dont une cible est illuminée. Par contre, les capteurs actifs doivent produire une énorme quantité d'énergie pour bien illuminer une cible. Le laser fluor mètre et le radar à synthèse d'ouverture (RSO) sont des exemples de capteurs actifs.¹

I-6/- Satellite LANDSAT

En télédétection, le capteur n'est donc plus un avion mais bien un satellite circulant en orbite quasipolaire et héliosynchrone, ce qui signifie qu'il passe au-dessus des pôles et se déplace en même temps que le mouvement apparent du soleil, de manière à couvrir au mieux la surface terrestre. L'altitude du satellite peut varier entre 800 et 900 km, (Steinberg, 2000).

Les données LANDSAT ont été utilisées par des gouvernements, des entreprises commerciales, des industries, des civils et des établissements d'enseignement dans le monde entier. Les données sont utilisées pour soutenir un large éventail d'applications dans des domaines tels que la recherche sur le changement global, l'agriculture, la sylviculture, l'exploitation minière, la couverture des terres et la détection des changements. Les images peuvent être utilisées pour cartographier les changements anthropiques et naturels sur la Terre sur des périodes allant de plusieurs mois à deux décennies. Les types de changements qui peuvent être identifiés comprennent le développement agricole, la déforestation, la désertification, les catastrophes naturelles, la prospection et la classification des minéraux, l'urbanisation, ainsi que le développement et la dégradation des ressources en eau.²

I-6-1/- Le satellite LANDSAT 5

Landsat 5 est un satellite de télédétection de l'US Geological Survey (USGS). Il a été lancé le 1er mars 1984 via un véhicule Delta 3925 de VAFB (Vandenberg Air Force Base), CA. Dans le cadre du programme Landsat. Landsat 4 et 5 ont été placés en orbite quasi circulaire héliosynchrone à une altitude de 705 km, une inclinaison de 98,2° et un cycle de répétition de 16 jours. Le temps de passage équatorial local du satellite est compris entre 9h30 et 10h00 sur un nœud descendant. La largeur de bande de l'instrument MSS reste la même qu'auparavant en augmentant le champ de vision (FOV) des capteurs de 11,56° à 14,92°.

¹ Le centre canadien de télédétection

² Satellite Imaging Corporation

En octobre 2007, deux batteries sont tombées en panne et l'exploitation du satellite a été suspendue pendant quatre mois. En mars 2008, l'exploitation a repris avec des restrictions supplémentaires. Il représentait une copie complète du satellite Landsat 4 avec les mêmes outils - un mappeur thématique (TM) et un scanner multispectral (MSS).

L'acquisition de données Landsat 5 MSS au-dessus des États-Unis a cessé en 1992 et les acquisitions mondiales ont pris fin en 1999. Des acquisitions limitées ont été effectuées de juin 2012 à janvier 2013.

I-6-2/- Le satellite LANDSAT 7

Impliquant trois grandes organisations gouvernementales américaines : La NASA, la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) et l'USGS (The United States Geological Survey) ont été lancées le 15 avril 1999 ; le Landsat 7 est équipé de l'ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus), qui fournit un relevé au sol en quatre modes : VNIR (visible et proche infrarouge), SWIR (infrarouge à ondes courtes), PAN (panchromatique - gamme panchromatique), TIR (infrarouge thermique - gamme infrarouge thermique).

L'instrument Landsat 7 ETM+ est conçu à l'exception du tableau de la bande infrarouge thermique, où la résolution au sol a été améliorée de 120 à 60 m.

L'instrument ETM intègre une nouvelle bande panchromatique de 15 m, ainsi qu'un convertisseur analogique-numérique de 9 bits. Une bande panchromatique a été ajoutée pour fournir des observations à une résolution spatiale plus élevée de Landsat 7, en complément des mesures multi spectrales de 30 m. Afin de limiter le flux de données télémétriques à un volume raisonnable, un système de 9 bits A à D a été conçu pour que les 8 bits supérieurs ou inférieurs de la radiométrie puissent être fournis par le système. Ceci introduit la possibilité de deux états de gain (haut et bas), ce qui, en particulier pour les paysages sombres, pourrait augmenter le signal radiométrique ; À une altitude de 705 km, un balayage complet de la surface par Landsat 7 prend 232 tours, soit 16 jours. Le relevé du terrain a lieu à environ 10 heures (± 15 minutes) selon l'heure solaire locale.¹

I-6-3/- Le satellite LANDSAT 8

Huitième satellite de la série des satellites LANDSAT, LANDSAT 8 poursuivra et fera progresser la collecte de données LANDSAT avec une charge utile à deux capteurs.

¹ Earthobserving system

Le satellite LANDSAT 8 possède deux capteurs principaux : l'imageur terrestre opérationnel (OLI) et le capteur infrarouge thermique (TIRS).

OLI collectera des images en utilisant neuf bandes spectrales dans différentes longueurs d'onde de la lumière visible, de l'infrarouge proche et des ondes courtes pour observer une bande de 185 kilomètres (115 miles) de large de la Terre avec une résolution de 15 à 30 mètres couvrant de larges zones du paysage terrestre tout en fournissant une résolution suffisante pour distinguer des caractéristiques comme les centres urbains, les fermes, les forêts et d'autres utilisations des terres.

TIRS a été ajouté à la mission du satellite lorsqu'il est devenu évident que les gestionnaires des ressources en eau des États s'appuient sur les mesures très précises de l'énergie thermique de la Terre obtenues par les prédécesseurs du LDCM, LANDSAT 5 et LANDSAT 7, pour suivre l'utilisation des terres et des eaux. Comme près de 80 % de l'eau douce de l'ouest des États-Unis est utilisée pour irriguer les cultures, le TIRS deviendra un outil précieux pour gérer la consommation d'eau.¹

I-7/- Les compositions colorées (vraie / fausse couleur)

Les compositions colorées consistent à affecter aux trois couleurs primaires (rouge, vert, bleu). En fonction de l'affectation des couleurs primaires aux trois bandes spectrales, on obtient soit une composition colorée dite naturelle ou 'vraies couleurs', soit une composition en 'fausses couleurs'.

Dans une image en 'vraies couleurs', on affecte aux bandes spectrales acquises dans les longueurs d'onde du bleu, du vert et du rouge, les trois couleurs primaires correspondantes. Le rouge est attribué à la bande rouge, le vert à la bande verte et le bleu à la bande bleue. L'image

Résultante correspond donc exactement à ce qu'un observateur pourrait observer s'il se trouvait à bord du satellite. Par exemple dans une image qui présente une composition en vraies couleurs réalisées à partir des bandes spectrales bleue, verte et rouge du capteur Landsat TM., la végétation apparaît en vert foncé, les surfaces cultivées en vert plus clair et les surfaces minérales (bâties) apparaissent très claires (blanc). L'eau.. Si les bandes spectrales de l'image ne correspondent pas aux trois couleurs primaires, l'image qui en résulte est appelée une image en 'fausses couleurs'. Par conséquent, la couleur d'un objet

¹ Satellite Imaging Corporation

dans l'image affichée n'a pas de ressemblance avec sa couleur réelle. Il existe plusieurs façons de produire des images en 'fausses couleurs' chacune étant plus adaptée à une application particulière. Si on prend une image satellitaire, mais avec une composition colorée en fausses couleurs. La couleur rouge est associée à la bande proche IR, la couleur verte à la bande rouge et la couleur bleue à la bande verte. Cette combinaison, dite 'infrarouge fausses couleurs' est très utilisée en télédétection car elle est tout à fait adaptée à l'étude de la végétation.

Sur la composition colorée, la végétation apparaît dans différentes teintes de rouge en fonction des espèces, mais aussi des conditions environnementales. La mangrove que l'on observe sur le pourtour de la baie apparaît dans des rouges plus foncés que la végétation environnante. L'eau qui absorbe pratiquement toutes les longueurs d'onde apparaît très foncée, presque noire, alors que les surfaces minérales apparaissent très claires, dans des tons allant du bleu clair au blanc¹.

I-8/- Qu'est-ce qu'une image ?

Pour le Petit Robert, l'image se définit comme la représentation analogique d'un être, d'une chose, ajoutons pour notre propos, d'une scène ou d'objets présents à la surface du sol. Elle est analogique puisque les objets réels sont représentés par une distribution des tons de gris ou de couleurs qui grâce à la capacité interprétative de notre cerveau, est associée aux images mentales que nous possédons.

L'énergie électromagnétique peut être perçue de façon photographique ou de façon électronique. Le processus photographique utilise une réaction chimique sur une surface sensible à la lumière pour capter et enregistrer les variations d'énergie. Il est important, en télédétection, de distinguer les termes "image" et "photographie".

Une image est une représentation graphique, quels que soit la longueur d'onde ou le dispositif de télédétection qui ont été utilisés pour capter et enregistrer l'énergie électromagnétique. Une photographie désigne spécifiquement toute image captée et enregistrée sur une pellicule photographique²

Trois paramètres principaux caractérisent les images provenant des capteurs de télédétection: la résolution spatiale: la capacité de distinction de deux points rapprochés,

¹ Cours : EnvCAL - Suivi de l'environnement par télédétection, Université Virtuelle Environnement et Développement Durable

² Le centre canadien de la télédétection

autrement dit la surface couverte par un pixel; la résolution spectrale: la capacité de discrimination des objets entre eux, à résolution spatiale identique, influencée par la largeur de la (des) gamme(s) de longueurs d'ondes captées pour produire l'image (Girard et Girard, 1989); le champ global ou scène : la surface totale constituant une image .

I-8-1/- La résolution d'une image :

A/- La résolution spatiale :

La résolution spatiale d'un capteur passif (nous regarderons plus loin le cas spécial des capteurs actifs) dépend principalement de son champ de vision instantanée (CVI). Le CVI est défini comme étant le cône visible du capteur et détermine l'aire de la surface "visible" à une altitude donnée et à un moment précis. La grandeur de cette aire est obtenue en multipliant le CVI par la distance de la surface au capteur.

B/- La résolution spectrale

La résolution spectrale décrit la capacité d'un capteur à utiliser de petites fenêtres de longueurs d'onde. Plusieurs instruments de télédétection peuvent enregistrer l'énergie reçue selon des intervalles de longueurs d'onde (bandes spectrales ou canaux spectraux) à différentes résolutions spectrales. Plus la résolution spectrale est fine, plus les fenêtres des différents canaux du capteur sont étroites, et plus la détection et la différenciation des objets sont précises. Des capteurs multi spectraux plus développés, appelés capteurs hyper-spectraux, sont capables de détecter des centaines de bandes spectrales très fines dans la portion du spectre des ondes électromagnétiques réunissant le visible, le proche infrarouge et l'infrarouge moyen. Leur grande résolution spectrale facilite la différenciation des caractéristiques d'une image basée sur la réponse différente dans chacune des bandes spectrales.

C/- La résolution temporelle

En plus de la résolution spatiale et spectrale, l'autre concept important en télédétection est celui de la résolution temporelle. Celle-ci dépend de la période de passage au nadir d'un satellite, qui est le temps que prend un satellite pour effectuer un cycle orbital complet et pour observer de nouveau exactement la même scène à partir du même point dans l'espace.¹

¹ 1Eurostat, "Manuel des concepts relatifs aux systèmes d'information sur l'occupation et l'utilisation des sols (Édition 2000)", Office des publications officielles des Communautés européennes, Luxembourg, 2001

D/- La Résolution radiométrique :

Le nombre de différentes intensités de radiation que le capteur est capable de distinguer. Typiquement, cela varie de 8 à 14 bits, ce qui correspond à 256 niveaux de l'échelle de gris et jusqu'à 16.384 intensités ou de "nuances" de couleurs, dans chaque bande. La Résolution radiométrique dépend aussi du bruit de l'appareil.¹

I-8-2/- Traitements des images**A/- Le prétraitement :**

On appelle fonctions de prétraitement les opérations qui sont normalement requises avant l'analyse principale et l'extraction de l'information. Les opérations de prétraitement se divisent en corrections radiométriques et en corrections géométriques.

Les corrections radiométriques comprennent entre autres, la correction des données à cause des irrégularités du capteur, des bruits dus au capteur ou à l'atmosphère, et de la conversion des données afin qu'elles puissent représenter précisément le rayonnement réfléchi ou émis mesuré par le capteur.

Les corrections géométriques comprennent la correction pour les distorsions géométriques dues aux variations de la géométrie Terre-capteur, et la transformation des données en vraies coordonnées (par exemple en latitude et longitude) sur la surface de la Terre.

B/- Rehaussement de l'image

Les fonctions de rehaussement ont pour but d'améliorer l'apparence de l'imagerie pour aider l'interprétation et l'analyse visuelles. Les fonctions de rehaussement permettent l'étirement des contrastes pour augmenter la distinction des tons entre les différents éléments d'une scène, et le filtrage spatial pour rehausser (ou éliminer) les patrons spatiaux spécifiques sur une image.

C/- Transformation de l'image

A transformation de l'image combine le traitement des données de plusieurs bandes spectrales. Des opérations arithmétiques (c'est-à-dire addition, soustraction, multiplication, division) sont faites pour combiner et transformer les bandes originales en de "nouvelles" images qui montrent plus clairement certains éléments de la scène. Nous allons examiner

¹ MAWRED knowledge hub

certaines de ces opérations incluant les diverses méthodes de rapport de bande aussi appelé rapport spectral et un procédé appelé analyse des composantes principales qui est utilisée pour mieux représenter l'information en imagerie multi spectrale.¹

D/- Les indices

La nature numérique des données de télédétection se prête particulièrement bien à des opérations entre canaux. Le principe de ces opérations est d'effectuer, pour chaque pixel, des opérations mathématiques plus ou moins complexes faisant intervenir les valeurs numériques observées pour ce pixel dans les différentes bandes spectrales.

En télédétection, les indices font parties des méthodes de traitement que l'on appelle les transformations multi spectrales. Ils consistent à convertir les luminances mesurées au niveau du capteur satellitaire en grandeurs ayant une signification dans le domaine de l'environnement. Basés sur le caractère multi spectral des données satellitaires, ils permettent de décrire l'état d'un phénomène, tous les indices, que ce soient les indices de végétation, les indices des sols, les indices relatifs à la colonne d'eau, etc., reposent sur une approche empirique basée sur des données expérimentales. Un indice de végétation par exemple, peut rendre compte du stade de croissance végétale à un moment donné.

E/- Les indices de végétation

De très nombreux indices de végétation ont été construits et utilisés depuis maintenant une quarantaine d'années. Ils prennent la forme soit d'expressions très basiques (simple différence ou simple ratio), soit de formules beaucoup plus complexes. On a l'habitude de les classer en familles d'indices selon qu'ils prennent ou non en compte les facteurs externes aux couverts végétaux, tels que l'influence de l'atmosphère, la contribution spectrale des sols, la teneur en eau des végétaux (indices de sécheresse)

Les indices de végétation sont très utilisés d'une part, pour identifier et suivre la dynamique de la végétation, mais aussi pour estimer certains paramètres biophysiques caractéristiques des couverts végétaux, comme la biomasse, l'indice de surface foliaire, la fraction de rayonnement photosynthétique actif, etc.,²

¹ Tutoriels sur la télédétection, site officiel du gouvernement du CANADA

² Cours :EnvCAL - Suivi de l'environnement par télédétection

I-9/- Classification et analyse

Les opérations de classification et d'analyse d'image sont utilisées pour identifier et classer numériquement des pixels sur une image. Il existe une variété d'approches prises pour faire une classification numérique. Nous allons brièvement décrire deux approches générales qui sont souvent utilisées, la classification supervisée et la classification non supervisée

I-9-1/- Classification non supervisée

Les classes spectrales sont formées en premier, basées sur l'information numérique des données seulement. Ces classes sont ensuite associées, par un analyste, à des classes d'information utile (si possible). Des programmes appelés algorithmes de classification sont utilisés pour déterminer les groupes statistiques naturels ou les structures des données. Habituellement, l'analyste spécifie le nombre de groupes ou classes qui seront formés avec les données. De plus, l'analyste peut spécifier certains paramètres relatifs à la distance entre les classes et la variance à l'intérieur même d'une classe. Le résultat final de ce processus de classification itératif peut créer des classes que l'analyste voudra combiner, ou des classes qui devraient être séparées de nouveau. Chacune de ces étapes nécessite une nouvelle application de l'algorithme.

L'intervention humaine n'est donc pas totalement exempte de la classification non supervisée. Cependant, cette méthode ne commence pas avec un ensemble prédéterminé de classes comme pour la classification supervisée. (Girard, 1989)

Les indices simples	
$DVI = \rho_{NIR} - \rho_R$	Bacour et al. (2006)
$EVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R}$	Krieger et al. (1988) ; Jordan (1969)
$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R}$	Reiche and Haas (1973) ; Tucker (1979)
Les indices de stress hydrique	
$JSI = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR}}$	Hunt and Rock (1989)
$NDWI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR}}$	Gao (1996)
Les indices prenant en compte l'efficacité des sols	
$PVI = \frac{1}{\sqrt{2+1}}(\rho_{NIR} - \rho_{SWIR} - b)$	Richardson and Wiegand (1977)
$SAVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R + L} (1 + L)$	Huete (1988)
$TSAVI = \frac{\alpha(\rho_{NIR} - \rho_R - b)}{\rho_R + \rho_{NIR} - b + 0,05(1 + \alpha)}$	Barot et al. (1989)
$MSAVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R + L} (1 + L)$	Qi et al. (1994)
Les indices prenant en compte les effets conjugués des sols et de l'atmosphère	
$AWVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_A}{\rho_{NIR} + \rho_A}$	Kaufman and Tanré (1992)
$GEMI = \frac{1}{2} (1 - 0,25\alpha) - \frac{\rho_{NIR} - 0,25}{1 + \rho_{NIR}}$	Pinty et Verstraete (1992)
Les indices prenant en compte les effets conjugués des sols et de l'atmosphère	
$EVI = G \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + C_1 \rho_R + C_2 (1 - \rho_R)}$	Huete et al. (1990)
Les indices prenant en compte les températures de surface	
$TDDVI = \frac{T_s - T_{s(NDVI)}}{\alpha + kNDVI - T_{s(NDVI)}}$	Sandholt et al. (2002)

Figure 1 : Résumé d'indices de végétation définis à partir de données de télédétection

I-9-2/- Classification supervisé

Lors de l'utilisation d'une méthode de classification supervisée, l'analyste identifie des échantillons assez homogènes de l'image qui sont représentatifs de différents types de surfaces (classes d'information). Ces échantillons forment un ensemble de données-tests. La sélection de ces données-tests est basée sur les connaissances de l'analyste, sa familiarité avec les régions géographiques et les types de surfaces présents dans l'image. L'analyste supervise donc la classification d'un ensemble spécifique de classes. Les informations numériques pour chacune des bandes et pour chaque pixel de ces ensembles sont utilisées pour que l'ordinateur puisse définir les classes et ensuite reconnaître des régions aux propriétés similaires à chaque 14 classe.¹

L'ordinateur utilise un programme spécial ou algorithme afin de déterminer la "signature" numérique de chacune des classes. Plusieurs algorithmes différents sont possibles. Une fois que l'ordinateur a établi la signature spectrale de chaque classe à la classe avec laquelle il a le plus d'affinités. Une classification supervisée commence donc par l'identification des classes d'information qui sont ensuite utilisées pour définir les classes spectrales qui les représentent. (Boukheir R., al 2001).

Google Earth Engine

Google earth engine est une plate-forme d'analyse géospatiale basée sur le cloud, qui permet aux utilisateurs de visualiser et d'analyser les images satellite de notre planète. Les scientifiques et les organismes à but non lucratif utilisent Google Earth Engine pour la recherche en télédétection, la prédiction des épidémies, la gestion des ressources naturelles et d'autres activités. Vos élèves peuvent accéder à ces informations afin de participer aux discussions et devenir eux-mêmes des data scientists.

Google Earth Engine regroupe plus de 40 ans d'images satellite anciennes et actuelles, ainsi que les outils et la puissance de calcul nécessaires pour analyser et exploiter cet immense entrepôt de données. Cette plate-forme à l'échelle planétaire est dédiée à l'analyse des données environnementales. Elle constitue un outil extrêmement précieux pour les étudiants qui souhaitent approfondir leurs connaissances sur les conséquences du changement climatique et sur bien d'autres sujets.

¹ Mlle. SITAYEB AICHA ;Mlle. HAMADENE IMANE Cartographie et analyse spatiale de la dynamique de l'occupation du sol dans la commune de Mohammadia

II/- Le module LCM

Land Change Modeler est une application verticale au sein de Terrset orientée vers le problème urgent de la conversion accélérée des terres et les besoins très spécifiques de la conservation de la biodiversité. Les utilisateurs de Clark Labs qui s'intéressent aux changements de terres et à la conservation constateront que cette application fournit un ensemble robuste d'outils pour l'analyse des changements et la création de plans et de scénarios viables pour l'avenir.

Le modélisateur de changement de terrain (Land Change Modeler) a été développé (Eastman 2006) comme un outil de projection du changement de terrain paramétré empiriquement pour soutenir un large éventail de planification activités. Sur la base d'une analyse de l'évolution historique de la couverture terrestre, le système développe un modèle empirique de la relation entre les transitions de la couverture terrestre et un ensemble des variables explicatives.

Les cartographies des changements futurs sont alors basées sur ces variables empiriques et la projection de la quantité dérivée d'une chaîne de Markov. Le résultat est une projection du changement dans le cadre du statut (BAU) sans intervention subjective. Il est conçu pour soutenir des applications ayant des besoins de base BAU stricts, comme le REDD (Réduction des émissions dues à la déforestation et à la dégradation des forêts) atténuation du climat projets.

LCM est maintenant utilisée par le public depuis plus de dix ans. IL a été commandé par la Conservation International et la communauté de la conservation constitue toujours le plus grand nombre d'utilisateurs.¹

III/- Le logiciel « Terrset »

Est un logiciel géo spatial intégré pour la surveillance et la modélisation du système terrestre pour le développement durable. Le système Terrset intègre les outils IDRISI GIS Analysais et IDRISI Image Processing, ainsi qu'une constellation d'applications verticales. Terrset offre le plus vaste ensemble d'outils géo spatiaux de l'industrie en un seul forfait abordable. Il n'est pas nécessaire d'acheter des suppléments coûteux pour étendre vos capacités de recherche.

¹ A Short Presentation of the Land Change Modeler (LCM) ,J.R. Eastman and J. Toledano ,Chapter 36

Terrset est une marque déposée de Clark University par Clark Labs (est un centre de recherche, une unité d'entreprise au sein de l'Université Clark. Elle a été fondée en 1987 par le professeur Ron Eastman de l'École supérieure de géographie). Clark Labs se consacre par ce logiciel au développement et à la compréhension de l'analyse géographique assistée par ordinateur.

« Nous avons été les pionniers de l'avancement théorique et de l'application de l'analyse géospatiale dans des domaines tels que les SIG, le soutien à la décision, la modélisation de la couverture terrestre, la surveillance du climat, les SIG de conservation, l'analyse des changements et des séries chronologiques, le traitement d'images numériques, la gestion de l'incertitude, et le transfert de technologie. Le système Terrset est une manifestation de cette union de la recherche théorique et appliquée et, en conséquence, fournit une profondeur analytique qui est unique à l'industrie ».¹

¹ Clark Labs, Clark University

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons essayé d'identifier les notions les plus importantes et essentielles inclus dans cette étude pour la rendre Compréhensible et facile à comprendre ; on a cité aussi les étapes importantes de la télédétection sans oubliant la présentation du logiciel utilisé « TERRSET ».

Chapitre II
Présentation de la zone
d'étude

Introduction

Ce chapitre s'articule autour des éléments qui composent notre zone d'étude, pour cela, nous essayerons tout d'abord de mieux positionner la ville d'El-Menia dans un contexte géographique et administratif puis nous allons établir une étude du cadre physique et naturel ainsi que les caractéristiques socio-économiques afin de la présenter d'une manière générale.

II-1 Situation géographique:

(El-Goléa situé dans le center de l'Algérie, elle est composée d'El-Meniaa et Hassi El Gara qui forme une oasis Attrayant Créé sur les bords d'oued Segueur).

El-Meniaa Situé à une latitude de 30°35'Nord et une longitude de 02°52'Est, son altitude moyenne atteint 396m cette ensemble est bordé par l'immense partie du grand Erg occidental côté Ouest et à l'Est on trouve la falaise de hamada qui forme le plateau de Tademaït.

Loin de la capitale (Alger) de 900 km et de 470 km du pied de l'atlas saharien. Le site est un lieu de transit important vers le grand sud saharien et le Niger. Les oasis voisines sont :

- In Salah à 400 km au sud.
- Ghardaïa à 270 km au Nord-Est.
- Timimoune à 360 km Sud-Ouest.
- Ouargla à 410 km à l'Est.

Il constitue actuellement un lieu de rencontre des voies venant du côté Ouest du Saoura (Adrar, Timimoune) et du plein sud (Tamanrasset, In Salah et Niger), et la route nationale projetée de l'est (Hassi Messaoud, Ouargla), sa position géographique et géostratégique attire les populations voisines, comme elle permet d'établir un équilibre spatial et fonctionnel pour l'ensemble de la wilaya, et lui offre un statut d'une zone militaire importante.

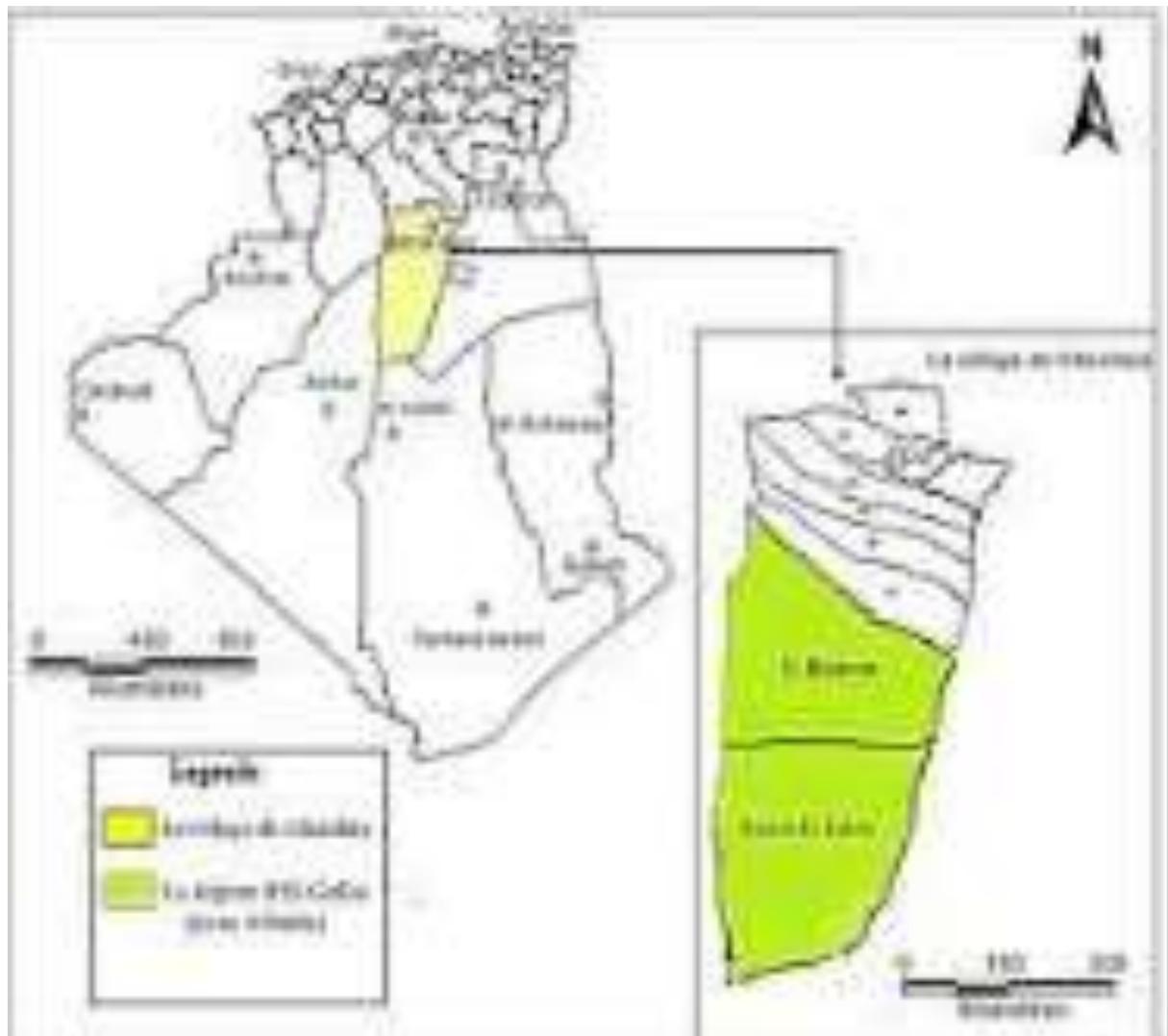


Figure 2 : Situation géographique de la zone Etude

II-2 Caractéristiques physiques et naturelles :

II-2-1 Topographie et relief

El-Menia est située à une altitude de 397 mètres dans les jardins de l'oasis, la falaise (hassi-Gara) qui la surplombe à une hauteur de 80 mètres, sur la berge de l'oued Seggueur, où on note l'existence des pitons en forme de Tableaux bien caractéristiques dans le Sahara qui atteignent 100 mètres de hauteur, ce sont le Ksar El-Menia et Garet Tin Bouzid

II-2-2 Géologie et Hydrologie

La ville d'El-Menia est caractérisée par les facteurs géologiques et hydrologiques suivants :

- A- présence des intercalations calcaires (encroutements, assises) dans certaines formations géologiques.
- B- un mauvais drainage naturel
- C- présence d'une nappe phréatique à faible profondeur (moins d'un mètre).

Malgré son abondance, la qualité chimique de l'eau reste une contrainte de restriction à un certain nombre de cultures du point de vue salinité et alcalinité.

II-2-3 Géomorphologie de la ville:

El Meniaa dont l'altitude moyenne est de l'ordre de 400m, se caractérise par un grand ensemble à savoir : Le Reg. Les autres formations sont le plateau de Tademaït et le grand Erg Occidental.

Le Reg est une vaste zone caillouteuse ayant une biomasse presque nulle. Toutefois, ces milieux extrêmes ont favorisé l'apparition d'espèces spécifiques remarquablement adaptées et caractéristiques du Sahara.

On peut distinguer plusieurs unités écologiques dans la zone d'étude avec des habitats naturels assez distingués :

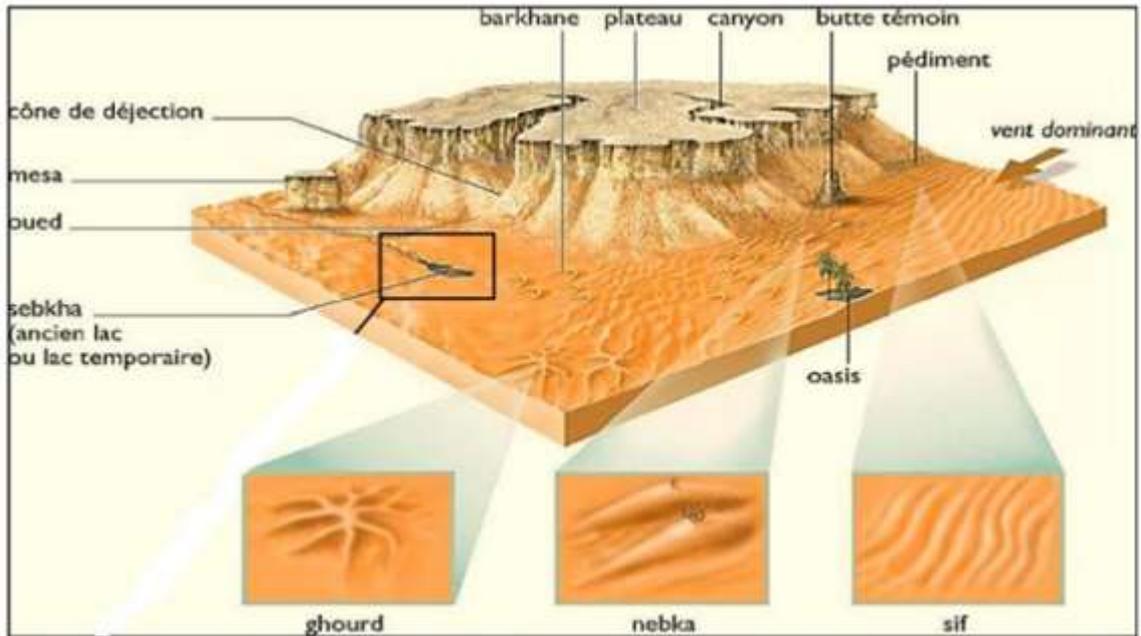


Figure 3 : Les grandes unités géomorphologiques

Le plateau de Tademaït : une région située entre le Sahara algérien dans le Sud et le Grand Erg Occidental. Il occupe principalement la partie Sud de la zone d'étude. Le Tademaït est traversé par plusieurs oueds à *Acacia radiana* et *panicum turgidum* avec un riche cortège faunistique et floristique. On y trouve également du *Citrullus colocynthis*.

Le grand Erg occidental et les espaces de dunes : Ce sont des unités morphologiques assez importantes qui constituent une forme d'accumulation sableuse. Ils occupent une grande partie de la région. Le Grand Erg Occidental est un massif de dunes qui culmine à près de 300 mètres de haut, il occupe la partie Est des communes d'El Meniaa, Mansoura et Hassi Fhel. Il existe d'autres Ergs ou dunes moins importants. Aussi, les dunes sont un produit touristique à valoriser auprès des touristes algériens et étrangers notamment par le biais d'activités sportives tel le ski sur sable et le quad.

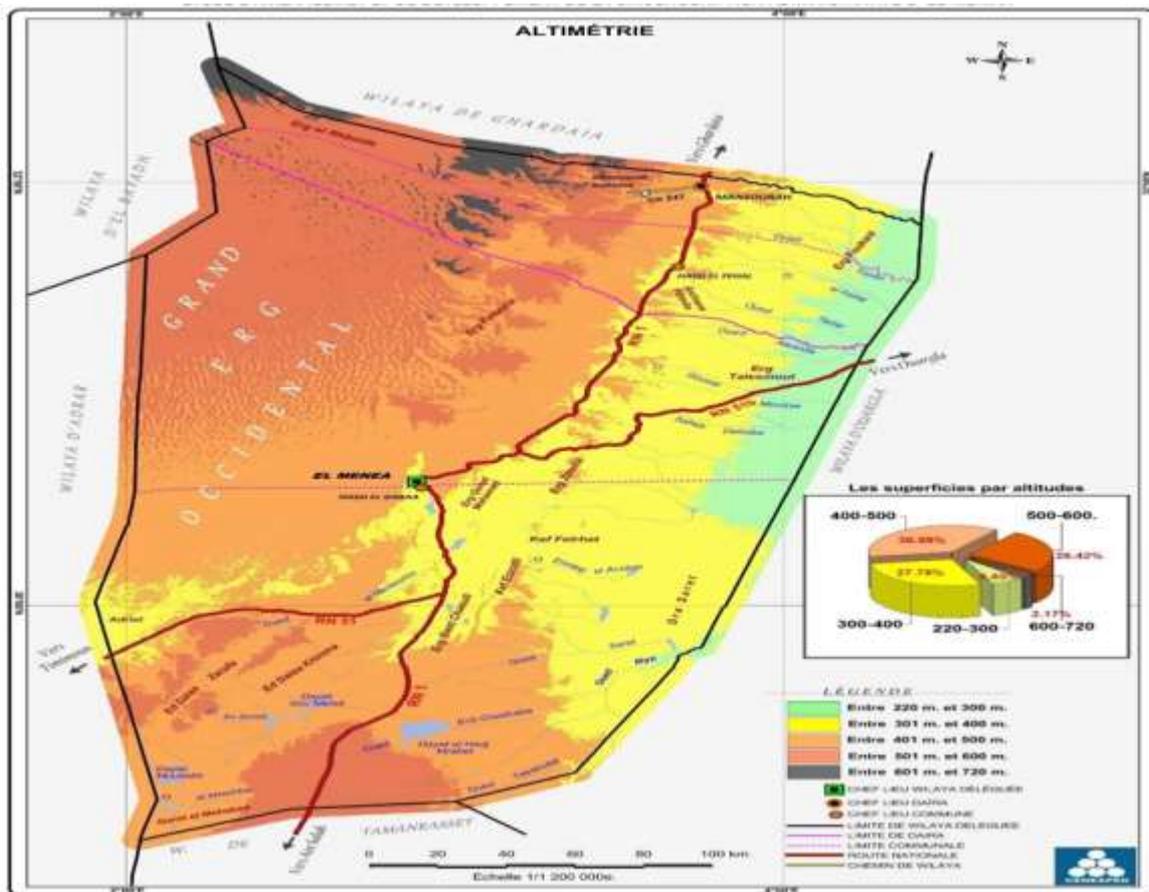


Figure 4 Les grandes unités géomorphologiques

L'Oasis d'El Meniaa est-elle par contre située dans l'Oued Seggueur, cette Oasis regroupe aujourd'hui, deux localités Hassi Gara et El Meniaa.



Figure 5: Oasis d'El Meniaa

Cette image satellitaire montre l'oasis avec sa zone humide en aval, le développement agricole sur le plateau à l'Est et la barrière de l'Erg Occidental à l'Ouest limitant les possibilités de mise en valeur des terres.

II-3 LES CONDITIONS CLIMATIQUES:

Le climat joue un rôle fondamental dans la distribution des êtres vivants. Parmi les plus importants paramètres, les températures, les précipitations, la vitesse des vents sont retenus et développés dans ce qui suit :

II-3-1- La température

La température est un élément fondamental du climat. Elle est liée à la radiation solaire. Sa variation influe sur la transformation des eaux en vapeur, que ce soit à la surface ou dans le sous-sol. De ce fait, elle influe sur le degré d'évapotranspiration et par conséquent elle agit sur le taux de salinité des eaux. Toutefois, la température a un rôle important dans la variation des composantes du bilan hydrologique.

Les observations faites sur la période 2008-2017 sont représentées sur le Tableau suivant :

Tableau 1 : température moyenne mensuelle (2008-2017)

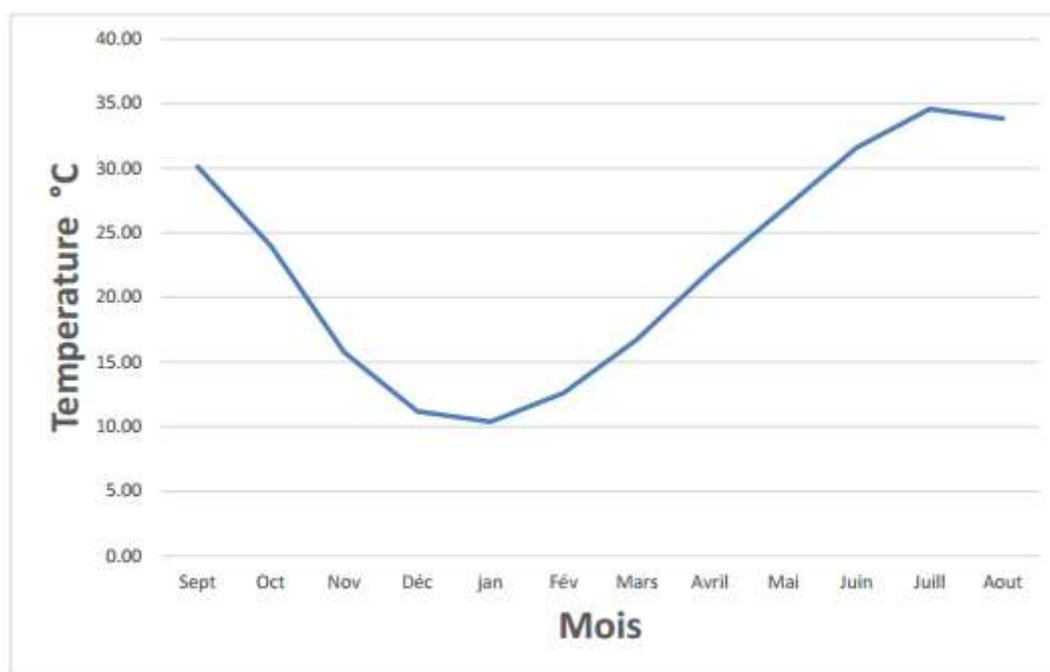
	Sept	Oct	Nov	Decm	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Anne
T°C	30,18	23,46	16,16	12,6	9,88	11,06	16,56	21,06	27,44	32,92	34,36	33,26	22,41
m°C	22,33	16,22	8,14	4,11	2,72	4,7	8,43	13,75	18,65	23,37	26,21	25,82	
M°C	37,91	31,73	23,38	18,27	18,04	20,5	25,05	30,42	34,99	39,8	42,97	41,86	
M+m/2°C	30,12	23,98	15,76	11,19	10,38	12,6	16,74	22,08	26,82	31,58	34,59	33,84	22,47

Station météorologique d'El-Goléa (2008-2017)

T: température moyenne mensuelle.

m : température minimale de chaque mois.

M : température maximale de chaque mois.

**Figure 6:** Température moyenne mensuelle (2008-2017)

Les variations de température moyenne mensuelle sont représentées sur la (fig.08) qui montre une grande amplitude thermique entre l'hiver et l'été ; les mois de juin, juillet et août sont les mois les plus chauds en général avec des moyennes mensuelles de l'ordre

de 32 à 34 °C et le mois le plus froid est janvier avec une moyenne de température de 10.38°C.

II-3-2- La pluviométrie

L'analyse de la pluviométrie de la zone d'étude constitue probablement le moyen le plus important et le plus efficace pour étudier l'impact du changement climatique sur le fonctionnement de la nappe phréatique (rechargée par les eaux de pluies) d'où l'importance de s'appesantir sur la pluviométrie.

II-3-2-1- Variations annuelles des précipitations

L'analyse de la courbe des variations annuelles des précipitations, sur une période de 5 ans (2008-2017), montre que l'année 2009 est la plus arrosée avec 79 mm et l'année 2010 et 2011 sont les plus sèches avec 4.2 mm Notons que les précipitations moyennes annuelles s'évaluent à 43.38 mm . Ses valeurs moyenne sont très proche à celle donnée par la carte des isohyètes où la région d'El-Goléa situe sur la courbe 45 mm.

Tableau 2 : Précipitation annuelle (2008-2017)

Année	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Moyen
P (mm)	42,9	79,1	4,2	4,2	43,2	62,5	34,1	7	43,2	63,2	38,36

Station météorologique d'El-Goléa (2008-2017)

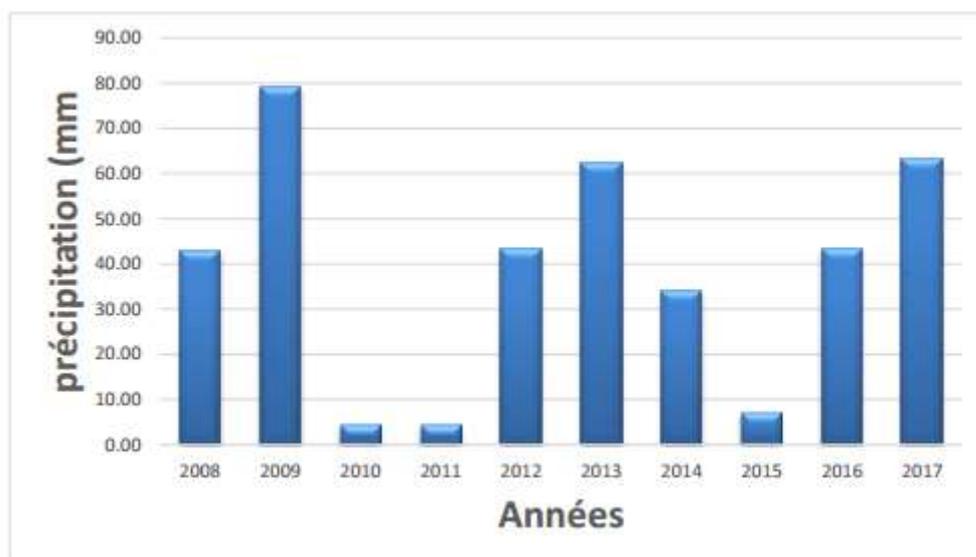


Figure 7: Précipitations annuelles (2008-2017)

II-3-2-2- Variations moyennes mensuelles des précipitations :

La courbe des variations des moyennes mensuelles des précipitations, montre que Les précipitations sont très faibles et irrégulières. Elles varient entre 0 mm et 10.77 mm, le mois de janvier est le plus pluvieux, avec 10.77 mm, alors que les mois de juin, juillet et aout sont les plus sec, où la précipitation est nulle.

Les pluies sont en générale torrentielles et durent peu de temps sauf dans des cas exceptionnels.

Tableau 3 Précipitation moyenne mensuelle (2008-2017)

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Aout	Année
P (mm)	2,58	4,56	1,58	8,94	10,77	0,83	6,3	0,38	3,22	0,51	0	0,2	39,87

Station météorologique d'El-Goléa (2008-2017)

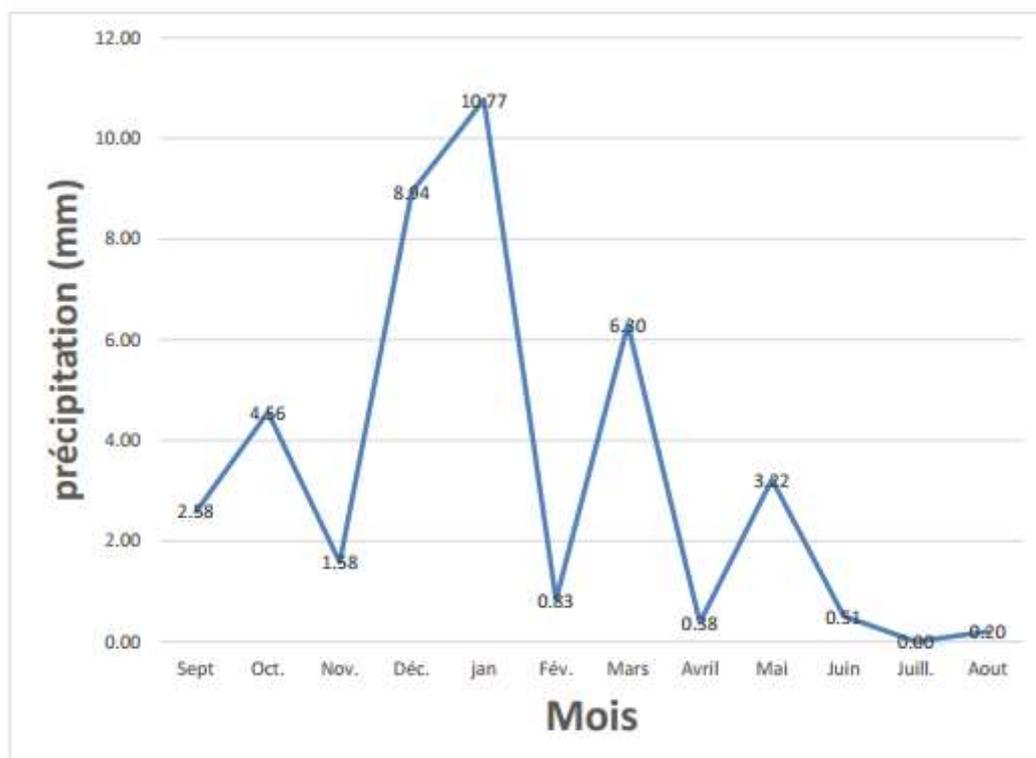


Figure 8: Précipitation moyenne mensuelle (2008-2017)

II-3-2-3- l'humidité :

L'humidité est définie comme étant le rapport entre la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air humide et la pression de saturation à la même température. Elle est exprimée en pourcentage.

Tableau 4 L'humidité relative moyenne mensuelle de l'air (2008-2017)

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Aout
Humidité moyenne %	34,73	39,86	53,24	60,57	56,58	46,85	37,44	35,45	31,05	27,22	24,27	26,076

Station météorologique d'El-Goléa (2008-2017)

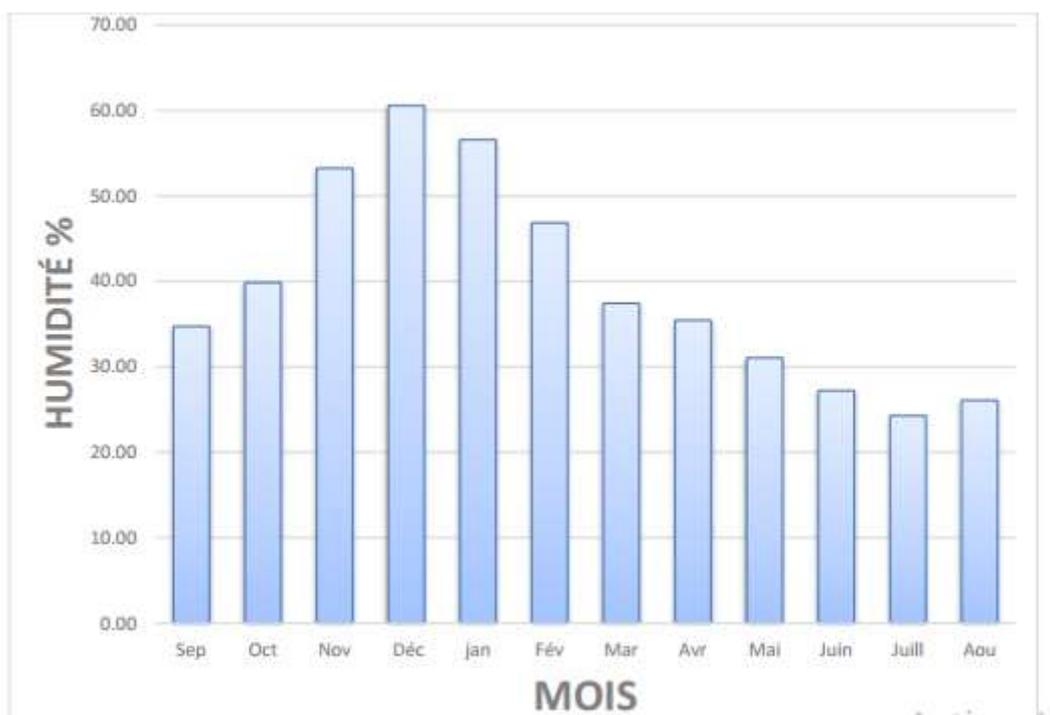


Figure 9: L'humidité relative moyenne mensuelle de l'air (2008-2017)

L'humidité relative moyenne exceptée les mois de novembre, décembre et janvier est inférieure à 50% pendant toute l'année.

- le maximum est au mois de novembre, décembre et janvier avec des moyennes allant de 53% à 60% .

- le minimum est au mois de juin, juillet et août avec 27.22%, 24.27 % et 26,08% respectivement.

II-3-3- Les vents :

Le vent est le facteur principal de la topographie désertique. Pendant certaines périodes de l'année, en général en mars et avril, on assiste au Sahara à des véritables tempêtes de sable. Des masses de sable se déplacent avec violence atteignant plusieurs centaines de mètres de haut.

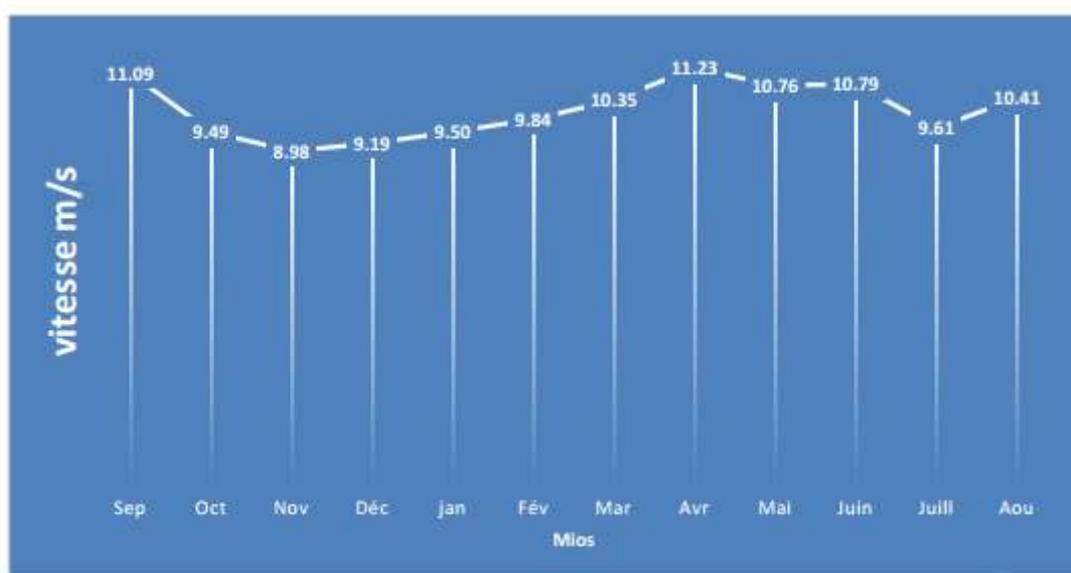
L'obscurité règne et toute activité cesse. Ces phénomènes peuvent durer d'un à trois jours et plus, avec une accalmie durant la nuit.

Tableau 5 : La vitesse moyenne mensuelle du vent (2008-2017)

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Aout	Année
Vitesse m/s	11,09	9,49	8,98	9,19	9,5	9,84	10,35	11,23	10,76	10,79	9,61	10,41	10,1447

Station météorologique d'El-Goléa (2008-2017)

L'analyse du Tableau n°6 montre que la vitesse moyenne des vents enregistrée à El-Goléa est de 10.1 m/s annuellement avec un maximum de 11.2 m/s pour le mois d'avril.

**Figure 10:** La vitesse moyenne mensuelle du vent (2008-2017)

II-3-4- L'insolation :

L'insolation est la période durant laquelle le soleil brille le sol, l'augmentation de la radiation solaire provoque l'augmentation de l'évapotranspiration où une partie des radiations solaire absorbées par le sol et l'autre réfléchir, ce dernier dépend de la nature de sol et le type de la région environnante. (A. Abdelmotaleb1998)

Tableau 6: moyenne mensuelle de l'insolation (2008-2017)

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avri	Mai	Juin	Juill	Aout	Total
heure/ mois	261, 54	268, 97	260, 04	248, 53	260, 16	249, 25	266, 13	276, 19	313, 03	304, 52	334, 75	337, 21	3380, 32

Station météorologique d'El-Goléa (2008-2017)

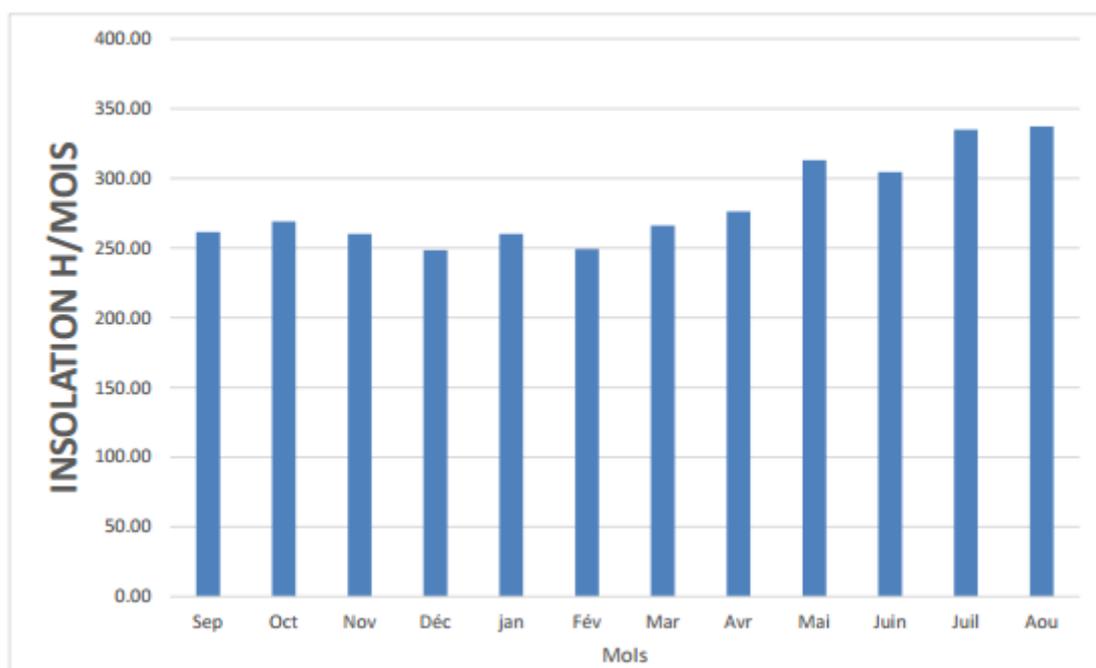


Figure 11: Moyenne mensuelle de l'insolation (2008-2017)

II-3-5- Diagramme ombrothermique :

Le diagramme ombrothermique établi à partir des valeurs de la température moyenne ($M+m/2^{\circ}\text{C}$) et de la précipitation moyenne mensuelle (mm), permet de bien distinguer une saison sèche indiquant clairement un déficit de précipitation et une saison de pluie présentant un excédent de précipitation.

Un mois sec se définit, selon (Bagnouls et Gaussen, 1953, 1957) comme celui ayant un total pluviométrique (moyenne en millimètres) égal ou inférieur au double de la température (moyenne en $^{\circ}\text{C}$) ($P \leq 2T^{\circ}$).

Tableau 7: moyenne des précipitations et des températures (2008-2017)

mois	Sept	Oct	Nov	Decm	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout
P(mm)	2,58	4,56	1,58	8,94	10,77	0,83	6,3	0,38	3,22	0,51	0	0,2
M($^{\circ}\text{C}$)	22,33	16,22	8,14	4,11	2,72	4,7	8,43	13,75	18,65	23,37	26,21	25,82
M $^{\circ}\text{C}$	37,91	31,73	23,38	18,27	18,04	20,5	25,05	30,42	34,99	39,8	42,97	41,86
T($^{\circ}\text{C}$)	30,12	23,98	15,76	11,19	10,38	12,6	16,74	22,08	26,82	31,58	34,59	33,84

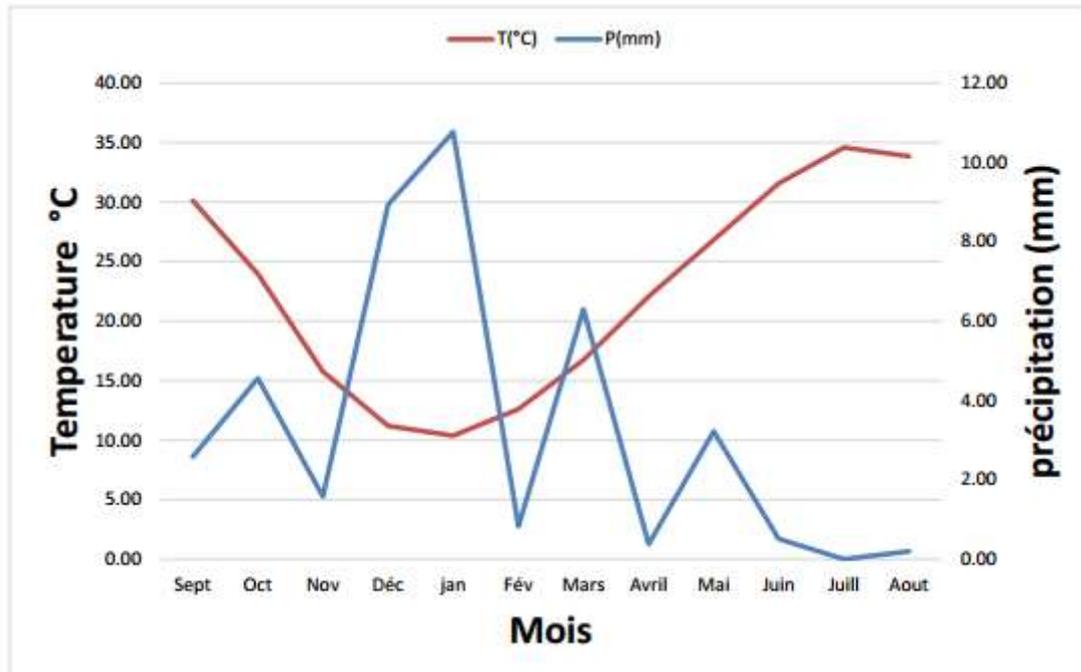


Figure 12: Diagramme ombrothermique établi avec la moyenne des précipitations et des températures de la station d'El-Goléa (2008-2017)

D'après ce diagramme, on déduit que la région d'El-Goléa est caractérisée par une saison sèche qui s'étale sur plusieurs mois consécutifs.

II-4 Etude démographique et socio-économique :

II-4-1- Evolution de la population :

L'agglomération d'El-Menia a connu selon les 04 recensements (1977, 1987, 1998, 2008 et 2018), une croissance démographique très importante. Selon les RGPH (1977-2018) La population est passée de 19231 habitants en 1977 à 28848 habitants en 1998 et elle se chiffre à 48228 habitants en 2018.

Tableau 8: Evolution de la population

	Nombre de population	croissance	Taux d'accroissement annuel moyen
1977	19231	/	/
1987	21284	2053	1,01
1998	28848	7564	2,8
2008	39662	10814	3,23
2018	48228	8566	1.80

Source : APC

Selon le Tableau et le graphe la population de l'agglomération de El-Menia augmente avec les années ceci est due à des facteurs démographiques, politiques et économiques.

II-4-2- L'estimation de la population de 2022

On peut estimer le nombre de la population pour différents horizons, en se référant à la loi des accroissements géométriques donnée par la relation suivante :

$$P_n = P_0 (1 + t)^n$$

Avec

P_n : Population future (2022)

P_0 : population de référence (2018)

t: Taux d'accroissement

n : écart d'années entre les deux horizons

L'estimation de la population de 2022 est représentée dans le Tableau suivant :

Horizon	2018	2022
N de pop	48228	54684

II-4-3- L'accroissement naturel :

C'est la différence entre le nombre de naissances et le nombre de décès, et la différence entre eux nous donne ce qu'on appelle le taux d'accroissement naturel. Une différence positive indique une croissance et une différence négative indique une contraction.

Tableau 9 : L'accroissement naturel

Année	Naissance	Décès	Taux CN	Pourcentage CN
2012	1462	218	1244	26,24
2013	1412	249	1163	24,53
2016	1680	256	1424	30,03
2017	1700	261	1439	30,35
2018	1671	234	1437	30,31

Nous notons que le taux d'accroissement naturel a diminué en 2012 de 24,26% à 20,53% en 2013, puis il est devenu presque constant à la valeur de 30% au cours des années (2016, 2017 ,2018) et cela explique les changements survenus à la fois dans le nombre de décès et le nombre de naissances au cours de ces années.

II-4-4- La structure de la population PAR ÂGE ET PAR SEXE

L'âge et le sexe représentent deux variables démographiques fondamentales dans l'analyse des caractéristiques d'une population. La structure par âge et sexe d'une population, à un moment donné, est la résultante des choix temporels des individus en matière de procréation et de l'intensité des flux migratoires. La prise en compte de ces deux caractéristiques démographiques dans la planification du développement économique et social constitue une démarche rationnelle conditionnant l'impact réel des projets de développement sur la population cible.

Le Tableau suivant montre la structure de la population selon l'âge et le sexe dans El-Menia :

Tableau 10 La structure de la population par âge et par sexe d'année 2018

.	masculin	féminin	total
0-4 ans	2839	2676	5515
5-9ans	2499	2467	4896
10-14ans	2750	2605	5355
15-19ans	2699	2626	5325
20-24ans	2560	2543	5103
25-29ans	2108	2522	4333
30-34ans	1834	1734	3558
35-39ans	1593	1496	3035
40-44ans	1389	1355	2744
45-49ans	1171	1086	2257
50-54ans	826	781	1610
55-59ans	563	554	1117
60-64ans	548	430	978
65-69ans	453	432	885
70-74ans	345	288	633
75-79ans	196	195	391
80-84ans	122	96	218
plus de 85	102	116	218
total	24565	23663	48228

Source : ONS

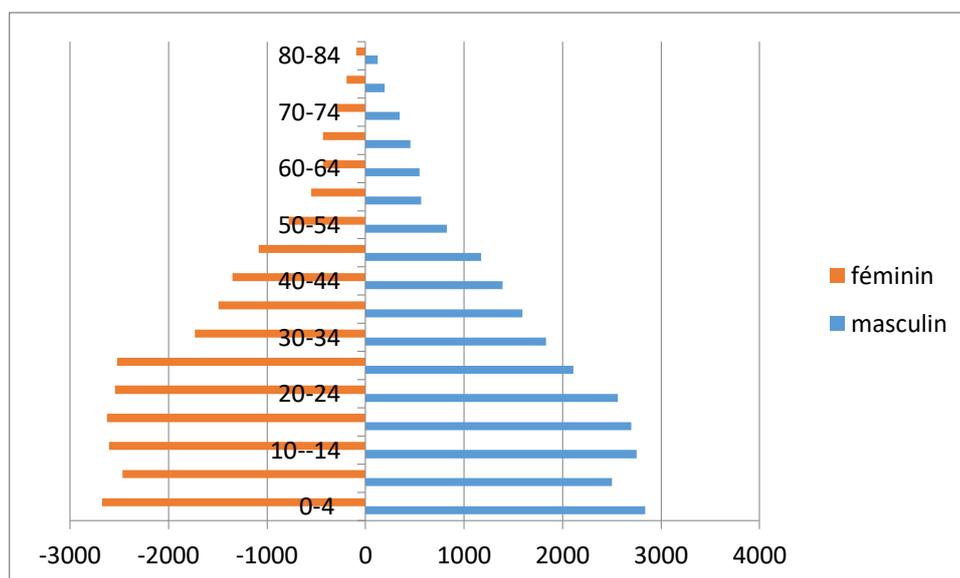


Figure 13: la structure de la population par âge et par sexe

Il est à noter que la tranche d'âge des moins de 20 ans représente près de la moitié du groupe (43,7%) et que ce segment est constitué de personnes de moins de 5 ans (11,4%) et doit être doté de structures d'accueil particulières, notamment en ce qui concerne l'éducation et la tranche d'âge 5-19 ans (32,3%) censés être pris en charge par le secteur de l'éducation ou de la formation professionnelle. Les 20-60 ans constituent la population en âge de travailler (43,6%) de la population totale, mais en pratique ce soutien est assuré par la population active et non par les personnes en âge de travailler car l'emploi féminin est encore faible. Cela dit, le chômage doit encore être réduit pour les travailleurs de plus de 60 ans qui sont généralement à la retraite.

II-4-5- Répartition économique de la population d'El-Menia :

Tableau 11 : Répartition économique de la population d'El-Menia 2019

N de pop	N de pop active	taux d'activité économique %	population occupée	La population sans emploi	Taux de chômage %	taux de dépendance
48228	30060	62,32	20963	9097	30,26	3

Source : DPSB, wilya de ghardaia

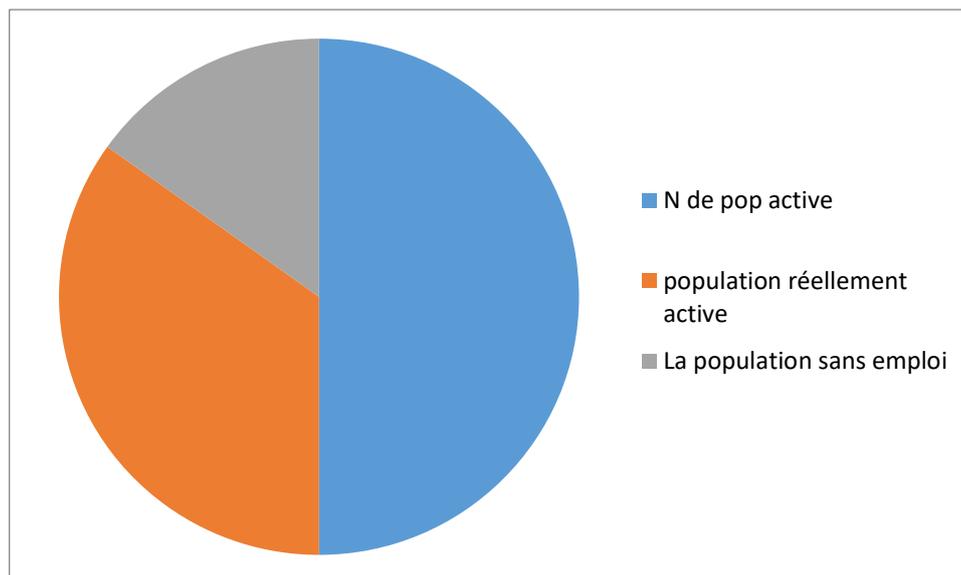


Figure 14: Répartition économique de la population d'El-Menia 2019

La population active en 2019 était estimée à 30 060 personnes sur la population totale, portant le taux d'activité économique à 62,32%, le dernier constatant 20 963 personnes représentant la population réellement active à 69,73% de la population active. Ce qui fait tandis que le taux de chômage était de 30,26%, et le taux de dépendance est de 3, ce qui signifie que 3 personnes vivent du travail d'une personne.

Conclusion

L'étude naturelle et démographique, est la première étape de l'analyse urbaine, cette étude nous a permis de conclure que :

La présentation de la ville de meniaa à offert une connaissance sur son état dans les différents côtés qui doivent être analysés dans un milieu urbain.

Naturellement, elle occupe par sa position géographique atlas saharienne elle est distinguée par son climat à caractère aride, par élévation de température et faiblesse de précipitations.

Chapitre III

Matériels et Méthodes

Introduction

Le suivi du changement de l'occupation des sols est effectué de plus en plus souvent à partir de données de télédétection, dont les images satellitaires permettent de réaliser, à l'aide de données d'origine diverses (l'étude socioéconomique, les facteurs...) des analyses multi-temporelles des changements observés, à partir desquelles des prédictions peuvent être construits.

Dans le présent travail, on a procédé à une étude diachronique des images satellitaires acquises en (2000, en 2010 et en 2021, pour analyser la dynamique d'occupation du sol dans la zone d'étude, notamment les changements de l'occupation des sols et la dynamique urbaine de la ville d'El Menia.

Dans ce cadre, la démarche utilisée se base sur les points suivants :

- La réalisation des prétraitements et traitements sur les images satellitaires.
- L'analyse des changements d'occupation du sol dans la période 2000 – 2010 dont le but est de créer un modèle prédictif, en utilisant les fonctions de modélisation sous le logiciel IDRISI.

III-1- Justification des choix

La série d'images satellitaire LANDSAT qu'on a utilisée sont issues de LANDSAT 5 TM pour la date 2000, LANDSAT 7 ETM pour la date 2010 et LANDSAT 8 pour la date 2021.

III-1-1 Justification du choix de satellite (LANDSAT)

L'imagerie satellitaire LANDSAT a été maintes fois sollicitée dans une grande variété d'applications, depuis une quarantaine d'années, les capteurs LANDSAT ont joué un rôle pivot dans les analyses spatio-temporelles.

La gratuité des données LANDSAT face au coût des images SPOT est un facteur déterminant quant au choix du type d'image satellitaire. De plus, la fréquence des données disponibles favorisa l'acquisition d'une dizaine de dates d'excellente qualité, augmentant de fait les possibilités de traitements et d'analyses.

III-1-2- Justification des dates et saisons

La période d'acquisition des images choisie correspond au mois d'Avril de chaque année (2000, 2010, 2021), c'est-à-dire en pleine saison printanière. Le choix se justifie par l'influence des conditions météorologiques (faibles précipitations, augmentation de la température), notamment par la minimisation du couvert nuageux.

III-1-3- Justification du choix du model

Parfait antonyme des modèles déterministes, les modèles stochastiques sont probabilistes. Les valeurs dans un modèle stochastique sont calculées de façon aléatoire. Si la chaîne est actuellement à l'état « t_i », son passage à l'état « t_j » se fera avec une probabilité notée « p_{ij} » (ou probabilité de transition).

Le model qu'on a choisi c'est un model de type stochastique : CA-MARKOV.

Les chaînes de Markov font partie des méthodes les plus communément employées afin de prédire des changements entre plusieurs états. Elles calculent les valeurs d'une variable à l'instant t par une fonction probabiliste de sa valeur à l'instant antérieur $t-1$. Donc les chaînes markoviennes sera le model convenable pour notre étude. Afin de comprendre l'évolution des occupations du sol notamment celle du foret (objet d'étude).

III-2- Classification des images satellitaires :

III-2-1- Prétraitements et traitement

Cette section décrit les principales prétraitements et traitements d'images effectuées, dont le but est d'augmenter la lisibilité des données et de faciliter leur interprétation pour une meilleure extraction d'informations.

Ces opérations préliminaires s'appliquent au travers des améliorations radiométriques, des corrections géométriques et atmosphériques.

III-2-1-1- Les corrections géométriques

Elle consiste à rectifier les images satellites de manière à les rendre superposables à d'autres images ou à des documents cartographiques de référence.

À l'aide du module de correction géométrique « Resample » dans l'ogiciel IDRISI, Nous avons référencier les images à utiliser dans notre étude à la base des points de repères identifiés sur une image satellitaire géoréférenciée dans le système de projection "WGS 84 / UTM zone 31S" qui correspond au **EPSG:32731** .

III-2-1-2- Corrections radiométriques et atmosphériques

Il y a plusieurs méthodes sont utilisées pour les corrections atmosphériques. A l'aide de logiciel IDRISI, nous avons fait recours au module « Atmosc » dans le logiciel IDRISI. Grace au modèle DOS (*Dark Object Substraction*), et aux informations qui accompagne les images satellitaires lors de leurs téléchargements, on a pu corriger les perturbations atmosphériques.

III-2-2- Le traitement d'images

Le traitement d'images en télédétection est un ensemble de techniques et méthodes utilisées pour l'extraction de l'information à partir des images issues de la télédétection.

La diversité des capteurs existants conduit à la coexistence de nombreux types d'images complémentaires mais différentes en terme de : résolutions spatiale et spectrale. Donc il est souvent nécessaire d'utiliser conjointement plusieurs types de bandes pour créer des images ayant de bonnes résolutions.

III-2-2-1- Le traitement bande par bande

Dans cette étape on a essayé, séparément, d'appliquer quelques changements d'affichage pour les images, afin d'explicitier l'unité d'étude (urbain). La figure 13 représente un exemple de ce traitement :

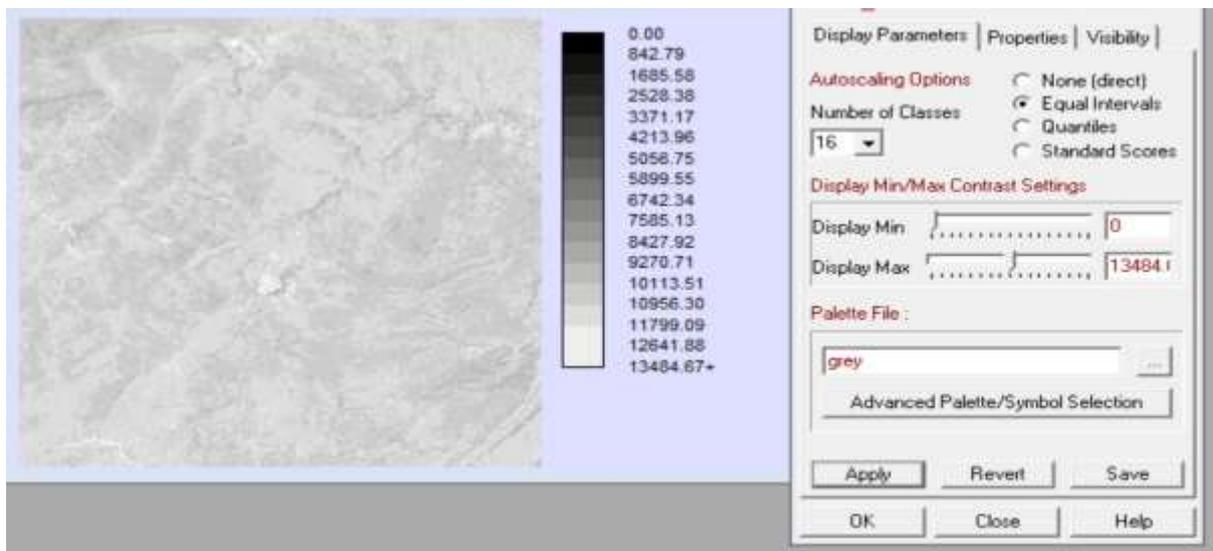


Figure 15 : Traitement de l'image tm4, LANDSAT 5

III-2-2-2- Les compositions colorées

La réalisation d'une composition colorée consiste à affecter à chacune des trois couleurs primaires (le rouge, le vert et le bleu) trois bandes spectrales d'un capteur satellite. Par synthèse additive, toutes les couleurs peuvent être reconstituées.

On utilisant l'outil « composite » dans le logiciel Idrisi, on a effectué quelques compositions :

- Des compositions **vraies couleurs**, pour rendre les images réalistes. Par exemple la composition CC123 (Bande Bleue => Canal 1 ; Bande Verte => Canal 2 ; Bande Rouge => Canal 3).

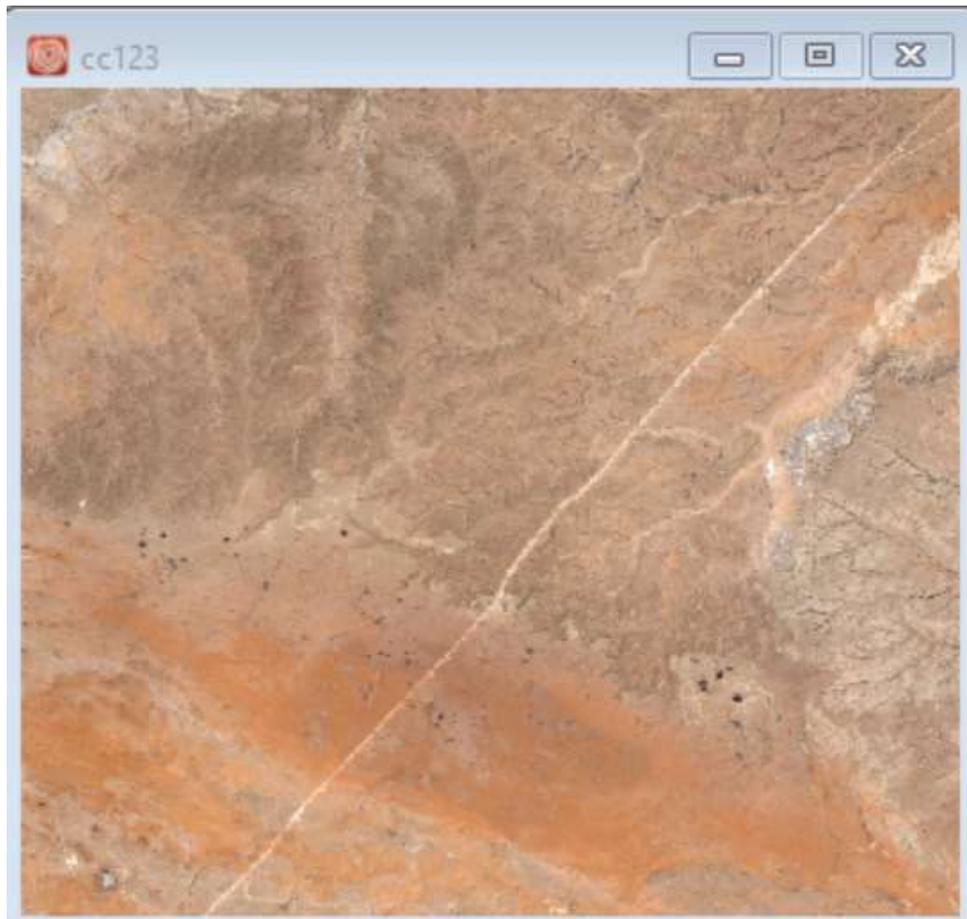


Figure 16 : Exemple d'une composition colorée vraies couleurs 123.

- Des compositions **fausses couleurs**, qui ne représente pas les couleurs réelles, mais qui ont pour but de mettre en avant certains objets dans une image. Par exemple la composition CC234 (Bande Bleue => Canal 2 ; Bande Verte => Canal 3 ; Bande Rouge => Canal 4).

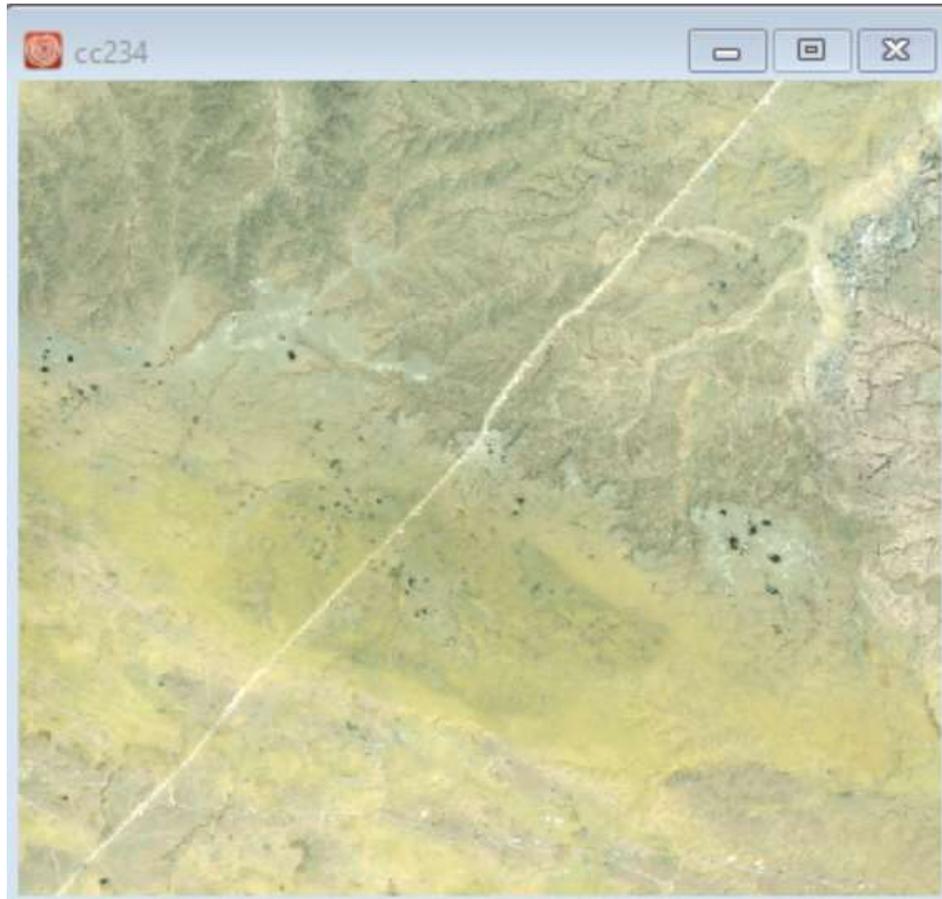


Figure 17: Exemple d'une composition colorée fausses couleurs 234

Pour une meilleure discrimination des occupations du sol et afin d'obtenir des images multi-spectrales possédants une haute résolution spatiale avec une conservation du contenu spectral,

III-2-2-3- La fusion : Multi-spectral / Panchromatique

Dont le but est d'avoir une meilleure discrimination des occupations du sol et d'obtenir des images multi-spectrales possédants une haute résolution spatiale avec une conservation du contenu spectral, nous avons appliqué la fusion entre les bandes multi-spectral, qui fournit un éventail varie d'informations avec une donnée panchromatique, qui présente plus finement les objets au sol, afin de créer une donnée couleur haute résolution.

Il faut d'abord changer la résolution spatiale des images multi-spectrales en 15m, puis on utilise la calculatrice du logiciel pour appliquer la fusion de chaque image avec la bande panchromatique.

III-2-2-4- Analyse en composantes principales (ACP)

Elle consiste à définir, dans l'espace multi-spectral, de nouveaux canaux résumant l'information contenue dans l'image. Ce procédé vise à donc maximiser (statistiquement) la quantité d'information (ou variance) des données originales dans un nombre restreint de composantes.

L'ACP permet de transformer des données des six bandes en trois principales composantes représentant plus de 90% de l'information.

L'outil qu'on a utilisé c'est « PCA » de la liste d'outil « Image Processing », tous les 7 images sont utilisées sauf ceux de la bande 6.

III-2-2-5- La colorimétrie (RVB → IHS)

Changement d'espace des données multi-spectrales : de l'espace RVB (Rouge-Vert-Bleu) vers l'espace IHS (Intensité Teinte Saturation). Dont le but est d'améliorer la qualité du produit fusionné.

On a appliqué l'outil « COLSPACE HLS to RGB conversion » :

Tm1 → teinte ;

Tm2 → intensité ;

Tm3 → saturation.

III-2-2-6- Application des différents indices

En télédétection, les indices font parties des méthodes de traitement que l'on appelle les transformations multi-spectrales. Ils consistent à convertir les luminances mesurées au niveau du capteur satellitaire en grandeurs ayant une signification.

Ils permettent de décrire l'état d'un phénomène et permet d'identifier et suivre la dynamique de ce phénomène. Un indice de végétation par exemple, peut rendre compte du stade de croissance végétale à un moment donné.

Dans notre travail on a essayé appliquer quelques indices :

- Indices de végétation tels que NDVI, SAVI.
- L'indice de stress hydrique NDWI.
- L'indice de brillance IB.
- L'indice de brillance des sols ibsetc.

Par exemple la figure 16 illustre l'indice « ibs », on utilisant la calculatrice du logiciel pour appliquer la formule de l'indice.

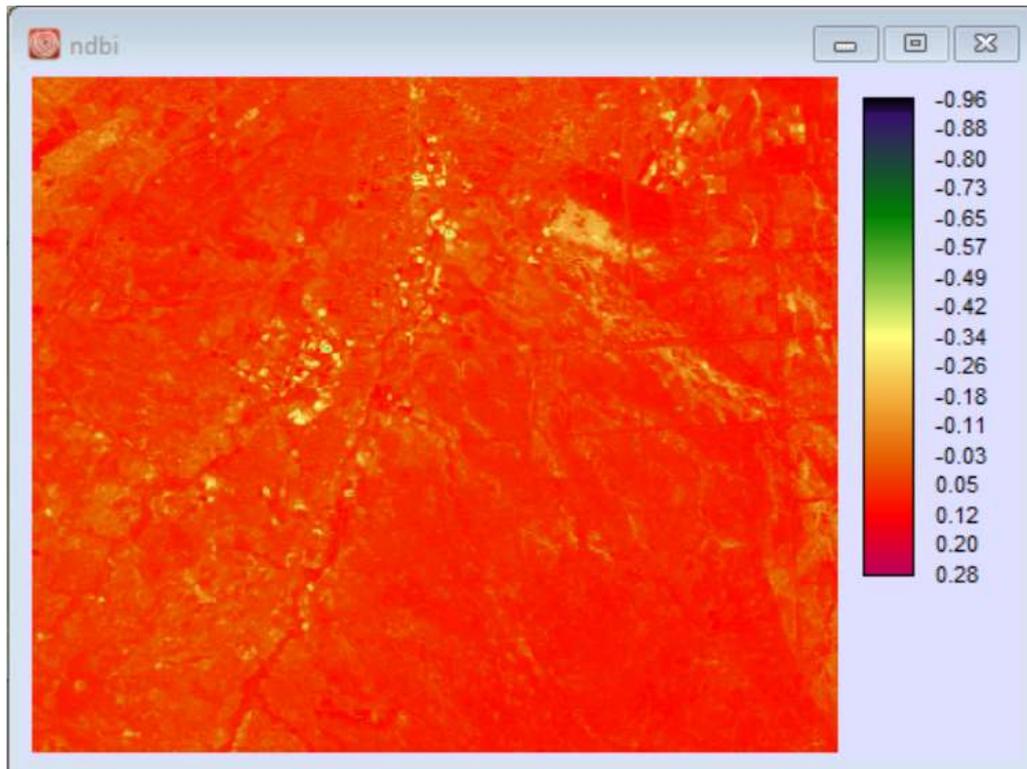


Figure 18: Application de l'indice IBS.

Avant de réaliser notre classification, On a utilisé les images résultantes des différentes fusions appliqués pour élaborer plusieurs compositions colorées afin sélectionner celles qui offrent plus de contrastes et permettent de tirer le maximum d'information. Cela c'est réalisé par l'application de l'outil « composite » dans Idrisi. Parmi les compositions accomplies :

- La composition « NDWI_NDVI_IB » présentée dans la figure suivante :

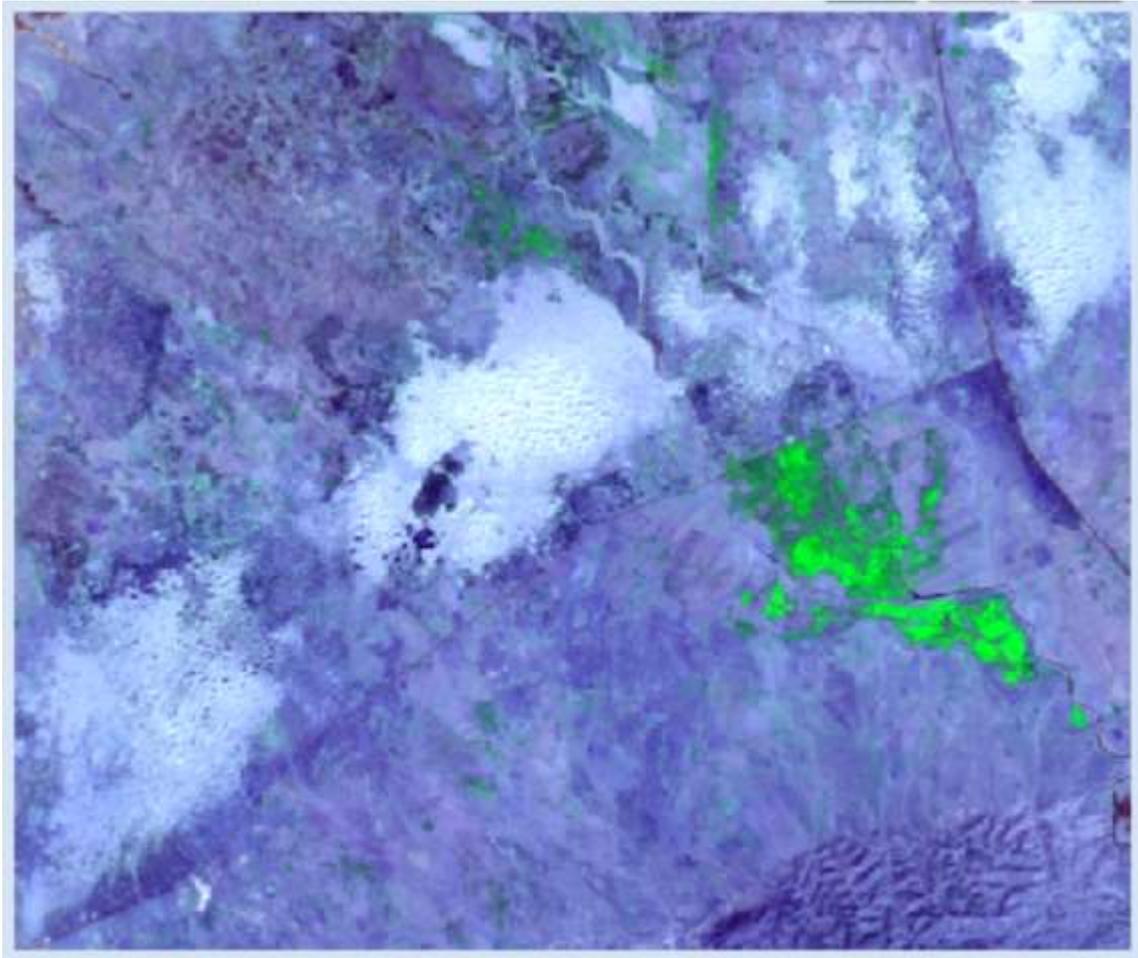


Figure 19 : La composition des 3 indices NDWI, NDVI et IB.

- Les deux compositions : « Saturation_acp1_tm4 » et « Intesite_saturation_tm3 »

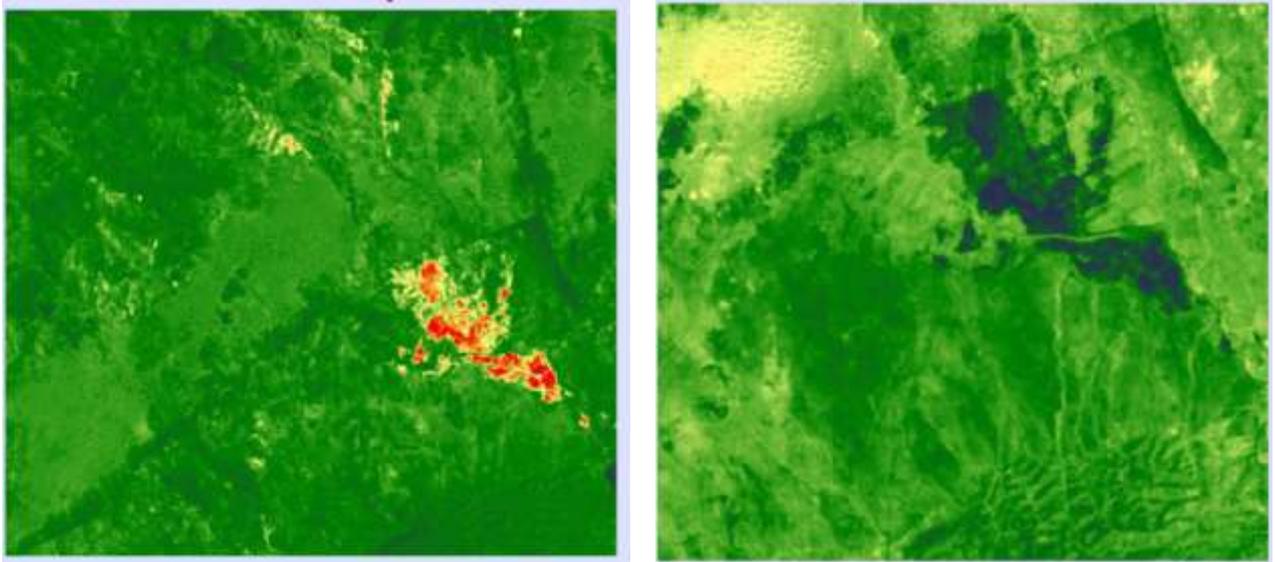


Figure 20: La composition des 3 indices NDWI, NDVI et IB

III-2-7- Classification

Avant de s'intéresser aux facteurs clés qui influencent la dynamique urbaine, nous complétons l'analyse par une étude de la distribution spatiale des différentes occupations du sol dans notre zone d'étude.

« Ce processus d'analyse vise à la création d'images thématiques, c'est-à-dire d'images dont le contenu ne présente plus une mesure mais une interprétation et une catégorisation de la nature des objets associés aux pixels. » (Bonn, Rochon, 1993).

La voie qu'on a choisie est la classification supervisée pour caractériser et classer les unités d'occupations dans la zone d'étude en différentes classes. Cette méthode est considérée comme l'une des plus intuitives afin de cartographier les changements d'occupation du sol.

Cette classification se base sur des méthodes probabilistes. Elle consiste en une affectation des pixels aux classes préalablement définies, basée sur la probabilité qu'à un pixel d'appartenir à une classe donnée. Chaque classe doit être représentée par un nombre de zones d'apprentissage qui doivent être les plus représentatifs possibles de la dynamique d'occupation du sol.

III-2-7-1- Echantillonnage

Ceci constitue une étape importante dans la mesure où les échantillons doivent être représentatifs des classes déterminées.

La construction des échantillons en vue de la classification s'est faite par identification visuelle et digitalisation de plusieurs petits groupes de pixels pour chaque classe. Le nombre de classes dans notre travail est de 7. (Urbain, palmier, hemada, agriculture, Eaux, Sable; sel).

Par l'utilisation de l'outil « Digitize » on a digitalisé les 7 classes d'occupation du sol dans notre zone d'étude. Lancez la fonction « MAKESIG » du menu « IMAGE PROCESSING », Entrez les noms de chacune des zones d'entraînement, puis choisir les images à utiliser dans la classification.

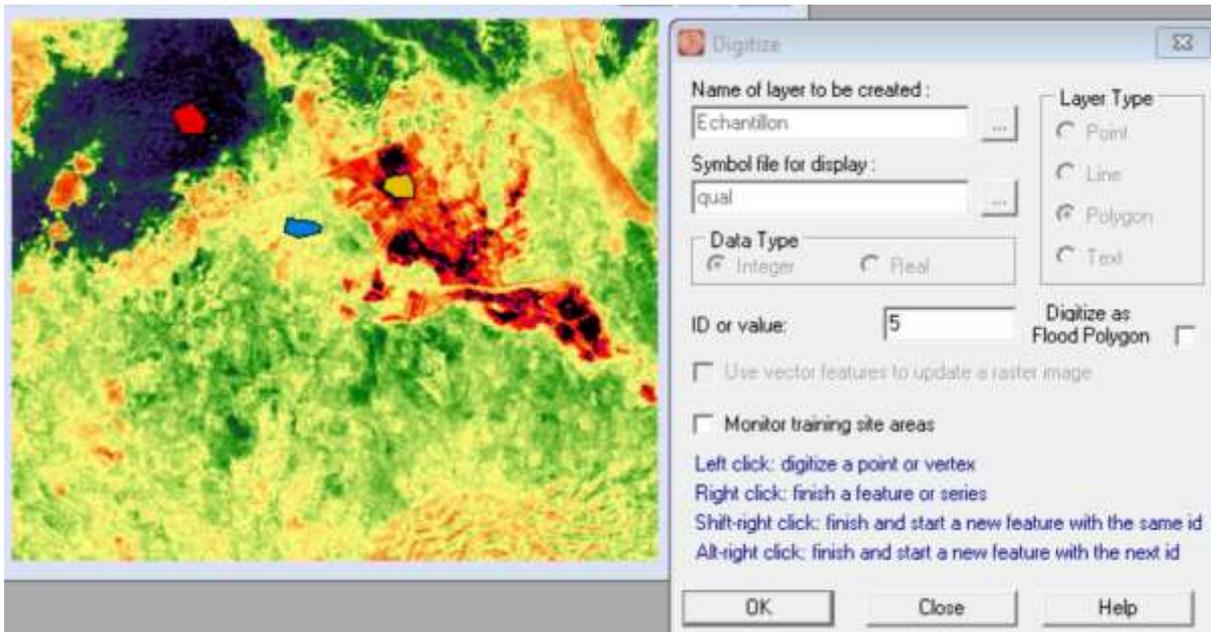


Figure 21 : Outil de digitalisation des zones d'entraînement « Digitize »

III-2-8- Applications des classificateurs

Le pixel sera assigné à la catégorie d'occupation du sol qui a la signature la plus similaire. Les classifications rigides représentent les différentes techniques statistiques qui évaluent cette similitude. Les classificateurs rigides que nous allons utiliser dans Idrisi sont : MAXLIKE, MINDIST, et PIPED.

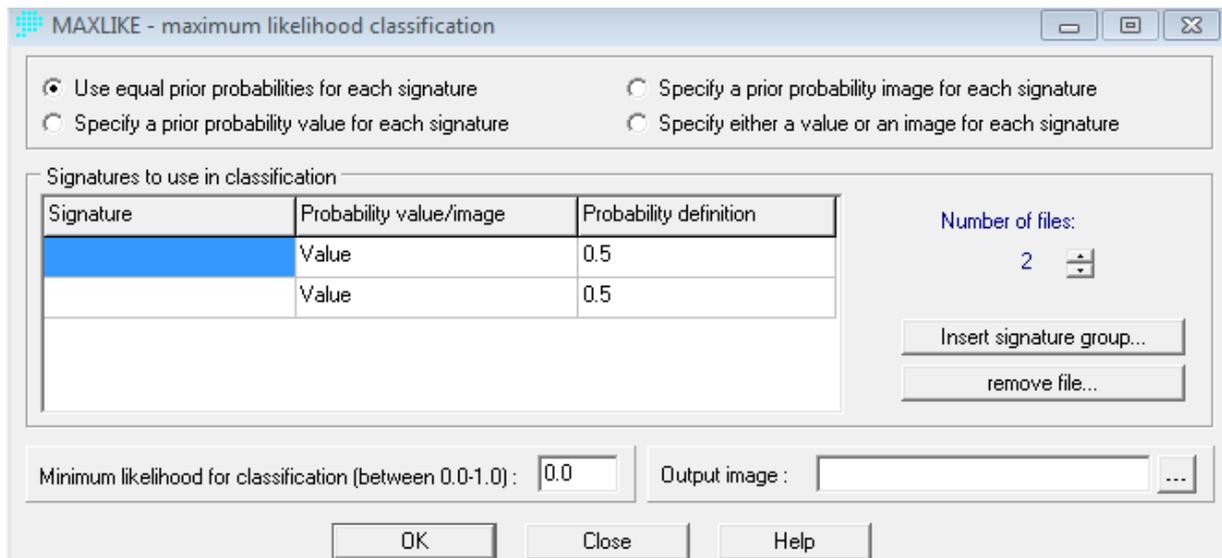


Figure 22 : le classificateur Maximum likelihood

Ce classificateur évalue la probabilité d'appartenance d'un pixel donné à chacune des catégories, il l'assigne à celle dont la probabilité d'appartenance est la plus élevée.

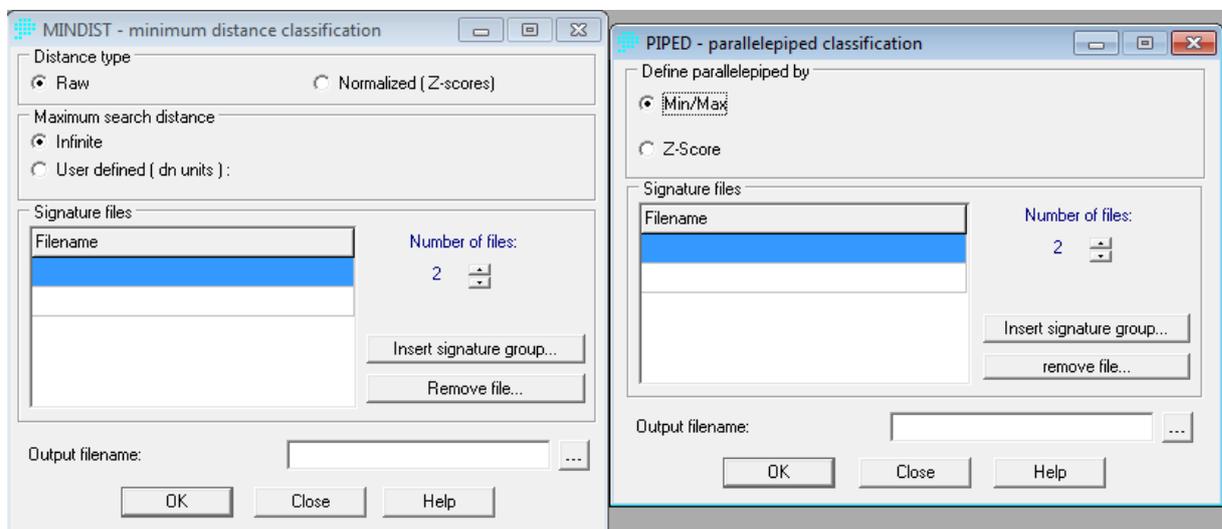


Figure 23 : les 2 classificateurs Mindist et Piped

MINDIST : Il assigne le pixel à la catégorie dont le centre est le plus proche de sa valeur multi spectrale.

PIPED : Ce classificateur constitue des boîtes définies par des unités d'écart type ou par les valeurs minimum et maximum de luminance dans chacune des zones d'entraînement. Le pixel à classifier est assigné à la catégorie de la boîte dans laquelle il est localisé.

III-2-9- Validation des cartes d'occupation :

L'outil précédent génère trois cartes d'occupation pour les trois dates : 1990, 2000, 2019. Pour la vérifications des résultats obtenue, nous avons procéder une matrice de

confusion à l'aide de l'outil « ERRMAT ». Cet outil crée une matrice d'erreur qui compile les différentes classes d'occupation du sol, et présente ainsi l'indice de Kappa, qui sert à l'estimation de la précision. Il varie entre 0 et 1 et tient en compte des erreurs en lignes et en colonnes. Il permet une évaluation globale mais aussi au niveau de chaque classe.

L'indice de kappa calculé pour chaque classification est de 0.926 pour l'année 2000, 0.922 pour l'année 2010 et 0.90 pour l'année 2021.

III-3- La modélisation des changements :

L'objectif est de décrire les étapes préalables à l'application du modèle de simulation d'évolution des changements d'occupation des sols *Land Change Modeler* (L.C.M) pour réaliser la carte d'occupation prospective. Dans un premier temps, les facteurs explicatifs des changements passés et futurs sont déterminés pour la ville d'El Meniaa, et d'élaborer le scénario prospectif d'évolution.

Ces étapes de travail ont été réalisées dans le cadre d'une approche participative avec des experts des secteurs de l'urbanisme de la Wilaya d'El Meniaa.

III-3-1- Identification des facteurs explicatifs :

L'objectif est de déterminer les facteurs qui expliquent les changements des structures urbaine et des modes d'évolution de la ville d'El Meniaa, observés précédemment, d'évaluer leur poids respectif dans les processus d'évolution et de les représenter spatialement.

Nous avons choisi pour la classe urbain trois facteurs à savoir : la lithologie, les pentes et le réseau routier (route secondaires et principales).

III-3-1-1- Facteur Lithologie

Le type de substrat est pris en compte à travers ses relations avec les zones favorables à l'urbanisation, stabilité du sol et le coût de construction, dont le rôle est prépondérant.

III-3-1-2- Facteur pentes

Les pentes de la zone d'El Meniaa sont générées en pourcentage à la base du modèle numérique du terrain Aster (GDEM) avec une résolution 30 m, ce facteur est déterminant pour l'urbanisation qui exige des pentes faibles pour une potentialité élevée et la pente élevée expose une contrainte à la construction en diminuant l'aptitude de l'étalement urbain.

III-3-1-3- Facteurs Voirie

La voirie intègre les routes nationales classifiés comme des routes principales et les chemins de Wilaya classifiés comme des routes secondaires, l'extension et l'étalement urbain est étroitement lié à la présence de la voirie d'où les zones proches à des réseaux routiers ont une aptitude élevée pour la construction. Les carte des distances par rapport aux réseaux routier (Cost_Principales et Cost_Secondaires) sont générées à l'aide de l'outil (COST) de IDRISI.

III-3-1-4- Centre urbain

L'étalement urbain est fortement lié à son noyau, les zones proches au centre-ville ont une forte aptitude pour la construction.

Une carte de distance par rapport au centre urbain est générée pour chaque type d'agglomération, Pour les villes importantes (Cost_Urbain) et (Cost_agglomeration) pour les villes moyennes.

III-3-2- Spatialisation et la validation des facteurs de changements

La spatialisation des facteurs de changements est nécessaire pour valider les facteurs identifiés, désigner les variables influant prioritairement sur les évolutions constatées.

Inventaire des facteurs des changements

L'ensemble des facteurs identifiés sont de nature très différente : ils peuvent être d'ordre qualitatif ou quantitatif, intervenir ponctuellement dans le temps ou agir sur plusieurs années ou décennies, et avoir une influence sur l'ensemble de la période d'étude ou sur une partie seulement de cette période. Les données nécessaires à l'élaboration des descripteurs de ces facteurs sont donc très variées.

III-3-3- Validation des facteurs

Afin de valider les facteurs de changements des modes d'occupation des sols et des structures paysagères identifiés, la méthode utilisée consiste à calculer une matrice de confusion avec le SIG, en croisant les données spatialisées du facteur explicatif avec les données d'occupation du sol et des structures paysagères.

III-3-4- Le choix du modèle de simulation de l'étalement urbain

Plusieurs modèles ont été développés pour simuler la croissance urbaine, certains d'entre eux prenant en compte la composante environnementale, soit directement dans les

paramètres environnementaux, soit en évaluant les effets de la croissance urbaine sur l'environnement, et en particulier sur la biodiversité.

Le choix du modèle que nous avons retenu a été guidé principalement par les critères suivants : le souhait d'utiliser un modèle dynamique et spatialement explicite, peu gourmand en données d'entrée (par exemple, un modèle tel que Urbanisme, dédié à la simulation urbaine, nécessite de nombreuses données économiques qui ne sont pas disponibles dans notre cas), et l'accessibilité du modèle. Parmi les modèles répondant à ces critères, nous avons retenu le modèle Land Change Modeler (LCM) développé par ClarkLabs de Clarks University au sein du modèle Idrisi© Terrset (Eastman, 2006)

Le modèle LCM a pour vocation générale d'analyser les changements passés d'occupation des sols, de réaliser des projections de changements dans le futur, et d'évaluer l'impact environnemental de ces projections sur les habitats et la biodiversité.

LCM est un modèle hybride qui repose sur l'utilisation couplée de plusieurs sous-modèles (Modèle de chaînes de Markov, un modèle de régression logistique, un réseau neuronal Perceptron multi-couche-n-, et un automate cellulaire). Il simule de façon dynamique et spatialement explicite les changements d'occupation des sols sur de larges territoires (échelles régionales à continentales). S'il n'est pas spécifiquement dédié à la simulation de l'expansion urbaine comme d'autres modèles existants SLEUTH (Clarke et Gaydos, 1998), CURBA (Landis et Zhang, 1998a, b), il présente un degré de généricité qui permet d'envisager son utilisation à cet effet (Aguejdad et Houet, 2008). En effet, contrairement aux modèles précédemment cités, il peut prendre en compte les changements des classes d'occupation des sols de façon dynamique dans les simulations, ainsi que de nouveaux facteurs de contraintes et de planification (Follador et al., 2008).

III-3-5- Fonctionnement du modèle LCM

Le modèle LCM est organisé autour de cinq tâches principales :

- 1- L'analyse des changements d'occupation des sols passés ;
- 2- La modélisation du potentiel de transition d'une classe d'occupation des sols à une autre ;
- 3- La production de projections futures d'occupation des sols ;
- 4- L'évaluation de ses impacts sur la biodiversité ;
- 5- L'évaluation des politiques de gestion visant à maintenir un environnement durable.

Les produits finaux attendus du modèle concernent toutes ces taches à l'exception de la deuxième, qui peut être considérée comme un produit intermédiaire.

Les modèles de changement d'occupation des sols sont généralement constitués de trois composants principaux (Eastman et al., 2005) :

- Sous-modèle de « demande de changement » ;
- Sous-modèle de « transition potentielle » ;
- Sous-modèle d'allocation du changement.

La modélisation de la demande de changements vise à établir la quantité de changement qui se produira sur une période de temps donnée (changements futurs attendus).

La modélisation de la transition potentielle concerne la détermination de la probabilité de changement d'un type d'occupation du sol à un autre (susceptibilité au changement), en fonction de facteurs tels que l'adéquation des terres pour la transition en question et la présence de forces motrices du changement. Enfin, les sous-modèles d'allocation du changement visent à déterminer quelles sont les surfaces qui vont changer, en fonction de la demande et des surfaces de changement potentiel (répartition des changements dans des classes).

Le fonctionnement du modèle LCM, qui repose sur ces trois composantes. Il utilise trois types de données d'entrée:

- Des cartes d'occupation des sols à deux dates différentes (une date actuelle 2021, une date antérieure, suffisamment éloignées dans le temps 2010) ;
- Des cartes correspondant aux facteurs influençant la localisation des changements des types d'occupation des sols ;
- Des cartes de contraintes et de planification. Les premières représentent des zones où un type de changement n'est pas possible. Par exemple, les zones inondables vis-à-vis de l'urbanisation. Les secondes montrent la localisation d'éléments structurants, tels que la planification de nouvelles routes, qui seront pris en compte à une date prédéfinie.

Les données d'entrée ont été structurées en cellules de 30 m 30 m, en se basant sur les classifications d'occupation des sols obtenues à partir des images Landsat.

A partir de ces données d'entrée, des informations nécessaires aux simulations sont préparées ou définies lors d'une étape intermédiaire :

Les quantités de changements futurs attendus ;

Des cartes de localisation des susceptibilités aux changements d'une classe d'occupation du sol vers une autre. Les quantités de changements futurs attendus sont

calculées automatiquement par LCM pour un horizon temporel donné à l'aide de chaînes de Markov. Toutefois, il est possible d'utiliser des données externes au modèle (dires d'experts, couplage avec un autre modèle).

Le modèle produit alors deux matrices dites de transition : une matrice des quantités de changements attendus (surfaces) pour une date donnée et une matrice de probabilité de transition de chaque classe d'occupation du sol vers une des autres classes. Ensuite, la carte de susceptibilité au changement d'une classe d'occupation du sol A vers une classe B est réalisée pour chacune des transitions identifiées à partir des cartes d'occupation des sols. Pour cela, il est nécessaire de traduire, sous forme de cartes, tous les facteurs ayant une influence sur leur localisation.

La détermination de ces facteurs peut se faire de façon empirique ou à dire d'experts.

La hiérarchisation de ces facteurs, c'est-à-dire la détermination de la part contributive de chacun d'eux, est effectuée par LCM soit à l'aide d'une régression logistique, soit par auto-apprentissage à l'aide d'un réseau neuronal (RN - Perceptron multicouche).

Au final, pour chacune des transitions d'une classe d'occupation du sol vers une autre classe, on obtient une carte de susceptibilité au changement définie en fonction de ces facteurs. A l'aide des cartes de susceptibilité aux changements et des matrices de transition, LCM simule les dynamiques des classes d'occupation des sols à l'aide d'un automate cellulaire suivant un processus d'allocation spatiale des changements multi-objectifs (Aguejdad et Houet, 2008).

Grâce à ces données, l'automate cherche à répartir spatialement $1/n$ des changements attendus entre deux classes à chaque n pas de temps.

Lorsqu'une cellule est susceptible de changer vers deux classes d'occupation des sols différentes, le processus résout les conflits en allouant la classe d'occupation du sol pour laquelle le type de changement dont elle dépend présente la susceptibilité la plus forte, après normalisation par la quantité de changements attendus.

Ainsi, au fur et à mesure, le poids d'un changement diminue, permettant de privilégier dans d'autres cellules d'autres types de changements, et de se reporter vers des cellules présentant une susceptibilité au changement plus faible (Eastman, 2006).

LCM tient compte également de zones qui, d'après un scénario défini, constituent des contraintes pour l'évolution d'une classe d'occupation du sol (ex : zone inondable pour l'urbanisation). Il offre la possibilité de mettre à jour les cartes de susceptibilité aux

changements à chaque itération (flèches rouges), notamment lorsque l'un des facteurs est considéré comme dynamique au cours de la simulation, c'est-à-dire intrinsèquement lié à l'évolution d'une classe d'occupation du sol (ex : distance à l'urbain existant).

Ces mises à jour de cartes de susceptibilité aux changements tiennent également compte de l'intégration des mesures de planification (implantation d'un nouveau tronçon routier par exemple) aux dates prédéfinies par l'utilisateur.

III-3-6- Méthodes d'évaluation des simulations produites par LCM :

S'il n'est évidemment pas possible de valider les projections qui sont effectuées à l'horizon 2040, une stratégie alternative consiste à évaluer les capacités du modèle à projeter de façon plausible les évolutions futures de l'étalement urbain. Cette stratégie est mise en œuvre en deux étapes :

Etape 1 : test et validation des facteurs de localisation des changements retenus pour modéliser l'urbanisation ;

Etape 2 : comparaison du résultat d'une simulation sur une période passée (2010- 2021) avec la situation réelle de 2021.

La validation du choix des facteurs de localisation est réalisée dans un premier temps en utilisant le coefficient de corrélation R et l'indice V de Cramer (Ott et al., 1983) qui sont calculés à partir de la variable dépendante (les zones du changement « vers Urbain ») et de chacune des variables indépendantes (facteurs de localisation des changements).

Une valeur forte de l'indice V de Cramer indique que le potentiel explicatif de la variable est élevé, mais ne garantit pas la performance finale.

En effet, cette variable peut ne pas tenir compte des exigences mathématiques de l'approche de modélisation utilisée et convenablement intégrer la complexité de la relation avec la variable dépendante. Ces indicateurs sont, pour l'essentiel, utilisés pour sélectionner les facteurs de localisation retenus.

Par exemple, si le facteur de distance par rapport à la ville centre a été identifié comme un facteur explicatif de l'urbanisation, sa traduction sous forme cartographique peut prendre plusieurs formes : une distance en valeurs réelles ; une distance par zones tampons successives (tous les 500 m par exemple) ; une distance par commune représentative des couronnes communales successives.

L'analyse croisée de ces deux indicateurs permet alors de sélectionner la représentation cartographique de la variable indépendante qui apparaît comme la plus explicative du changement d'un point de vue statistique.

Si cette étape est critique et présente certaines limites, elle permet néanmoins de hiérarchiser les représentations des facteurs de localisation sous formes quantitative et qualitative.

Une fois les facteurs de localisation retenus sous la forme spatiale la plus pertinente, deux méthodes peuvent être utilisées pour paramétrer le modèle à l'aide de ces données : une régression logistique ou une méthode neuronale (Perceptron Multicouche).

L'analyse parallèle des indicateurs évaluant la précision de ces deux méthodes (le Pseudo R^2 pour la régression logistique (Clark et Hosking, 1986) et l'Accuracy Rate (AR) pour le réseau neuronal (Atkinson et al., 1997) permet d'une part, de mesurer si les facteurs retenus sont pertinents et d'autre part, de comparer ces deux méthodes pour générer les cartes de susceptibilité à l'aide de l'indicateur ROC (Relative Operating Characteristic (Pontius, 2000 ; Pontius et Schneider, 2001)).

Ensuite, afin d'évaluer l'efficacité du modèle pour la simulation de l'urbanisation, nous nous inspirons de la démarche de Houet et Gaucherel (2007) en simulant, à partir des données de 1984 et de 2000, la situation en 2005 qui est comparée ensuite avec la situation réelle à cette date par l'intermédiaire de l'indice de Kappa (Rosenfield et Fitzpatrick-Linz, 1986).

L'indice est calculé sur la totalité de la zone d'étude mais également en excluant les zones qui ne pouvaient pas subir de changements telles que, par exemple, la zone urbaine existante en 2000. Le désavantage de ce type d'indice relève du fait que si le changement n'a pas été simulé exactement là où il devait se produire, sa valeur tend à baisser drastiquement (Pontius, 2000).

Pour compenser, nous utilisons également l'indice ROC pour comparer les changements réels avec les cartes de susceptibilité aux changements. Cela permet de mesurer si les changements qui se sont produits entre 2010 et 2021 correspondent aux zones où les probabilités de changement sont les plus fortes. Nous procédons ensuite à la comparaison du résultat d'une simulation sur une période passée (2010-2021) avec la situation réelle de 2021.

L'objectif de ce travail n'étant pas la prédiction, nous comparons les changements simulés et réels pour 2021 à une échelle moins contraignante que celle de la cellule (30 m 30 m) mais toute aussi pertinente du point de vue de l'aménagement du territoire: la commune. Ceci permettra d'évaluer si, à cette échelle, l'étalement urbain simulé est cohérent d'un point de vue quantitatif avec ce qui s'est réellement produit entre 2010 et 2021.

Enfin, pour mesurer le degré de plausibilité des projections, nous cherchons à savoir au bout de combien d'itérations les projections simulent correctement les changements qui se sont réellement produits entre 2010 et 2021. Nous partons de l'hypothèse que si les changements simulés ne sont pas correctement prédits pour la date considérée (c'est-à-dire un mauvais indice de Kappa pour 2021), les projections faites sont considérées comme plausibles dès lors que l'étalement urbain qui s'est réellement produit entre 2010 et 2021 aura été simulé dans un laps de temps très court après 202

Chapitre IV

Résultats et discussion

Introduction

Cette partie du travail vise la présentation des résultats obtenus dans la partie matériels et méthode, et les statistiques sur lesquels nous avons évalué les changements de l'occupation du sol pour une période de dix ans, ensuite une carte prospective de changement de l'occupation des sol de la ville de Meniaa à l'horizon 2030 produite par le modèle LCM sera analysée.

Les valeurs de l'indice de Kappa sont présentées au Tableau Ce Tableau montre que la moyenne de Kappa pour les trois classifications est de 92 %. Celui de la classification de l'année 2000 une valeur de (0.9) est la moins précise. C'est le résultat d'une légère confusion entre la classe urbaine et la classes du sol nu. Pour l'année 2010, les classes thématiques sont mieux séparées. Il reste quelques confusions entre les classes sol nu et urbain. Cela donne une bonne valeur de Kappa (0.92). Le résultat de la classification de l'année 2021 est mieux précis avec un indice de Kappa plus de (0.93). Malgré les légères confusions, ces classifications demeurent excellentes et nous permettent d'évaluer l'évolution des changements de l'occupation de la zone d'étude.

Tableau 12: Valeurs de l'indice de Kappa pour les trois cartes d'occupation des sols

Occupation du sol (année)	Kappa
2000	0.9088
2010	0.9256
2021	0.9321

IV-1-Évolution spatio-temporelle de la ville de Meniaa :

Les trajectoires spatio-temporelles des structures paysagères et des modes d'occupation des sols la ville de Meniaa sont présentées et analysées ci-après.

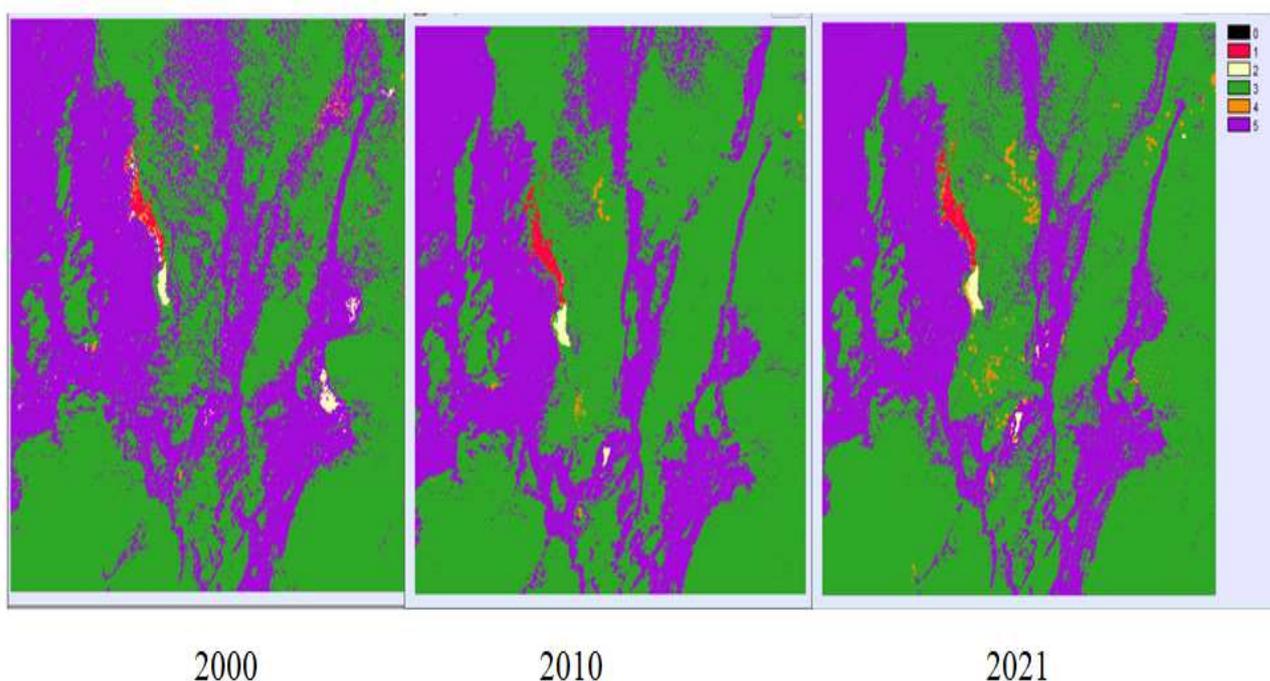


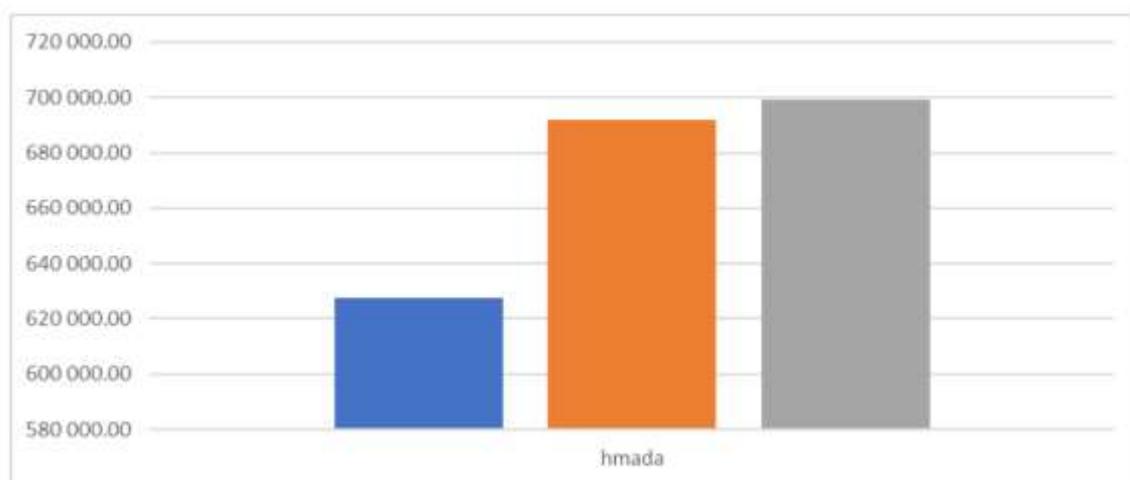
Tableau 13:Présente la superficie et le pourcentage de chacune des classes d'occupation des sols pour les trois années choisies

Catégorie	Légende	2000	2010	2021
1	Urbain	2 161.73	3 041.60	2 976.46
2	Eaux	3 050.13	1 136.31	1 311.40
3	Hamada	627 395.75	691 790.83	699 354.34
4	Agriculture	3 069.69	1 287.12	4 922.73
5	Dunes	435 513.32	373 934.76	362 625.69

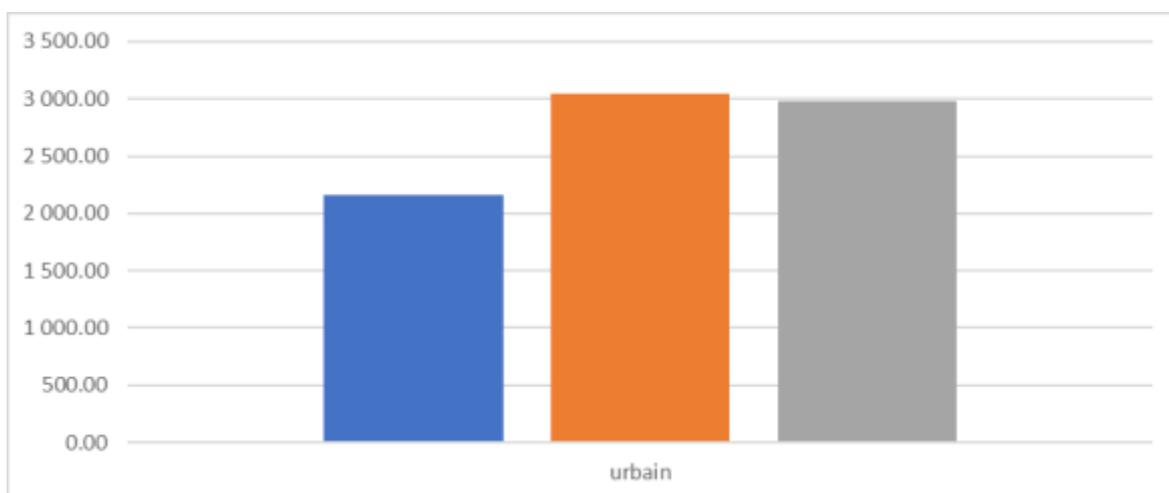
L'analyse de ce Tableau et des graphiques subséquents permettre d'étudier l'évolution des classes d'occupation de Meniaa.

IV-2-L'évolution des classes de l'occupation du sol de Meniaa :

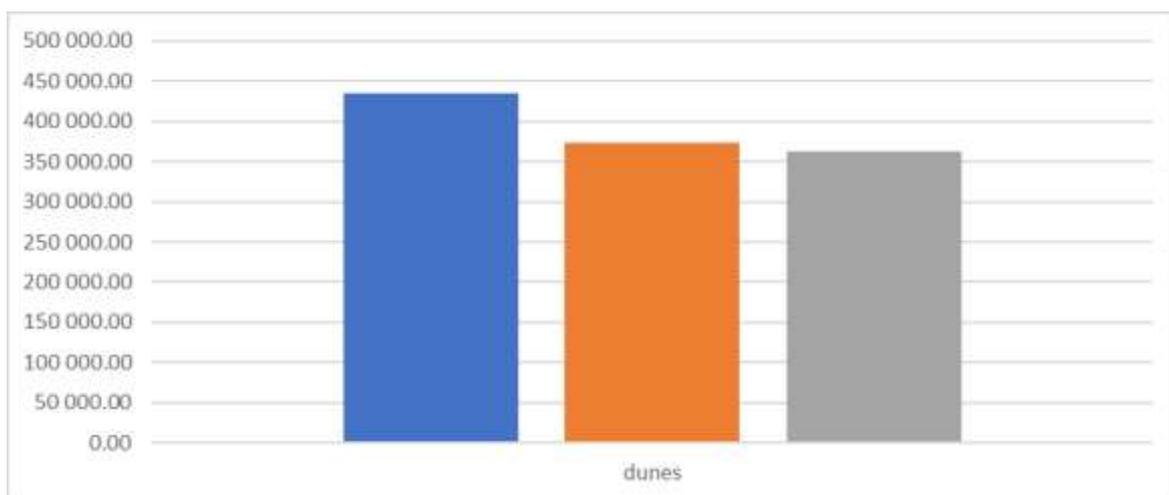
La ville de Meniaa se trouve au cœur du piedmont subdésertique algérienne, zone aride avec un sol squelettique caillouteux généralement (zone de Hamada) avec la présence du sable souvent accumulé sous forme de dunes, par conséquent la majorité de son territoire soit plus de 40% est occupé par les différents types d'occupation psammophiles, allophites près du lac salé (chott). Lors des trois années d'observation avec une diminution importante de 17% de l'accumulation sableuse en faveur de la zone de h'mada entre 2000 et 2010 voire figure



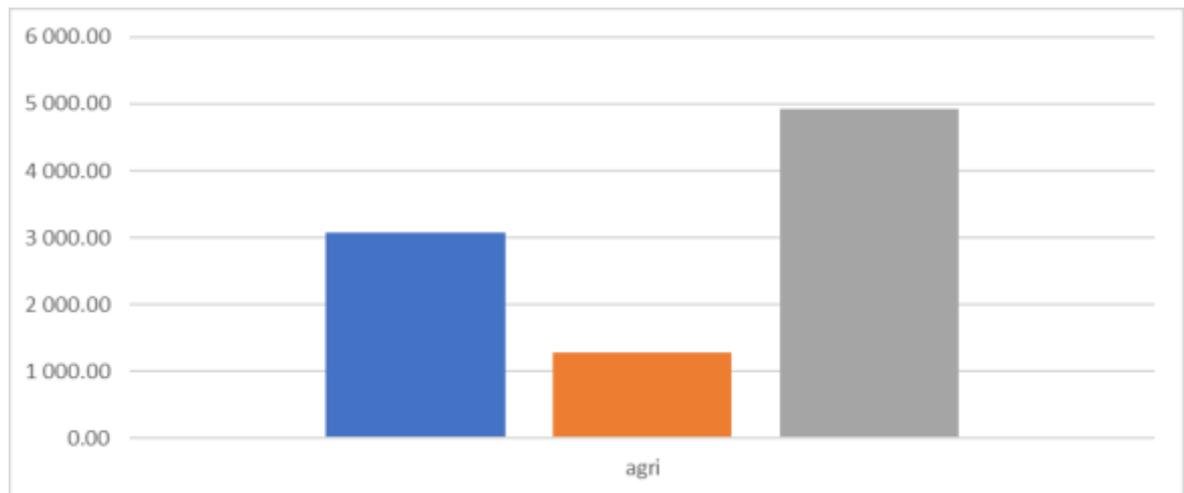
Le milieu urbain et les infrastructures routières occupent à peu près 3 % du territoire pour l'année 2021 tandis que vingt ans plus tôt (2000), ils occupaient seulement 0,9 % dans cette période la surface urbaine a été triplée. Ces chiffres donnent le portrait d'une région en urbanisation.



Le sable qui correspond en majorité aux accumulations dunaires observe une régression importante de 73 000 Ha entre 2000 et 2010, par contre il observe une légère régression entre 2010 et 2021 en perdant 11 000 Ha de sa surface.



La surface de l'agriculture a perdu une surface conséquente plus de 1 700 Ha entre 2000 et 2010 passant d'une surface plus de 3 000 Ha à presque 1 300 ensuite une très grande augmentation peut se considérée comme une explosion de ce secteur dans la région cette augmentation est estimée par plus de 3 600 Ha, passant à une surface de 362 000 Ha à l'an 2021.



IV-3- La carte d'occupation de la ville de Meniaa à l'horizon 2030 :

La construction de scénarii prospectifs ne se destine pas exclusivement à faciliter la prise de décision en multipliant des cas de figure. La démarche scientifique suivie dans ce travail se veut la plus large possible, c'est-à-dire qu'elle s'adresse aux acteurs (directs et indirects) qui font vivre le secteur de développement à l'échelle locale. D'après Fabrice Hatem, l'exercice de la prospective peut à la fois « sensibiliser un public à une question nouvelle, faire prendre conscience d'un risque ou de l'imminence d'un changement, sans que cela débouche de façon directe sur une prise de décision » (Hatem, 1993, 21). L'objectif est, entre autres, de conscientiser le grand public, les décideurs et les acteurs directs, en leur donnant la possibilité de se projeter dans le futur, et ainsi de mieux comprendre l'impact des prises de décisions actuelles sur l'évolution du paysage. A ce stade, la pertinence, la cohérence, la vraisemblance et la transparence (Godet, 1993) des hypothèses sont cruciales. Leur capacité à appréhender le secteur naturel doivent être les plus étendus possible et ne doit pas se limiter aux seules stratégies de protection. En effet, à l'image des conclusions énoncées matériel et méthodes, Christopher Brown (2002) remarque que l'expansion des plantations dépend d'une combinaison de décisions d'ordre complexe. D'après l'auteur, « ces décisions ne sont pas prises en vase clos, mais dans un cadre plus large et plus complexe d'aspirations économiques, sociales et environnementales, qui sont souvent nées et exprimées en dehors du secteur. Ces aspirations sont difficiles à identifier, à quantifier et à analyser, mais elles influenceront probablement beaucoup plus le développement des milieux naturels que des considérations strictement liées à l'offre future des terres agricoles ».

Dans notre cas nous avons contenté du scénario tendanciel, modélisé avec CA-Markov. La présentation synthétique du scénario prédictif s'accompagne de la

détermination temporelle et surfacique des changements et voire l'impact de ces changements sur l'activité agro-saharienne dans la ville.

VI-4- Occupation prospective du scénario tendanciel

Le scénario tendanciel se veut être une anticipation « poussant à bout les conséquences logiques d'hypothèses ou de tendances préalables », modulées ou contraintes par des décrets de loi en restant dans la trajectoire spatio-temporelle du passé telle que le modèle la connaît à travers la période d'entraînement. Nous émettons l'hypothèse que les changements des types d'occupation des sols restent constantes, c'est-à-dire que l'on n'observe pas des règlements de protection ou, au contraire, de dégradation massive des unités d'occupation. Ce scénario va jusqu'en 2030 afin de réduire au minimum la marge d'erreur ou l'incertitude (il s'agit d'une prédiction), tout en respectant le pas de temps compris entre 2010-2021 (calibration).

VI-5- Matrice de transition 2010-2021

La lecture de la matrice de transition nous aide à comprendre la trajectoire de l'évolution future de chaque classe d'occupation de la ville de Meniaa. La probabilité de changement entre 2010-2021 sert à la quantité de Changement pour l'année 2030. Le croisement des données de l'an 2010 (colonnes) et de l'an 2021 (lignes) sont illustrés dans le Tableau 14.

Tableau 14: Matrice de transition

Légende	Urbain	Eaux	Hmada	Agriculture	Dunes	Total
Urbain	38.569	0	0	0	0	38.569
Eaux	240	13.445	1.658	322	1.302	16.967
Hmada	0	21	8.455.463	4.914	583.769	9.044.167
Agriculture	604	1.236	44.155	10.943	6.803	63.741
Dunes	0	1	444.716	485	4.252.375	4.697.577
Total	39.413	14.703	8.945.992	16.664	4.844.249	18.722.814
	844	1.258	490.529	5.721	59.1874	

Cette matrice montre que la classe urbaine bénéficie d'un excédent de 844 Ha, cet excédent est alimenté principalement par l'agriculture et le lac avec 604 Ha et 240 Ha respectivement.

Les hamadas reconquièrent plus de 490.000 Ha au détriment des dunes principalement avec une superficie de 444.716, les lacs 1.658 Ha et l'agriculture avec une superficie qui avoisine les 45 Ha.

L'extension des terres agricoles de type intensif est très remarquable voire les conditions extrêmes dans laquelle se trouve la zone d'étude, cette expansion se fait essentiellement sur les terres de hamadas avec une superficie de 4.914 Ha, les dunes avec 485 Ha.

Les dunes et l'accumulation sableuse a subit une régression conséquente avec une superficie qui avoisine 322 622 Ha, par ailleurs l'ensablement a envahis les zones de hamadas avec une superficie de 583.769 Ha.

VI-6- Validation du modèle

Si l'examen visuel donne une première estimation de la qualité de la prédiction en comparant la carte de référence 2021 et la simulation 2021, cette approche ne permet pas de localiser et de quantifier avec précision les zones d'erreurs et celles correctement prédites qui auraient échappé à la vigilance de l'observateur. Afin de dépasser la subjectivité du modélisateur, Pontius et al. (2004) montrent l'intérêt d'une comparaison statistique entre ces cartes. La méthode de budgétisation (Erreur/Exactitude) va être désignée afin d'évaluer et de valider le modèle.

VI-7- Budgétisation globale des (erreurs/exactitudes)

Tableau 15: Budgétisation globale

%		Changements observés 2010 - 2021		
		0	1	Total général
Changements prédits 2010 - 2021	0	61.04%	19.88%	80.92%
	1	6.30%	12.78%	19.08%
	Total général	67.34%	32.66%	100%

OC: Changement observé en pourcentage du paysage: **32.66 %**
PC: Changement prédit: **19.08 %**
Q: Erreur en raison de la quantité des changements prédits: **13.58 %**
A: Erreur en raison de l'allocation des changements prédits: **12.59 %**
T: Erreur totale: **26.18 %**

Cette méthode permet de quantifier et de localiser les erreurs/exactitudes des changements issus du croisement de deux cartes de référence (t1 et t2) et d'une carte de prédiction (t2).

La validation du modèle se déroule en deux étapes, en se focalisant tout d'abord sur l'analyse des changements prédits et observés entre 2010 et 2021, puis en comparant les classes d'occupation entre la carte d'occupation connue et prédite.

61% de la constance observée (sur un total de 80%) entre 2010 et 2021 a été correctement prédite (N) (Tableau 13). La prédominance de la Hamadas et sa stabilité (68% de stabilité) dans la région comparativement aux autres types d'occupation explique en partie ce résultat. Les erreurs, en raison d'une constance observée mais prédite comme changée, sont de 6.3% (F), alors que les misses qui traduisent le processus inverse atteignent les 20%. Enfin les changements observés ayant été correctement prédits par le modèle sont de 12% (H). Le total des changements observés ($OC = M + H$) est de 32% alors que les changements totaux prédits ($PC = F + H$) est de 19%. La précision de la prédiction globale des changements à travers l'ensemble du paysage est la suivante :

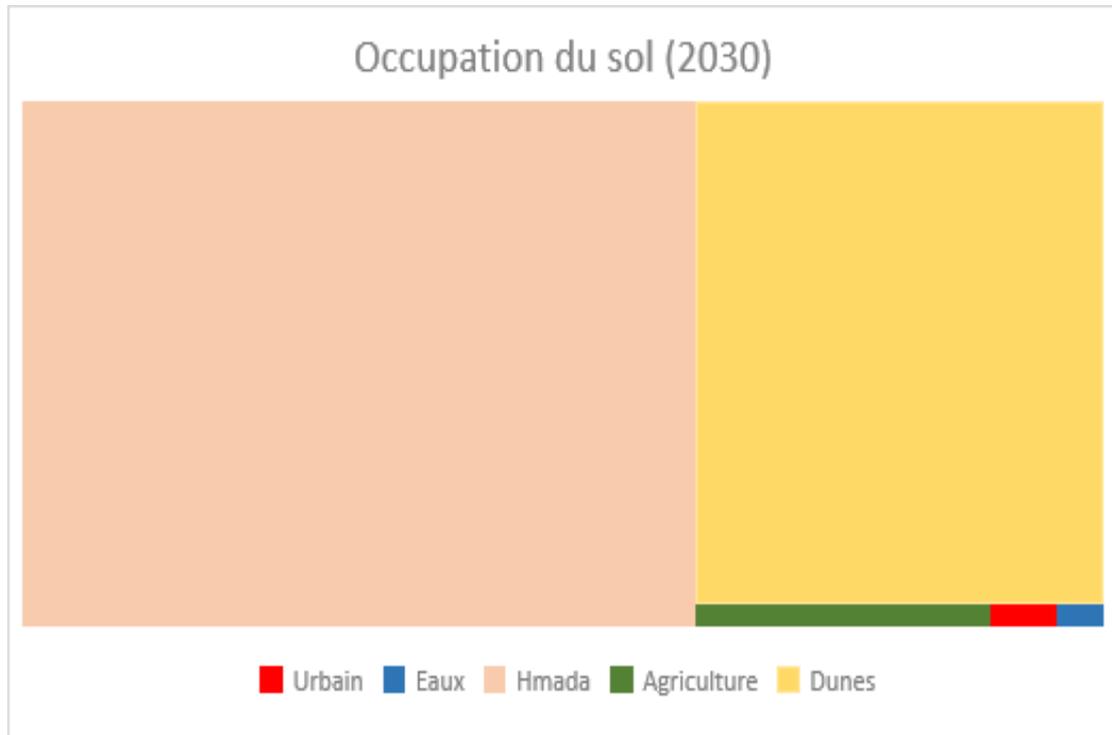
VI-8-Occupation du la ville de el meniaa à l'horizon 2045 :

La modélisation prospective de la carte d'occupation à l'horizon 2030 par le modèle LCM en utilisant la matrice de transition (2010-2021) et les cartes d'aptitudes pour chaque classe d'occupation des sols figure (carte d'occupation 2030).

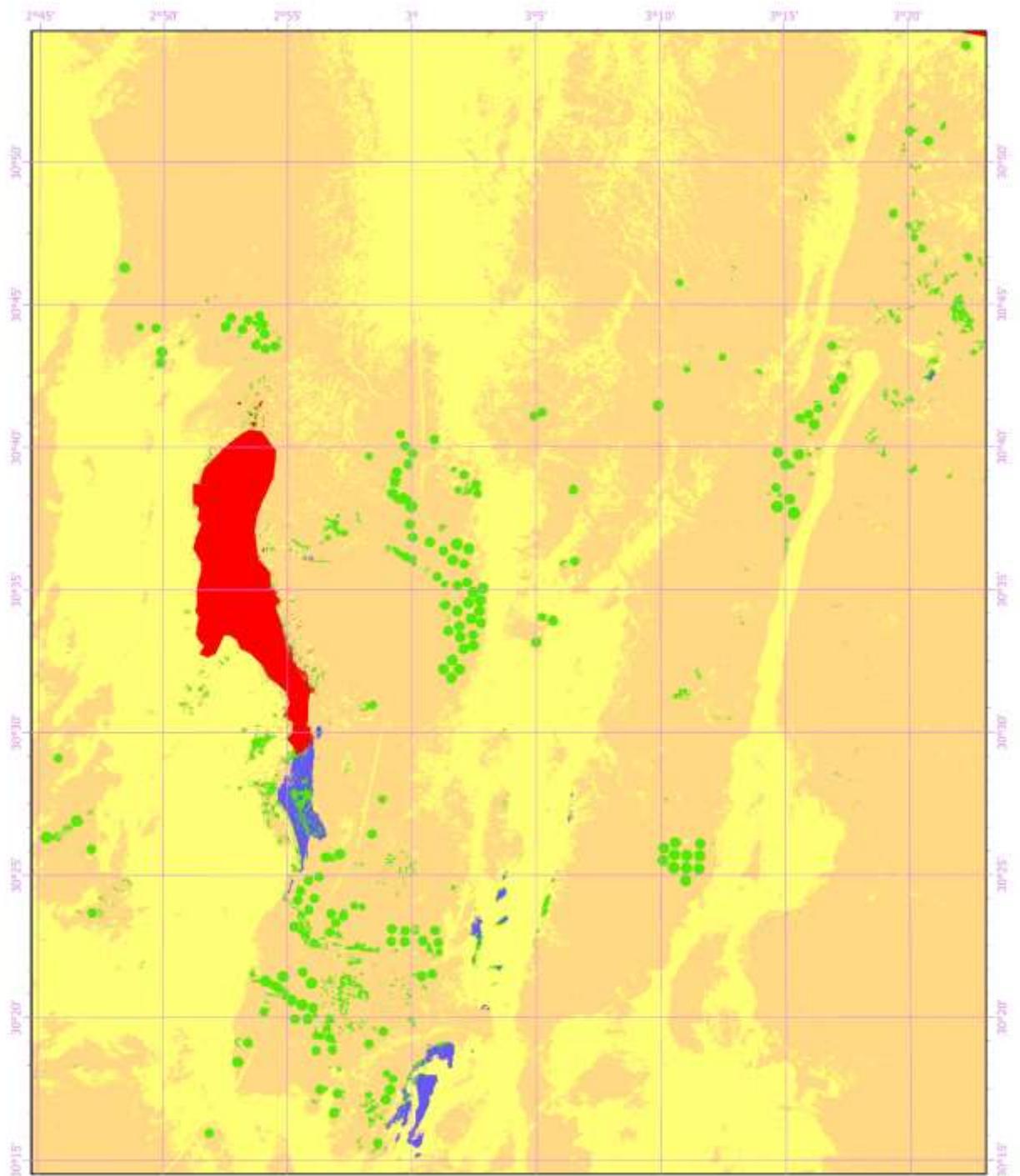
Tableau 16: Matrice de transition

Légende	Hectares	Taux
Urbain	2 757.82	0.26
Eaux	1 877.52	0.18
Hmada	667 018.14	62.27

Agriculture	12 024.30	1.12
Dunes	387 512.85	36.18



L'analyse du Tableau 15 montre que la classe urbaine aura une superficie de 1 877.52ha, soit un taux de 0.26 % même que cette classe d'occupation marque le taux le plus faible elle enregistre une expansion très importante par rapport à l'an 2021, la hamada restera la classe d'occupation la plus importante avec une superficie de 667 018 ha, soit largement plus de la moitié de la superficie totale de la zone d'étude 62.27 %, suivie par la classe d'accumulation sableuse avec un taux de 36.18 %, la classe agriculture observeras une expansion très importante selon le scénario tendanciel et marquera une superficie de 12 024 Ha soit un taux de 1.12% de la superficie totale de la ville.



La système de projection correspond
WGS84 - World Geodetic System 1984
EPSG:4326



VI-9-Analyse des changements pour chaque classe d'occupation du sol (2021-2030):

L'intérêt principal de ce traitement des données est de pouvoir quantifier précisément le changement d'occupation et d'utilisation du sol. Le but de cette étude est également de connaître les processus d'évolution, c'est-à-dire de déterminer les transferts d'une classe à une autre classe d'occupation et d'usages des sols en termes de pertes et de gains. Pour y parvenir, nous avons utilisé des matrices de transition, calculées à l'aide du logiciel Idrisi.

L'utilisation de ces matrices permet de connaître la surface (en hectare) de chaque type de classe pour la date de 2030, ainsi que la part de chaque classe qui reste sTableau et celles qui évoluent vers d'autres classes. Ainsi, il est possible de connaître le devenir et la provenance de chaque classe d'occupation ou d'utilisation du sol. Enfin les matrices permettent de faire le bilan d'évolution d'une classe en indiquant les gains/pertes au dépens/profit des autres classes (Houet, 2006).

VI-10-Matrice de transition 2021-2030 :

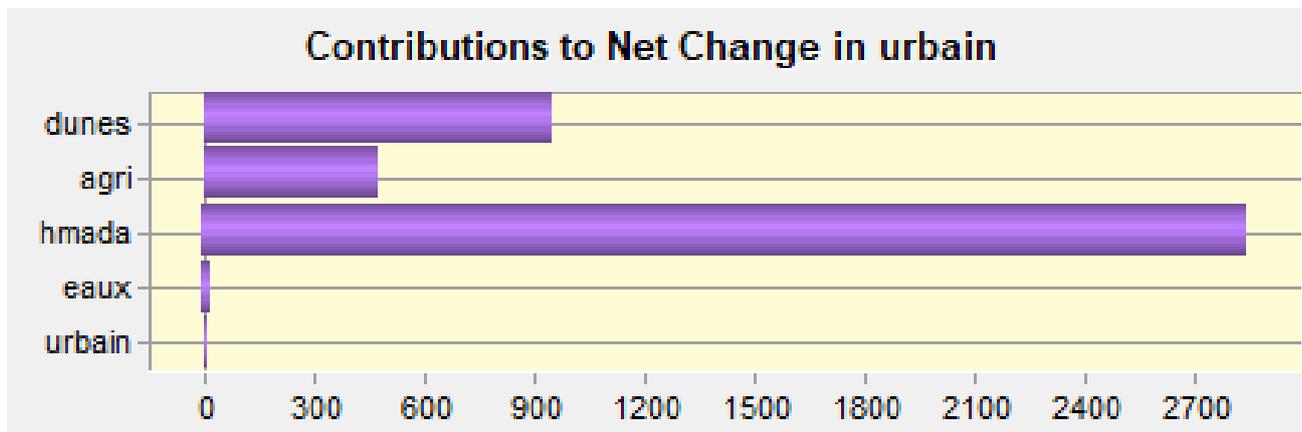
L'analyse de la matrice de transition entre 2021 (colonnes) et 2030 (lignes) montre que la Hamada subira une forte régression avec une perte de 98 175 ha, passant de 9 044 167 ha en 2021 à 8 625 095 ha en 2030, suivie par la classe dunes de sable qui observera une régression de 47 077 ha, ces premières analyses montrent que l'expansion de l'urbain et l'agriculture seraient au détriment des terres nus ce qui est encourageant.

Tableau 17: Matrice de transition (2021-2030).

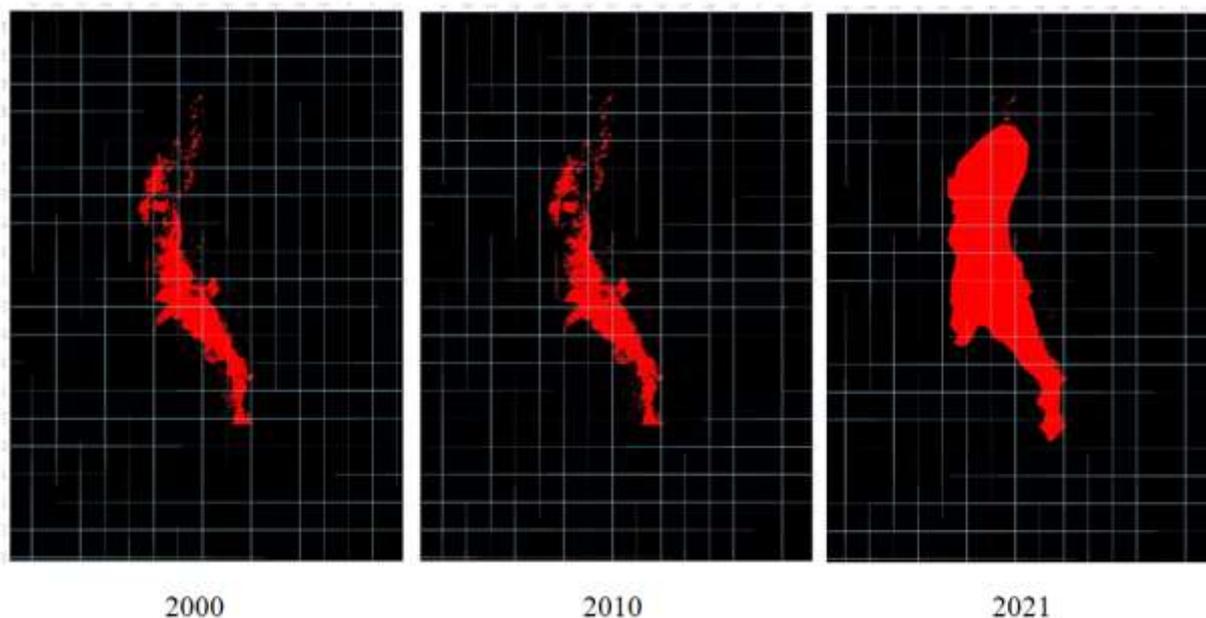
Légende	Urbain	Eaux	Hmada	Agriculture	Dunes	Total
Urbain	35 205	0	0	0	0	35 736
Eaux	90	12 858	2 921	4 411	4 004	24 284
Hmada	0	773	8 254 605	20 692	349 025	8 625 095
Agricultur e	3 274	3 162	100 113	34 935	14 223	155 707
Dunes	0	0	686 528	3 346	4 330 325	5 020 199
Total	38 569	16 967	9 044 167	6 3741	4 697 577	18 722 814

VI-11-Contribution au changement net en classe urbaine**Tableau 18:** Contribution au changement net en classe urbaine

Légende	Contribution Net	Taux
Urbain	0	0.00
Eaux	21	0.49
Hmada	2 847	66.39
Agriculture	473	11.03
Dunes	947	22.08



L'analyse au changement net en milieu urbain fait sortir que la hamada est la classe la plus participante avec une superficie de 2 847 ha soit un taux de 66.39%, ce qui indique l'importante expansion de l'urbain au détriment de les hamadas, ainsi au détriment des dunes avec une superficie de 947 Ha, l'agriculture participera avec une superficie de 473 Ha ce qui reste une superficie conséquente, cette superficie sera consommé par les palmiers et les fermes privé sui se trouve dans le milieu urbain, dont l'utilité de mettre des lois pour préserver ces espaces vert important dans ce milieu désertique.

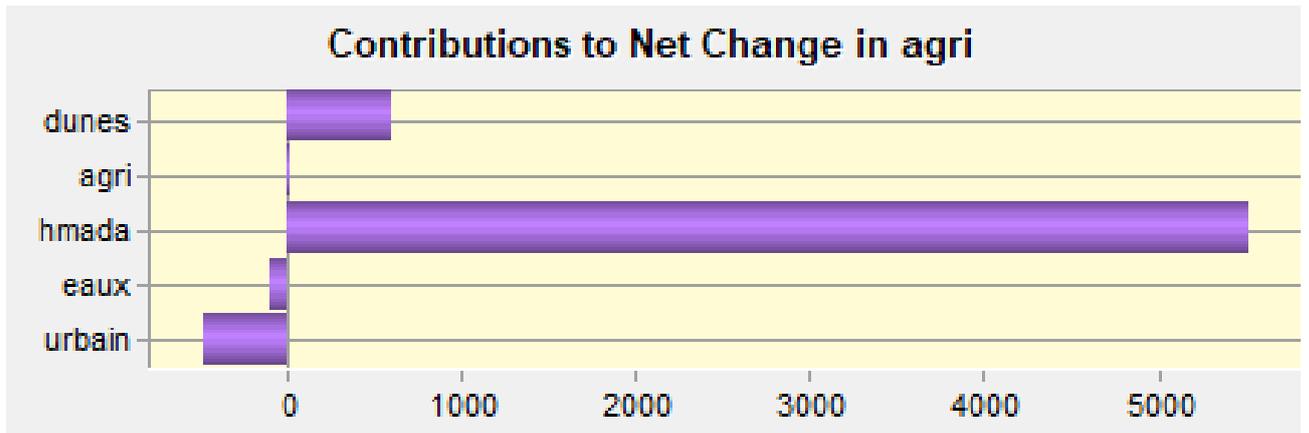


VI-12-Contribution au changement net en classe Agriculture

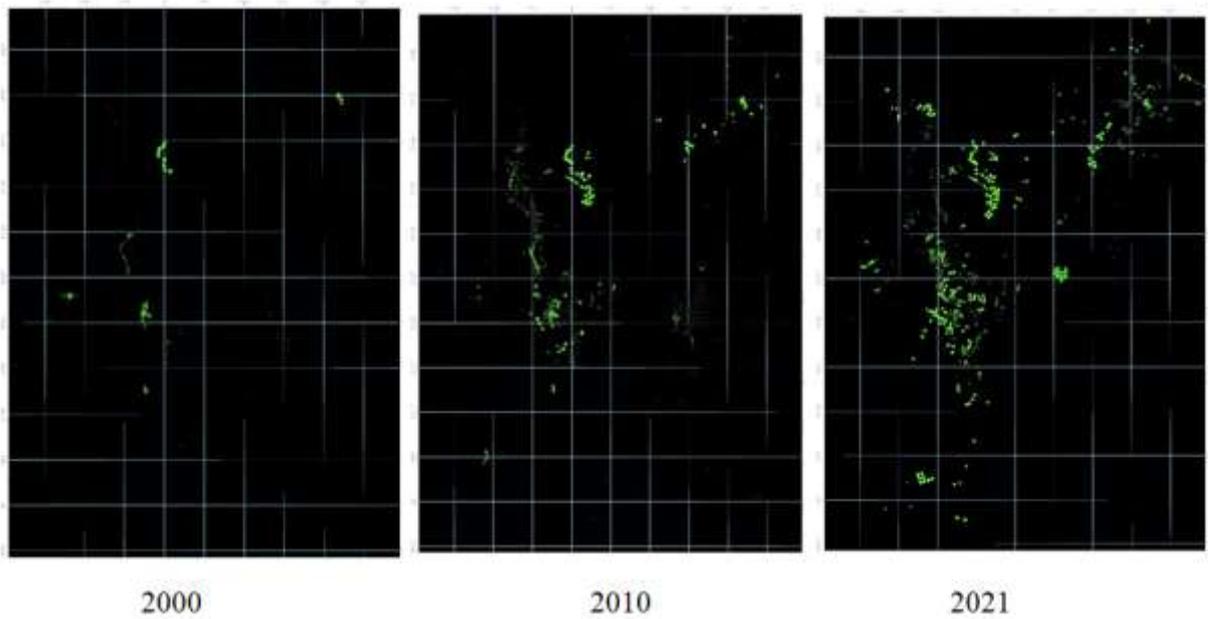
L'analyse de classe agriculture dévoile qu'une expansion très remarquable de cette occupation au détriment des vastes sols nus existantes dans la région, cette progression est dus par l'affleurement de la nappe albienne dans la région encouragé par les différents programmes de développement agricole et rurale établie par l'Etat, ce qui a permis l'installation des grandes surfaces de type agriculture intensif en irriguée.

Tableau 19: Contribution au changement net en classe Agriculture

Légende	Contribution Net	Taux
Urbain	473	7.06
Eaux	90	1.34
Hmada	5520	82.45
Agriculture	0	0.00
Dunes	612	9.14



L'analyse spatiale montre que la majorité des surfaces agricoles seraient récupérées au nord sur le trajectoire de la nappa albiennne ce qui rend ces zones très potentiels à l'agriculture, les bas fons des dunes seraient aussi restaurés puisqu'ils emmagasinent beaucoup de ressources hydrique sous formes de nappes libres sauf les zones très proches du chott à cause de leurs fortes salinités.



Conclusion

La construction de scénarii prospectif tendanciel et contrasté montre son plein potentiel afin d'identifier les zones à enjeux socio-économiques. Son capacité à quantifier et localiser les changements futurs d'occupation du sol constitue une base solide dans le processus décisionnel, dans la mesure où il sert d'entrée pour calculer les impacts des processus socio-économique (Veldkamp et Verburg, 2004) - via des études d'impact sur l'activité par exemple. D'après Bernard Cazes (in Hatem, 1993, p.48) la prospective décisionnelle « ne peut que bénéficier des travaux d'évaluation a posteriori de l'efficacité des politiques publiques, qui permettent, sinon de dire sans équivoque ce qu'il faudrait faire à l'avenir, du moins de repérer les erreurs qu'il vaudrait mieux ne pas recommencer ».

L'analyse du trajectoire d'évolution passé et la simulation des changements d'occupation des sols sont affectées à la base de la situation actuelle notamment en matière de planification territoriale, ce scénario ne suffit pas à lui-même dans la mesure où il est la construction d'un autre scénario qui prend en considération la possibilité d'une planification territoriale future plus rigoureuse dans la protection des espaces naturels tel que le forêt et la steppe permettre de donner une idée de l'impact future de ces lois sur la dégradation de ces milieux ce scénario vaut un scénario optimiste de la région.

Les changements futurs de l'occupation des sols à l'horizon 2030 selon le scénario tendanciel montre qu'il aura des transitions très importantes entre les classes d'occupation, il aura des classes d'occupation qui seraient expansées aux dépens d'autres classes dans le cas de Menia c'est les agglomérations urbaines qui seraient expansées aux dépens d'autres classes d'occupation tout en gardant leurs surfaces actuelles sans les perdre, par ailleurs l'agriculture aura une expansion très importante avec une superficie de 47 000 ha, ce qui promettra une activité économique très importante dans la région et qui participera même au développement économique national.

Par ailleurs l'ensablement demeure la contrainte majeure face au développement de la ville de Menia ce qui expose un risque important sur les investissements agricoles ou infrastructure.

Conclusion générale

Conclusion Générale :

L'objectif de ce travail était de produire une carte d'occupation des sols future à l'horizon (2030) de la région de Meniaa, et de voir l'évolution urbaine de l'agglomération, en utilisant le modèle LCM et un scénario tendanciel de la situation actuelle.

Deux composantes, l'une méthodologique et l'autre géographique, ont ainsi constitué ce travail. D'une part, la composante méthodologique nous a permis d'optimiser la modélisation de l'occupation des sols et de fournir des projections d'impacts les plus robustes possibles, dans la limite des connaissances actuelles. D'autre part, ce travail nous a permis d'aborder différents aspects de géographie : l'aspect biogéographique et la géographie humaine de la région de Meniaa qui se trouve dans un milieu extrême (desertique).

Tout au long de ce manuscrit, les chapitres se sont enchaînés suivant une réflexion concernant l'approche méthodologique utilisée justifiées et que nous pensons donc la moins biaisée possible. Ce fil conducteur nous a permis d'aboutir à une estimation des impacts potentiels du changement de l'occupation des sols future sur l'activité socio-économique dans les zones sahariennes.

Cette recherche a été entamée par la reconstitution de la trajectoire entre 2000 et 2010 en utilisant la télédétection. Sur cette période nous avons constaté qu'une expansion importante du milieu urbain associée à une densification des zones existantes puis une expansion spatiale de ce milieu. Il ressort également une augmentation significative des espaces agricoles ce changement est encouragé principalement par le programme de développement agricoles et rurales adopté par l'Algérie.

Dans ce travail nous avons constaté que le milieu saharien est très rude à modéliser, pour plusieurs raisons, commençant par les contraintes liées à l'absence des facteurs explicatifs, leurs exactitudes et la détermination de leurs poids, la différence importante de la distribution dans l'environnement d'une classe d'occupation à une autre (marginalité) ce qui rend l'application du modèle est difficile ;

La validation du modèle LCM par la modélisation de la carte d'occupation actuelle (2021) ; montre la pertinence de ce modèle en affichant des erreurs dues à la quantité et à l'allocation très acceptables.

**Références
bibliographiques**

Références bibliographiques

1. A Short Presentation of the Land Change Modeler (LCM) ,J.R. Eastman and J. Toledano ,Chapter 36
2. centre canadien de télédétection
3. Clark Labs, Clark University
4. Cours : EnvCAL - Suivi de l'environnement par télédétection, Université Virtuelle Environnement et Développement Durable
5. Cours :EnvCAL - Suivi de l'environnement par télédétection
6. Cours de Professeur Claude Kergomard, Ecole Normale Supérieure, Paris
7. Earthobserving system
8. Eurostat, "Manuel des concepts relatifs aux systèmes d'information sur l'occupation et l'utilisation des sols (Édition 2000)", Office des publications officielles des Communautés européennes, Luxembourg, 2001
9. Le centre canadien de la télédétection
10. MANUEL de TÉLÉDÉTECTION SPATIALE Elaboré par: Francisco Eugenio González Javier Marcello RuizFerran Marqués Acosta,
11. MAWRED knowledge hub
12. Mlle. SITAYEB AICHA ;Mlle. HAMADENE IMANE Cartographie et analyse spatiale de la dynamique de l'occupation du sol dans la commune de Mohammadia
13. Satellite Imaging Corporation
14. Site de l'Université de Sherbrooke, Faculté des lettres et sciences humaines, Département de géomatique appliquée, Québec
15. Site GéoBretagne, Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL).
16. siteGéoBretagne, Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL) ,Région Bretagne
17. Tutoriels sur la télédétection, site officiel du gouvernement du CANADA

Résumé

La modélisation prospective implique la collecte de données démographiques, économiques, sociales et environnementales pertinentes pour la région étudiée. Ces données sont ensuite utilisées pour construire un modèle informatique qui simule la croissance urbaine et ses impacts sur différents aspects de la ville.

Dans le cas d'El-mniaa, le modèle peut prendre en compte des facteurs tels que la croissance de la population, l'expansion économique, les besoins en infrastructures, l'utilisation des terres, la mobilité urbaine, l'environnement, etc. En utilisant ces données, le modèle peut générer des scénarios possibles pour l'avenir de la ville.

La modélisation prospective de la dynamique urbaine est un outil puissant pour étudier et anticiper l'évolution des agglomérations urbaines telles qu'El-mniaa. En utilisant des données et des modèles informatiques, cette approche permet de prendre des décisions éclairées et de planifier efficacement le développement futur de la région.

Les mots clé : Modélisation prospective, Dynamique urbaine, Agglomération, El-mniaa, Croissance urbaine.

الملخص

تتضمن النمذجة المستقبلية جمع البيانات الديموغرافية والاقتصادية والاجتماعية والبيئية ذات الصلة بالمنطقة قيد الدراسة. ويتم بعد ذلك استخدام هذه البيانات لبناء نموذج حاسوبي يحاكي النمو الحضري وتأثيراته على جوانب مختلفة من المدينة.

وفي حالة المنيا، يمكن للنموذج أن يأخذ في الاعتبار عوامل مثل النمو السكاني، والتوسع الاقتصادي، واحتياجات البنية التحتية، واستخدام الأراضي، والتنقل الحضري، والبيئة، وما إلى ذلك. وباستخدام هذه البيانات، يمكن للنموذج توليد سيناريوهات محتملة لمستقبل المدينة.

تعد النمذجة المستقبلية للديناميكيات الحضرية أداة قوية لدراسة وتوقع تطور التجمعات الحضرية مثل المنية. وباستخدام البيانات ونماذج الكمبيوتر، يسمح هذا النهج باتخاذ قرارات مستنيرة والتخطيط الفعال للتنمية المستقبلية للمنطقة.

الكلمات المفتاحية: النمذجة المستقبلية، الديناميكيات الحضرية، التجمعات السكانية، المنية، النمو الحضري.

Abstract

Prospective modeling involves the collection of demographic, economic, social and environmental data relevant to the region under study. This data is then used to build a computer model that simulates urban growth and its impacts on different aspects of the city.

In the case of El-mniaa, the model can take into account factors such as population growth, economic expansion, infrastructure needs, land use, urban mobility, environment, etc. . Using this data, the model can generate possible scenarios for the city's future.

Prospective modeling of urban dynamics is a powerful tool for studying and anticipating the evolution of urban agglomerations such as El-mniaa. By using data and computer models, this approach allows informed decisions to be made and effective planning for the future development of the region.

Key words: Prospective modeling, Urban dynamics, Agglomeration, El-mniaa, Urban growth.