



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Mohamed Ben Ahmed Oran 2  
Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers  
Département de Géographie et Aménagement du Territoire

**Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de  
Master en Géographie et Aménagement de territoire,  
Option : Géomatique**

Intitulé :

**Modélisation de la Dynamique des Zones  
Humides de la Wilaya d'Oran par Chaines de  
Markov et Automates Celulaires.**

Réalisé par : M. BAH Boubacar

<b>Jury:</b>	M. GHODBANI Tarik	M.C.A	Président
	M. ALLAL Nadir Ouassini	M.A.A	Examineur
	M. BRAHMI Abderrezak	M.C.B	Encadreur
	M. KOUTI Abdelaziz	M.C.B	Co-Encadreur

---

Année universitaire 2021/2022

## Résumé :

Considérées comme l'un des écosystèmes les plus productifs de la planète, les zones humides sont les milieux naturels possédant l'une des réserves importantes de CO<sub>2</sub> et d'Oxygènes de la planète. Mais avec toutes ces potentialités, ces zones sont plus que menacées de disparition ou de dégradation partout dans le monde. Les raisons de cette dégradation sont dûes d'une part au changement climatique et d'autre part aux pressions anthropiques exercées sur ces zones humides par les activités humaines telles-que l'agriculture et l'élevage.

Le but de ce travail est de faire une analyse diachronique afin de comprendre et d'estimer la tendance de l'évolution et la dynamique de l'occupation du sol de la Wilaya d'Oran et des zones humides à l'échelle local, afin de prédire la dynamique future de l'occupation du sol de cette zone et le devenir des zones humides de façon particulière d'ici 2037.

L'étude de la complexité des éléments intervenant dans la dynamique de l'occupation sera effectuée par la mise en place de deux modèles de prédiction (CA-Markov-LR, CA-Markov-MLP) afin de voir l'efficacité de chaque modèle à prédire efficacement la dynamique de l'occupation future.

Après la conception, la validation et la prédiction avec les deux modèles, notre étude montre que le modèle conçu avec la variante des perceptrons multi-couches (8,52% d'erreur globale) s'avère plus efficace que celui conçu par la régression logistique (11,75% d'erreur).

La simulation de l'occupation du sol, prédit par le modèle, à révéler une régression de 7% des plans d'eau, de 12% des surfaces forestières. Par contre le modèle prédit une extension de 8% des sols nus, de 6% des espaces Bâtis et de 2% des surfaces agricoles.

# Remerciement

Tout d'abord je remercie le bon Dieu de m'avoir donné la force et le courage de mener ce modeste travail à terme. Ensuite je remercie mes deux encadreurs Dr Brahmi Abderrezak et Dr Kouti Abdelaziz pour leur suivi, d'esprit critique et de conseil qui m'ont permis d'améliorer ce travail du mieux que je pouvais.

Je remercie également le président du Jury Professeur Ghodbani Tarik et l'examinateur M. ALLAL Nadir Ouassini qui ont accepté de consacrer leurs temps pour la lecture et l'examen de ce travail.

De façon générale je remercie tout le corps enseignant du département de Géographie et de l'Aménagement du Territoire de l'université d'Oran 2, pour la formation de qualité qu'ils m'ont transmis et de me donner l'opportunité de profiter de leurs expériences dans leurs domaines respectifs. Je les remercie également pour le courage et la patience dont ils ont fait preuve dans l'explication de cours afin de me le faire comprendre dans un département dont les étudiants préfèrent l'Arabe que le Français !

Je remercie particulièrement Monsieur Tarik Ghodbani et Monsieur Kouti, de m'avoir fait découvrir l'importance de la gestion et de la protection des zones humides à l'échelle locale, nationale, internationale ; sans eux je peux ainsi dire que je n'allais pas porter d'intérêt à ces zones à plus forte raison de faire d'elles le thème principal de mon projet de fin d'étude.

Je remercie mes parents, mes oncles mes tontons, mes tantes ainsi que mes frères et sœurs pour leur soutien et conseils durant ce travail. Je remercie également mes amis pour leurs contributions directes ou indirectes pour la réalisation de ce travail.

Enfin je remercie mes camarades de classe qui ont su faire preuve de patience et d'effort pour mon intégration dans une classe dont la moitié préfère l'Arabe que le Français lors des cours, en particulier mademoiselle Mekki Ilhem (pour ses traductions de certains cours) sans quoi je ne pourrais pas les valider. Je remercie également la dame de la bibliothèque pour sa disponibilité et le temps qu'elle m'a consacré pour m'envoyer les cartes dont j'avais besoin afin de bien mener ce travail.

Bref un Grand Merci à vous Tous

## **Dédicace**

Je dédie ce travail à mes Parents qui me sont chers, à mes frères et sœurs ainsi qu'à mes tantes et oncles, ce travail est en quelque sorte le fruit des sacrifices qu'ils ont fait durant tous mon cursus scolaires.

Je dédie aussi ce travail à mes grands-parents !

Je dédie particulièrement ce travail à mes tontons Daouda Bah, Boubacar Bah et Modibo Bah, puisse qu'ils ont été l'un des acteurs majeurs de ma réussite scolaire grâce à leurs suivis quotient de mon premier cycle à mon cycle secondaire Général ; ce travail est le fruit des efforts qu'ils ont ménagés pour mes études.

Je dédie aussi ce travail à mes enseignants de premier cycle, de second cycle, du secondaire général et du cycle universitaire, puisse que sans eux ce travail n'allait voir le jour.

# Table des matières

Résumé : .....	i
Remerciement.....	ii
Dédicace.....	iii
Table des matières .....	iv
Liste des Tableaux .....	vi
Liste des figures.....	VIII
Listes des sigles et Abréviations.....	XI
Introduction Générale .....	1
Chapitre I: Zones humides, cadre théorique et état des lieux en Algérie .....	4
I.1. Introduction .....	5
I.2. Cadre théorique des zones humides.....	5
I.2.1. Portée mondiale .....	5
I.2.2. Caractéristiques des zones humides .....	6
I.2.3. Fonctions des zones humides .....	7
I.3. Les Zones humides en Algérie .....	9
I.3.1. Les zones humides de la wilaya d’Oran .....	10
I.3.2. Les Menaces et pression sur les zones humides d’Oran .....	22
I.3.3. Cadre juridique des zones humides en Algérie .....	24
I.4. Conclusion.....	26
Chapitre II : Approche diachronique pour la modélisation de la dynamique des ZH .....	28
II.1. Introduction .....	29
II.2. Les données de la Télédétection dans l’étude des milieux humides.....	29
II.2.1. Les photographies aériennes .....	29
II.2.2. L’imagerie multispectrale et hyperspectrale des satellites .....	32
II.3. Le concept de modélisation et de simulation spatiale .....	36
II.3.1. Le modèle et la modélisation .....	36
II.3.2. La simulation .....	37
II.3.3. Les techniques de modélisation dynamiques .....	42
II.3.4. Etude des milieux humides par l’approche de la modélisation .....	45
II.4. Conclusion.....	46
Chapitre III : Construction du modèle de simulation de l’évolution des ZH d’Oran .....	47
III.1. Introduction .....	48
III.2. Démarche globale .....	48

III.3. Détection des ZH par classification des images satellitaires .....	49
III.3.1. Les données de télédétection .....	50
III.3.2. Prétraitements sur les images.....	52
III.3.3. Méthodologie de la classification des images.....	54
III.3.4. Validation de la classification .....	60
III.3.5. Choix et préparation des variables explicatives .....	63
III.4. Modélisation et simulation de l'évolution des ZH .....	66
III.4.1. La régression Logistique .....	66
III.4.2. Les perceptrons Multicouches (Réseaux de Neurones) .....	68
III.4.3. Les chaines de Markov .....	69
III.4.4. Les automates cellulaires et les chaines de Markov (CA-Markov).....	71
III.5. Validation des deux modèles.....	72
III.5.1. Validation de la régression Logistique .....	72
III.5.2. Validation du modèle CA-Markov-LR.....	73
III.5.3. Validation du modèle CA-Markov-MLP .....	74
III.6. Comparaison et choix du modèle de simulation .....	75
III.7. Conclusion.....	77
Chapitre IV : Résultats et analyse de la dynamique des ZH d'Oran .....	78
IV.1. Introduction .....	79
IV.2. Analyse du changement de l'occupation du sol .....	79
IV.2.1. L'analyse du changement autour du lac Telamine et des salines d'Arzew .....	84
IV.2.2. Analyse du changement autour de la Sebkhah d'Oran .....	88
IV.3. Analyse de l'occupation du sol prédite pour 2037 .....	92
IV.3.1. Analyse de la dynamique future autour du lac Telamine et des Salines d'Arzew .....	94
IV.3.2. Analyse de la dynamique future autour de la sebkhah d'Oran .....	97
IV.4. Conclusion .....	100
Conclusion Générale.....	101
Référence Bibliographique .....	103
Webographie :.....	115

# Liste des Tableaux

Tableau 1: Les fonctions des zones humides, leurs effets, les valeurs socio-économiques correspondantes et les indicateurs permettant de les évaluer (in Barnaud et Mermet, 1996, d'après NRC, 1995). .....	8
Tableau 2: les zones humides inventoriées à dans la wilaya d'Oran. ....	11
Tableau 3: Référence Bibliographique des photographies aériennes et leurs caractéristiques qui ont été utilisées dans l'étude des zones humides (Rapinel, 2012). ....	31
Tableau 4: caractéristiques des images des capteurs passifs utilisées dans l'étude des zones humides (Rapinel, 2012). ....	33
Tableau 5: caractéristiques des images RADAR utilisées dans l'étude des zones humides (Rapinel, 2012). ....	35
Tableau 6: Objectifs finaux de la simulation (Treuil et al., 2008). ....	38
Tableau 7: Caractéristiques des satellites utilisés dans l'étude. ....	51
Tableau 8: caractéristique des images utilisées pour la classification des LULC. ....	52
Tableau 9: choix des classes d'intérêts à partir des classes de la carte de référence. ....	55
Tableau 10: Matrice de confusion de la classification de 1985 en pixel. ....	60
Tableau 11: Matrice de confusion de la classification de 1992 en pixel. ....	60
Tableau 12: Matrice de confusion de la classification de 2007 en pixel. ....	61
Tableau 13 : matrice de confusion de la classification de 2022 en pixel. ....	61
Tableau 14: Résultat de la Matrice de confusion des classifications. ....	61
Tableau 15: listes des variables explicatives utilisées dans la régression Logistique et dans les MLP. ....	63
Tableau 16: probabilité de Transition entre les différentes classes produit par les chaines de Markov. ....	69
Tableau 17: Résultats du ROC des différentes sous modèles. ....	73
Tableau 18: les résultats de l'indice de Kappa pour la comparaison de la carte simulée et la carte de référence. ....	74
Tableau 19: les résultats des indices de mesure des différentes sous modèles. ....	74
Tableau 20 : l'indice Kappa des différentes classes d'occupation du sol. ....	75
Tableau 21: Taux d'erreur global des deux modèles. ....	76
Tableau 22: Résultat des indices de comparaison des deux modèles en termes de précision. ....	76
Tableau 23: surfaces (en ha) des différentes classes d'occupation du sol dans les différentes dates .....	80
Tableau 24: matrice de transition entre 1992 et 2007 en hectar. ....	80
Tableau 25: matrice de transition entre 1992 et 2007 en pourcentage. ....	81
Tableau 26: matrice de transition entre 2007 et 2022 en hectare. ....	81
Tableau 27: matrice de transition entre 2007 et 2022 en pourcentage. ....	81
Tableau 28: dynamique dans les zones centrales des zones humides du lac Telamine, des salines d'Arzew et d'Agadire Akehal .....	85
Tableau 29: Dynamique de l'occupation dans les zones Tampons des zones humides du lac Telamine, des salines d'Arzew et d'Agadire Akehal : .....	86
Tableau 30: dynamique dans les zones intermédiaires des zones humides du lac Telamine, des salines d'Arzew et d'Agadire Akehal .....	87
Tableau 31: Dynamique dans la zone centrale de la Sebka d'Oran : .....	89

Tableau 32: dynamique dans la zone tampon de la Sebkha d'Oran : .....	90
Tableau 33: dynamique dans la zone intermédiaire de la sebkha d'Oran : .....	91
Tableau 34: Les superficies totales des différentes catégories d'occupation du sol d'Oran en 2022 et 2037. ....	93
Table 35: Matrice de transition de la dynamique future (2037) de l'occupation du sol d'Oran. ....	93
Tableau 36: Matrice de transition de la dynamique future (2037) de l'occupation du sol d'Oran en pourcentage.....	93
Tableau 37: Dynamique future prédit dans la zone centrale du lac Telamine et salines d'Arzew : .....	95
Tableau 38: Dynamique future prédit dans les zones tampons du lac Telamine et des salines d'Arzew : .....	95
Tableau 39: Dynamique future prédit dans la zone intermédiaire du lac Telamine et saline d'Arzew : .....	96
Tableau 40: Dynamique future prédit dans la zone centrale de la Sebkha d'Oran : .....	98
Tableau 41: Dynamique future prédit dans la zone tampon de la Sebkha d'Oran :.....	98
Tableau 42: Dynamique future prédit dans la zone intermédiaire de la Sebkha d'Oran .....	99



## Liste des figures

Figure 1: Relation entre les conditions hydrologiques, l'environnement physico-chimique et les organismes vivants dans les zones humides (source : wetlands : characteristics and boundaries, NRC, 1995). .....	6
Figure 2: Ensemble des relations entre les caractéristiques des zones humides, les divers types de propriétés qui en découle et leur (d'après Maltby et al., 1994).....	7
Figure 3: carte d'altitude de localisation des zones humides d'Oran. ....	11
Figure 4: la sebkha d'Oran (src : <a href="http://christianpotin.canalblog.com/albums/la_grande_sebkha_d_oran__150_ans_d_amenagement_impossible/index.html">http://christianpotin.canalblog.com/albums/la_grande_sebkha_d_oran__150_ans_d_amenagement_impossible/index.html</a> ). ....	13
Figure 5: les marais de la Macta (src : Ghodbani et Amokrane, 2013). ....	16
Figure 6: le lac Telamine (src : <a href="https://www.aps.dz/regions/81669-zone-humide-de-telamine-oran-un-site-pour-accueillir-les-ornithologues-et-les-visiteurs">https://www.aps.dz/regions/81669-zone-humide-de-telamine-oran-un-site-pour-accueillir-les-ornithologues-et-les-visiteurs</a> ). ....	17
Figure 7: les salines d'Arzew (src : <a href="https://www.vitamedz.com/fr/Algerie/Salines-d-arzew-commune-de-arzew-wilaya-d-oran-51545-Musiques-1.html">https://www.vitamedz.com/fr/Algerie/Salines-d-arzew-commune-de-arzew-wilaya-d-oran-51545-Musiques-1.html</a> ). ....	19
Figure 8: la dayat Morsli (src : <a href="https://www.horizons.dz/zone-humide-dhayat-morsli-oran-150-millions-de-da-pour-sa-protection/">https://www.horizons.dz/zone-humide-dhayat-morsli-oran-150-millions-de-da-pour-sa-protection/</a> ). ....	21
Figure 9: dayat El Bagrat (src : <a href="https://www.vitamedz.com/fr/Oran/lac-sale-de-daiet-el-bagrat-227061-Photos-31-51543-1.html">https://www.vitamedz.com/fr/Oran/lac-sale-de-daiet-el-bagrat-227061-Photos-31-51543-1.html</a> ). ....	22
Figure 10: Dayat Oum Ghellaz (src : <a href="https://www.aps.dz/algerie/tag/Zones%20Humides?start=10">https://www.aps.dz/algerie/tag/Zones%20Humides?start=10</a> ). ....	22
Figure 11: Trois lignées de modèles issues du même modèle de référence (Treuil et al., 2008). ....	41
Figure 12: Processus global de modélisation et de prédiction du changement d'occupation du sol. ....	49
Figure 13: schéma explicatif des étapes de la classification des images satellitaires .....	50
Figure 14: profils spectrales des échantillons pris sur l'eau. ....	56
Figure 15: profil spectral des échantillons des terrains engorgés. ....	56
Figure 16: profil spectral des échantillons des bâtis (équipements, infrastructures, habitas). ....	57
Figure 17: profils spectrales échantillons des forêts (forêts denses, maquis épars et arborés, alfas etc...). ....	57
Figure 18: profil spectral des échantillons de sols nus. ....	58
Figure 19: profil spectral des échantillons de culture. ....	58
Figure 20: Etapes de réalisation de la carte du potentiel agricole d'Oran .....	64
Figure 21: schémas explicatifs des étapes de la réalisation de la carte du potentiel agricole. ....	65
Figure 22: carte d'altitude. ....	65
Figure 23: carte des pentes. ....	65
Figure 24: carte d'hydromorphie .....	65
Figure 25: carte des microtopographies. ....	65
Figure 26: carte du potentiel agricole .....	65
Figure 27: carte des types de sol. ....	65
Figure 28: carte des distances aux routes. ....	65
Figure 29: carte des distances aux zones urbaines. ....	65

Figure 30: carte de distance aux zones humides .....	66
Figure 31: la courbe sigmoïdale de la régression logistique (src : <a href="https://openclassrooms.com/fr/courses/5264666-appliquez-l-apprentissage-statistique-aux-objets-connectes/5361331-passez-de-la-regression-lineaire-a-la-regression-logistique">https://openclassrooms.com/fr/courses/5264666-appliquez-l-apprentissage-statistique-aux-objets-connectes/5361331-passez-de-la-regression-lineaire-a-la-regression-logistique</a> ). ....	67
Figure 32: l'architecture d'un réseau de neurone multicouche (src : <a href="https://bloommagazine.home.blog/2019/02/06/fonctionnement-du-perceptron-multicouche/">https://bloommagazine.home.blog/2019/02/06/fonctionnement-du-perceptron-multicouche/</a> ). ....	68
Figure 33: les processus de conception des deux modèles (CA-Markov-LR ; CA-Markov-MLP) (Nb : les rectangles en noir indiquent les données d'entrées et de sorties, les rectangles en tirets indiquent les différents modules utilisés pour chaque étape et les cercles .....	71
Figure 34: carte d'occupation du sol de 2022.....	76
Figure 35: carte d'occupation du sol de 2022 simulée par le modèle CA-Markov-LR.....	76
Figure 36: carte d'occupation du sol de 2022 simulée par le modèle CA-Markov-LR.....	77
Figure 37: occupation du sol de 1992 de la wilaya d'Oran.....	79
Figure 38: occupation du sol de 2007 de la wilaya d'Oran.....	79
Figure 39: occupation du sol de 2022 de la wilaya d'Oran.....	79
Figure 40: superficie des différentes classes d'occupation du sol entre les trois dates. ....	80
Figure 41: graphes des gains et perte absolue des différentes classes entre 1992-2006. ....	82
Figure 42: graphes des gains et perte absolue des différentes classes entre 2006-2022. ....	82
Figure 43: transition de la superficie des zones humides par rapport aux autres classes entre 1992 -2006. ....	82
Figure 44: transition de la superficie des zones humides par rapport aux autres classes entre 2006-2022. ....	82
Figure 45: transition de la superficie des forêts par rapport aux autres classes entre 1992 - 2006. ....	83
Figure 46: transition de la superficie des forêts par rapport aux autres classes entre 2006-2022. ....	83
Figure 47: transition de la superficie des zones agricoles par rapport aux autres classes entre 1992 - 2006. ....	83
Figure 48: transition de la superficie des zones agricoles par rapport aux autres classes entre 2006 - 2022. ....	83
Figure 49: transition de la superficie des espaces urbains par rapport aux autres classes entre 1992 - 2006. ....	84
Figure 50: transition de la superficie des espaces urbains par rapport aux autres classes entre 1992 - 2022. ....	84
Figure 51: transition de la superficie des sols nus par rapport aux autres classes entre 1992 - 2006. ....	84
Figure 52: transition de la superficie des sols nus par rapport aux autres classes entre 2006-2022. ....	84
Figure 53: occupation du sol autour du lac Telamine des Salines d'Arzew en 1992. ....	85
Figure 54: occupation du sol autour du lac Telamine des Salines d'Arzew en 2007. ....	85
Figure 55: occupation du sol autour du lac Telamine des Salines d'Arzew en 2022. ....	85
Figure 56: dynamique de l'occupation dans les zones centrales du lac Telamine et des Salines d'Arzew. ....	86
Figure 57: dynamique de l'occupation du sol dans les zones tampons du lac Telamine des Salines d'Arzew en 2022. ....	87

Figure 58: Dynamique de l'occupation du sol dans les zones intermédiaire du lac Telamine des Salines d'Arzew en 2022.....	88
Figure 59: occupation du sol autour de la Sebkha d'Oran en 1992.....	89
Figure 60: occupation du sol autour de la Sebkha d'Oran en 2007.....	89
Figure 61: occupation du sol autour de la Sebkha d'Oran en 2022.....	89
Figure 62: dynamique de l'occupation du sol dans la zone centrale de la Sebkha d'Oran en 2022.....	90
Figure 63: dynamique de l'occupation du sol dans la zone tampon de la Sebkha d'Oran en 2022.....	91
Figure 64:dynamique de l'occupation du sol dans la zone intermédiaire de la Sebkha d'Oran en 2022.....	92
Figure 65: carte d'occupation du sol de 2037 simulée par le modèle CA-Markov-MLP.....	92
Figure 66: courbe de gain et perte des différentes classes prédites par le modèle.....	93
Figure 67: Occupation du sol de 2037 autour du lac Telamine et des Salines d'Arzew.....	94
Figure 68: Dynamique de l'occupation du sol prédit d'ici 2037 dans les zones centrales du lac Télamine et des Saline d'Arzew.....	95
Figure 69: Dynamique de l'occupation du sol prédit d'ici 2037 dans les zones tampons du lac Telamine et des Salines d'Arzew.....	96
Figure 70: Dynamique de l'occupation du sol prédit d'ici 2037 dans les zones intermédiaires du lac Telamine et des Salines d'Arzew.....	97
Figure 71: dynamique de l'occupation du sol de 2037 autour de la Sebkha d'Oran.....	97
Figure 72: dynamique de l'occupation prédit d'ici 2037 dans la zone centrale de la Sebkha d'Oran.....	98
Figure 73: Dynamique de l'occupation du sol prédit d'ici 2037 dans la zone tampon de la Sebkha d'Oran.....	99
Figure 74: dynamique de l'occupation du sol prédit d'ici 2037 dans la zone intermédiaire de la Sebkha d'Oran.....	99

## Listes des sigles et Abréviations

CA : *Cellular Automata*

ABM : *Agent Based Model*

**AHP** *Analytical Hierarchy Process*

AUC : *Area Under the Curve*

BIROE

Bureau international de Recherches sur les Oiseaux d'Eau, 24

CE : *Commission Européenne*

CHRIS : *Compact High Resolution Imaging Spectrometer*

CIPO : *Conseil International pour la Protection des Oiseaux*

CTI) : *Coupound Index Topographic*

CZH : *Complexe des Zones Humide*

D.G.F : *Direction Générale des Forêts*

DEM : *Digital Elevation Model*

DN : *Digital Number*

DOS : *Dark object substration*

DSA : *Direction des Services Agricoles*

ERS : *European Remote-sensing Satellite*

ESA : *European Spatial Agence*

ESDAC : *European Soil Data Centre (*

ETM : *Enhanced Thematic Mapper*

FLAASH : *Fast Line of Sight Atmospheric Analysis Hypercubes*

HRG : *High Resolution Geometric*

HRS *Haute Resolution Saptiale*

ICNF : *l'Institut pour la Conservation de la Nature et des Forêts*

JERS : *Japanese Earth Resources Satellite*

LIDAR : *Light Detection and Ranging*

LR : *Logistic Regression*

LULC : *Land Use Land Change*

MD : *Mahalonabis Distance*

ML : *Maximum Likelihood*

MLP : *Multilayer Perceptron*

MNT : *Modèles Numériques de Terrain*

MSS : *Multi Spectral Scanner*

NDVI : *Indices de Végétation*

NDWI : *Indice d'Humidité*

ODD : *Objectifs du Développement Durable*

OLI : *Operational Land Image*

ONG *Oraganisation Non Gouvernementale*

ONU : *Organisation des Nations Unis*

PROBA : *PRoject for On-Board Autonomy*

ROC : *Receiver Operating Characteristic*

S G R : *Sécretariat Général du RAMSAR*

SAM : *Spectral Angle Mapper*

SAR : *Synthetic Aperture Radar*

SIR : *Space borne Imaging Radar, : Shuttle Imaging Radar*

SNAT : *Schema National d'Aménagement du Territoire*

THRS : *Très Haute Résolution Spatiale*

TM : *Thematic Mapper*

TOA : *Top Of Atmosphere*

UA : *Unités Astronomiques*

UICN : *d'Union internationale pour la Conservation de la Nature.*

UNESCO : *Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture*

WWF *World Wildlife Fund*

## Introduction Générale

A partir du 19<sup>ème</sup> siècle notre société a connu un processus d'évolution caractérisé par la transformation des matières premières en produit fini. Ce processus de transformation connu sous le nom de la révolution industrielle s'est accru en puisant davantage dans les réserves d'énergie fossile qui se sont constituées au cours des temps géologiques sous forme de charbon et de pétrole.

Des gisements mis en place lors de la période carbonifère (-360 à -260 millions d'années), dans un environnement planétaire marqué par des écosystèmes « humides », tout d'abord côtier, avec des marais rappelant les swamps des Everglades en Floride (Etats Unis), puis continentaux et occupant de vastes surfaces à flore luxuriante (E. Fustec et all, 2002). Ces zones immergées ou saturées permanemment ou temporairement ont donné des accumulations ahurissantes des débris végétaux et animaux et contribuant à la méthanisation de ces derniers. Cette production naturelle d'énergie fossile constitue la première contribution des zones humides au bien être de l'humanité.

Considérée comme ayant contribué à la sédentarisation et à la naissance des grandes civilisations préindustrielles par leur rôle dans le secteur primaire. Les principales civilisations de notre planète se sont bâties dans le cadre d'une relation particulière avec les zones humides des grands fleuves et des grands lacs. Comme support nourricière indispensable, elles ont été adulées, voir même déifiées. Certaines cosmogonies africaines y placent l'origine du monde à l'instar de la cosmogonie sumérienne (Le Louarn, 1992).

Les zones humides ont régressées d'une manière fulgurante dans la plupart des continents, notamment au 20<sup>ème</sup> siècle, au rythme des progrès technologiques qui causent leurs transformations. La disparition de ces zones a eu au moins le gain de faire savoir leur importance. En effet il est très vite constaté que leurs reculs s'accompagnaient d'un désordre écologique, comme la dégradation de la biodiversité notamment des ressources halieutiques et environnementales, telles-que l'augmentation de la fréquence des crues dévastatrices, la dégradation de la qualité de l'eau et la diminution de réserves hydrauliques continentales.

Le constat de ces impacts négatifs est à l'origine des politiques de mobilisation visant la conservation de ces milieux et des travaux de recherche sans précédent sur ces milieux depuis plus de deux décennies. Les milieux humides sont parmi les écosystèmes les plus productifs qui existent à travers la planète. Cependant, ces écosystèmes sont parmi les plus menacés en raison des perturbations humaines. Malheureusement, une fois qu'un milieu humide est perturbé, il est difficile de le ramener à son état naturel (Tiné, 2018).

L'Algérie n'en fait pas exception, un pays continent qui compte, entre autres, 2300 milieux humides dont 50 sont classés d'importance mondiale. L'Algérie se classe donc parmi les principaux pays abritant le plus de zones humides à l'échelle continentale et internationale. La Wilaya d'Oran compte 10 zones humides jouissant d'écosystème exceptionnel mais souffrant de plus en plus d'un équilibre fragile et d'une dégradation inquiétante de leur écosystème. Ainsi, le besoin serait vital de modéliser les changements dans ces milieux humides, de façon à comprendre la tendance des changements et à en prédire les états futurs.

Par ailleurs, la complexité autour des dynamiques de changement dans les milieux humides peut être appréhendée par l'utilisation d'outils de modélisation et de simulation spatiotemporelle pour aider à la conservation de l'environnement. Les approches de modélisation des systèmes complexes, telles que les automates cellulaires combinés à des modèles statistiques, nous permettent de simplifier ces complexités et de comprendre les modèles émergents de systèmes complexes, tels que les milieux humides.

Quelle serait la faisabilité de caractériser la dynamique des zones humides dans la Wilaya d'Oran, et comment l'exploiter dans un modèle prédictif afin d'aider à préserver les écosystèmes humides.

Notre étude se penchera sur cette problématique en essayant de répondre aux questions :

- Comment caractériser les changements dans l'étendue de ces zones humides ?
- Comment inclure cette dynamique dans un modèle inductif spatiotemporel ?
- Quelle utilité pour cette modélisation d'appliquer un processus d'apprentissage automatique à base de chaînes de Markov et d'automate cellulaire ?
- Comment prédire et interpréter les changements futurs en vue de préserver l'écosystème dans ces milieux humides ?

Cette étude propose donc la simulation des milieux humides basée sur les modèles hybrides par régression logistique, chaîne Markov, les perceptrons multicouches et les automates cellulaires (**CA-Markov-LR, CA-Markov-MLP**) afin de projeter des scénarios futurs de la distribution des milieux humides dans la Wilaya d'Oran ainsi que leurs états. Les étapes suivantes seront suivies afin d'atteindre notre objectif :

- Premièrement, on essaiera de faire un état des lieux des zones humides d'Oran en faisant un diagnostic des systèmes complexes intervenant dans la dynamique de ces zones humides tout en relevant les caractéristiques et les activités connexes liées à ces zones humides.
- Deuxièmement, on travaillera sur des images satellitaires couvrant les zones à trois dates différentes sur des intervalles de 15 ans. On choisira les images prises en trois temps : 1992, 2007 et 2022. On procédera par le traitement et l'apprentissage des images des deux premiers temps avant d'en réaliser une classification supervisée. On choisira cinq (5) classes qui sont les *plans d'eau, la forêt, les terres cultivées, les agglomérations, et les terres libres (sols nus)*. La matrice de transition résultante du croisement des différentes classifications nous permettra de comprendre la distribution des classes entre les deux périodes et de calculer les probabilités de transition de chaque classe vers une autre par la méthode de la régression Logistique ou par les perceptrons multicouches.
- Troisièmement, on simulera la dynamique par modélisation des changements observés entre 1992, 2007 et 2022 et comptabilisés par des probabilités de transition obtenues par automates cellulaires et les chaînes de Markov. La validation de la classification obtenue sera réalisée en se référant à l'année 2022. Le calibrage du modèle doit être mené minutieusement pour ce processus de validation
- Cette simulation sera comparée à celle de la classification de 2022 que nous avons classifiée lors de la première étape afin de voir s'il y a nécessité de calibrer le modèle par la suite le valider.

- Quatrièmement, on fera une comparaison des deux modèles conçu afin de choisir, celui qui a donné le plus de précision avec la prédiction de 2022.
- Cinquièmement, on fera une simulation de la distribution spatiale des zones humides pour l'année 2037 sur la base du modèle qui a été choisi.
- La dernière étape sera l'interprétation des résultats pour la projection de 2037.

Ce manuscrit résume notre étude en organisant ses chapitres comme suit : Après la présente introduction, le premier chapitre dresse l'état des lieux des zones humides à l'échelle mondiale mais aussi en Algérie et dans la Wilaya d'Oran. Le deuxième chapitre explore les approches de modélisation à base de télédétection et d'analyse spatiotemporelle dans les zones humides. Les aspects de modélisation et la méthodologie suivie, du prétraitement à la validation à la prédiction, seront décrits dans le troisième chapitre. Nous discutons les différents résultats dans le quatrième chapitre avant de conclure.



**Chapitre I: Zones humides, cadre théorique  
et état des lieux en Algérie**

# **I. Zones humides, cadre théorique et état des lieux en Algérie**

## **I.1. Introduction**

Situées à l'interface entre l'eau et la terre, la richesse et la diversité de ses zones humides sont aujourd'hui reconnue de tous (Fustec et Lefeuvre, 2000; Maltby et Barker, 2009; Mitsch et Gosselink, 2007). Ces zones font maintenant l'objet de plusieurs types de pression exercées sur leurs écosystèmes, principalement anthropique ((Turner, 1992). En effet le drainage important des ressources hydriques de ses zones au profit de l'agriculture et de l'urbanisation a contribué non seulement à la dégradation de la biodiversité mais à l'accélération du transfert des matières dans les hydro-systèmes, dont les conséquences sont la pollution et l'eutrophisation des cours d'eau (Acreman et McCartney, 2009).

Ce chapitre, dresse un cadre théorique des zones humides tout en identifiant sa portée à l'échelle mondiale et en Algérie. Un état des lieux de ces zones dans la Wilaya d'Oran sera établi en vue de mettre en évidence les pressions et les menaces qui pèsent sur elles. En dernier, le chapitre recense les organismes et les aspects juridiques qui régissent et protègent ces zones humides.

## **I.2. Cadre théorique des zones humides**

Les zones humides sont définies comme des étendues saturées d'eau ou inondées, temporairement ou en permanence. Elles sont classées en trois grandes catégories **les zones humides intérieures, les zones humides côtières et les zones humides Artificielles**. Les zones humides intérieures comprennent les aquifères, les lacs, les cours d'eau, les marais, les tourbières, les étangs, les plaines d'inondation et les marécages. Les zones humides côtières comprennent les littoraux, les mangroves, les marais salants, les estuaires, les lagunes et lagons, les herbiers marins, les récifs coralliens et autres zones marines dont la profondeur n'excède pas six mètres à marée basse. Les zones humides artificielles telles que des étangs agricoles, des terres agricoles irriguées, des sites d'exploitation du sel, des zones de stockage de l'eau, des gravières, des sites de traitement des eaux usées et des canaux etc.... (Convention RAMSAR, 1971).

### **I.2.1. Portée mondiale**

Jusqu'à ce jour aucun organisme ou chercheur n'a affirmé avec exactitude la superficie globale des zones humides dans le monde. Cependant les études menées par certains d'entre eux ont révélées des estimations plus ou moins plausibles et acceptables dans le monde scientifique. Le Centre mondial de surveillance continue de la conservation de la nature du PNUE (PMUE-WCMC) propose une estimation d'environ 570 millions d'hectares (5,7 millions km<sup>2</sup>) soit à peu près 6% de la superficie émergée de la planète.

Mitsch et Gosselink, dans leur ouvrage de référence *Wetlands*, 4e éd. (2007), proposent 4% à 6% de la superficie émergée de la Terre. Les mangroves couvrent environ 240 000 km<sup>2</sup> de zones côtières et il resterait, dans le monde, 600 000 km<sup>2</sup> de récifs coralliens. Toutefois, une étude globale des ressources en zones humides soumise à la COP7 de Ramsar en 1999, tout en affirmant : « il n'est pas possible de fournir un chiffre acceptable de la superficie des zones humides à l'échelle mondiale », donnait une estimation mondiale minimale de 748 à 778 millions d'hectares. Le même rapport indiquait qu'en tenant compte d'autres sources

d'information, il est possible de porter ce « minimum » à un total de 999 millions à 4 milliards 462 millions d'hectares. Les écosystèmes des zones humides d'Afrique sont estimés à plus de 131 millions d'hectares.

Les zones humides sont parmi les milieux les plus productifs dans le monde. Leurs écosystèmes fournissent un large éventail de biodiversité et favorisent la productivité primaire dont un nombre incalculable d'espèces de plantes et d'animaux dépendent pour leur survie. Elles entretiennent de fortes concentrations d'oiseaux, de mammifères, de reptiles, d'amphibiens, de poissons et d'invertébrés et sont aussi des greniers importants de matériel génétique végétal. Le riz, par exemple, qui est une plante commune des zones humides, est à la base de l'alimentation de plus de la moitié de l'humanité.

En plus de leur productivité faunique et floristique, les interactions entre les éléments physiques, biologiques et chimiques tels que les sols, l'eau, les plantes et les animaux, permettent à une zone humide de remplir de nombreuses autres fonctions vitales. En particulier, elle favorise le stockage de l'eau, la protection contre les tempêtes, la maîtrise des crues, la stabilisation du littoral et la maîtrise de l'érosion, le renouvellement de la nappe phréatique, la restitution des eaux souterraines, l'épuration de l'eau, la rétention des éléments nutritifs, des sédiments et des polluants ; et la stabilisation des conditions climatiques locales.

## I.2.2. Caractéristiques des zones humides

Les caractéristiques des zones humides sont déterminées en fonction de leur localisation, de leurs conditions climatiques et de leur contexte géomorphologique. Les zones humides situées sur les littoraux des cours d'eau intérieurs se différencient de celles qui longent les côtes maritimes, de celles situées en position sommitale ou sur les plaines inondables (Fustec et al., 2002). Leurs morphologies et leurs configurations dépendent de la nature des roches encaissantes et des conditions de leur genèses.

Les écosystèmes des zones humides sont les lieux d'interaction entre les grands ensembles qui les composent : l'eau, le sol (sédiments) et les organismes vivants (faune, flore). Le volume et la composition de chacun de ces éléments, les processus qui permettent les échanges au sein de l'écosystème, de même que la nature et l'amplitude des échanges entre la zone humide et son environnement dépendent étroitement du contexte géomorphologique et climatique, mais c'est avant tout les conditions hydrologiques qui déterminent le fonctionnement écologique des zones humides.

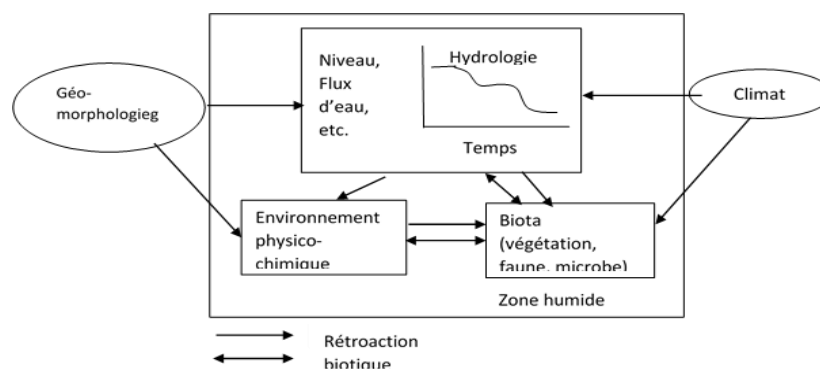


Figure 1: Relation entre les conditions hydrologiques, l'environnement physico-chimique et les organismes vivants dans les zones humides (source : *wetlands : characteristics and boundaries*, NRC, 1995).

### I.2.3. Fonctions des zones humides

Le maintien d'un écosystème dépend d'un ensemble d'opérations (ou processus) effectués par ses différents composants et qui permet la manifestation de fonctions ». Les fonctions font référence à la structure et aux processus des zones humides qui dépendent des contraintes géomorphologiques et hydrologiques (Frontier et Pichod, 1993).

D'une manière générale le terme fonction fait référence aux services rendus et aux valeurs apportées par les zones humides aux sociétés. Les bienfaits apportés par les zones humides à la société peuvent être de deux types : les bénéfiques environnementaux, associés aux services, et les produits économiques, associés aux valeurs (Maltby, 1994). Le rapport de l'ONU « Millennium Ecosystem Assessment » de 2005 précise que les fonctions écologiques ne peuvent être dissociées des services qu'elles procurent à la société. Il souligne le coût financier provoqué par les dégradations des milieux naturels.

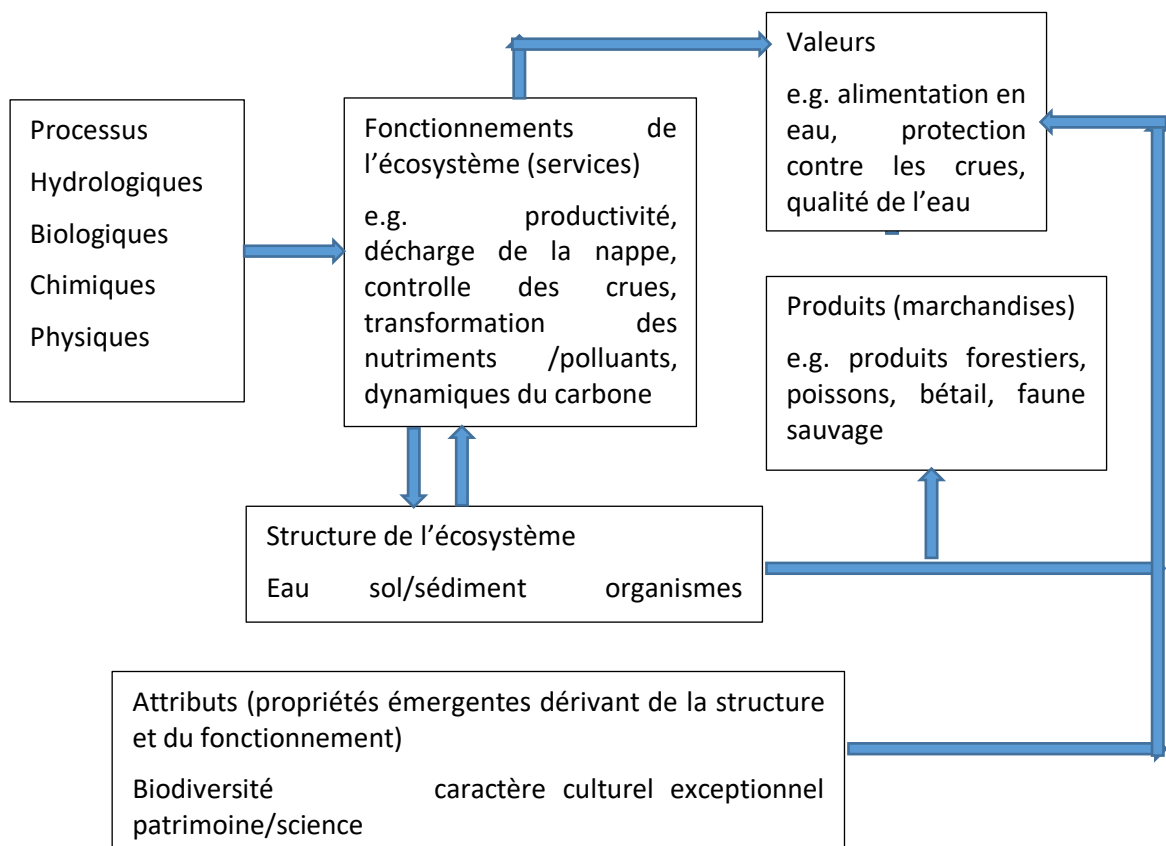


Figure 2: Ensemble des relations entre les caractéristiques des zones humides, les divers types de propriétés qui en découlent et leur valeur (d'après Maltby et al., 1994).

Depuis des millénaires, différentes fonctions des zones humides ont été identifiées et exploitées par différentes sociétés à travers le monde. Leur principale fonction reconnue de tous est leurs capacités de retenir les éléments nutritifs et à produire en abondance ou à abriter de nombreuses espèces végétales et animales. C'est au cours des années soixante que les scientifiques se sont mobilisés avec des associations de protection de la nature pour contrecarrer les nombreux projets qui visaient l'assèchement de vastes superficies de zones humides ou qui étaient susceptibles de les dégrader de façon dramatique (Barnaud, 1998).

Le premier inventaire des fonctions exercées par les zones humides a été réalisé au début des années quatre-vingt par Adamus et Stockwell (1983) dans le cadre de recherche engagé par le ministère des Transport au Etats-Unis pour la mise au point d'une méthode d'évaluation de ces fonctions. Adamus et Stockwell (1983) ont mené un travail de recherche bibliographique en collectant des données très fragmentaires sur les zones humides pour établir onze (11) fonctions des zones humides dont la validité et l'importance a été reconnue dans le monde scientifique. Ces fonctions ont été établies de la manière suivante :

- Recharge des eaux souterraines,
- Décharge des eaux souterraines,
- Stockage des crues et désynchronisation,
- Stabilisation des rivages et dissipation des forces érosive,
- Rétention des sédiments,
- Rétention et l'élimination des nutriments,
- Soutien de chaines trophiques,
- Habitat pour les poissons,
- Habitat pour la faune sauvage,
- Récréation active,
- Récréation passive et valeur patrimoniale

Les auteurs ont recensé soixante-quinze caractéristiques physico-chimiques et biologiques qui se corrèlent à un certain niveau pour que chaque fonction puisse être remplie par une zone humide. Ces fonctions étant complexes tant par les agents qui les génèrent que par leurs processus de fonctionnement qui fait intervenir différentes disciplines connexes pour leurs compréhensions, il s'est avéré nécessaire de regrouper ces fonctions en différentes catégories pour faciliter leur appréhension tant par les scientifiques de différentes disciplines que par les nombreuses institutions impliquées dans la protection des zones humides. En effet les différentes fonctions des zones humides sont réparties suivant leurs :

- **Fonctions hydrologiques/vis-à-vis du régime des eaux** : contrôle des crues, recharge/ décharge des nappes, dissipation des forces érosives etc....
- **Fonctions biogéochimiques/ d'épuration/ vis-à-vis de la qualité des eaux** : rétention des sédiments, rétention et élimination des nutriments et des contaminants, dynamique du carbone etc....
- **Fonctions d'habitats/ régulation des chaines trophiques/ressources** : productivité primaire, poisson, faune sauvage, ressource agricole etc....
- Fonctions de récréation, d'éducation, culturelles etc.... (Fustec et al., 2002)

*Tableau 1: Les fonctions des zones humides, leurs effets, les valeurs socio-économiques correspondantes et les indicateurs permettant de les évaluer (in Barnaud et Mermet, 1996, d'après NRC, 1995).*

Fonctions	Effets	Valeurs socio-économiques	Indicateurs
<b>Hydrologiques</b>			
Stockage de l'eau de surface à court terme	Réduction des pics d'inondation en aval	Réductions des dommages liés aux inondations	Présence de plaine d'inondation le long des corridors fluviaux

Stockage de l'eau de surface à long terme	Maintien de flux de base, répartition saisonnière des flux	Maintien des habitats pour les poissons en période sèche	Topographie de la plaine d'inondation
Maintien d'un niveau de la nappe	Maintien des communautés d'hydrophytes	Maintien de la biodiversité	Présence d'hydrophytes
<b>Biogéochimiques</b>			
Transformation, recyclage des éléments	Maintien de stocks de nutriments dans la zone humide	Production de bois	Croissance des arbres
Rétention, élimination de substances dissoutes	Réduction du transport de nutriments en aval	Maintien d'une eau de qualité	Sorties de nutriments inférieures aux entrées
Accumulation de tourbe	Rétention de nutriments, métaux, autres substances	Maintien d'une eau de qualité	Augmentation de la profondeur de tourbe
Accumulation de sédiments inorganiques	Rétention de sédiments et de certains nutriments	Maintien d'une eau de qualité	Augmentation de la profondeur de sédiments
<b>Fourniture d'habitats et de réseaux trophiques</b>			
Maintien de communautés végétales caractéristiques	Nourriture, reproduction de la faune	Production d'animaux à fourrure et d'oiseaux d'eau	Végétation mature de zone humide
Maintien de flux d'énergie caractéristique	Développement de population de vertébrés	Maintien de la biodiversité	Forte diversité de vertébrés

### I.3. Les Zones humides en Algérie

L'Algérie, un pays de l'Afrique septentrionale, avec une superficie de 2 381 741 km<sup>2</sup>. Elle est limitée à l'est par la Tunisie et la Libye, au sud par le Niger et le Mali, au sud-ouest par la Mauritanie et à l'ouest par le Maroc. Du point de vu orographique le pays est divisé en trois grandes régions : le tell au Nord (1 200 km de long et de 100 à 200 km de large) Caractérisé par un climat méditerranéen avec une précipitation moyenne supérieure à 700 mm par an et pouvant atteindre les 1000 mm sur les zones sommitales et autour de 400 mm sur les hautes plaines ; les hauts plateaux au centre, sont caractérisés par un climat semi-aride avec des précipitations moyennes annuelle avoisinant les 200 à 300 mm/an. La dernière région représente le Sahara au Sud, qui couvre 85% du pays et correspond à la partie la moins arrosée du pays avec des précipitations moyennes n'atteignant pas les 100 mm /an. Avec un bilan hydrique avoisinant les 15 milliards de m<sup>3</sup> d'eau, qui sont drainées par l'ensemble des oueds du pays, l'Algérie recèle un nombre important des zones humides réparties sur l'ensemble de son territoire et dont l'inventaire ne cesse de grimper au fil des ans.

Le dernier inventaire des milieux humides réalisés par la direction Générale des forêts avec l'appui financier du Fond Mondiale pour la Nature (WWF) a révélé l'existence de 2300 zones humides en Algérie dont 50 classées comme sites d'importance internationale sur la liste Ramsar. Cette convention a été ratifiée par l'Algérie en 1982 par la signature du **Décret N° 439-82 du 11 Décembre 1982**. Ce nombre important des zones humides place l'Algérie parmi les principaux pays abritant le plus de zones humides à l'échelle continentale et internationale.

En effet, l'inventaire fait par la Direction Générales des Forêts en 2004, avait classés 42 zones humides dans la convention Ramsar représentant une superficie de près de trois (3) millions d'hectares. Néanmoins, ces zones classées ne représentent que 50% de la superficie totale des milieux humides du pays, faisant ainsi de l'Algérie le troisième pays en Afrique. Il faut citer bien sûr le Botswana et son fameux Delta de l'Okavango qui fait 6.8 millions d'hectares et la Tanzanie avec 3.5 millions d'hectares. Par ailleurs, l'Algérie est classée huitième à l'échelle mondiale après le Canada (13 millions d'ha), la Russie (10,3 millions d'ha), l'Australie (5.2 millions d'ha), le Brésil (4,5 millions), le Pérou (2,9 millions) et les deux pays africains précédents, le Botswana et la *Tanzanie* (Rapport S.N.G.E.Z.H.A , 2016).

Notre étude s'intéresse particulièrement aux zones humides de la wilaya d'Oran en essayant de déterminer et d'expliquer les facteurs qui régissent leurs dynamiques et leurs évolutions dans le temps et dans l'espace.

### **I.3.1. Les zones humides de la wilaya d'Oran**

La wilaya d'Oran est bordée à l'est par la wilaya de Mostaganem, au sud-est par celle de Mascara, au sud-ouest par celle de Sidi Bel Abbès et à l'ouest par celle d'Aïn Témouchent.

Du point de vue orographique, Oran se caractérise par quatre grandes unités géomorphologiques : l'Atlas tellien, le mont de tessala, les plateaux littoraux et sublittoraux.

**La chaîne tellienne côtière** se caractérise par de petits massifs tel que le murdjadjo et la montagne des Lions avec des bassins littoraux et sublittoraux assez vastes tels que bousfer et Beni saf qui séparent des djebels (Tlemcen et Saïda) ayant des altitudes avoisinant les 1500 m.

Le mont Tessala, s'étendant du sud au sud-ouest d'Oran sur une centaine de kilomètres de longueur entre la basse Tafna et l'oued Tlalat. Ils s'allongent au-dessus des collines d'Aïn Témouchent et de la plaine de la Sebkhâ d'Oran au nord, dominant le cours du bas Issers et la plaine de Sidi Bel Abbès au sud.

Le climat de la zone d'étude est de type semi-aride avec une précipitation moyenne annuelle de 348,48 mm/an. Les températures estivales et hivernales moyennes sont respectivement de 25 °C et de 11 °C. Les saisons sèches s'étendent de 6 mois (avril à septembre).

Grâce à son climat méditerranéen de type semi-aride et ses facteurs geomorpho-structurel, la wilaya d'Oran recèle des zones humides qui regorgent des écosystèmes endémiques. Les zones humides méditerranéennes sont classées parmi les écosystèmes les plus riches de la planète (Médail et Quézel, 1999).

Ainsi dix (10) zones humides ont été inventoriées à Oran par la direction générale des forêts répertoriées dans le tableau ci-dessous. La grande sebaka d'Oran, les marais de la Macta, les salines d'Arzew et le lac Télamine sont classées dans la liste Ramsar.

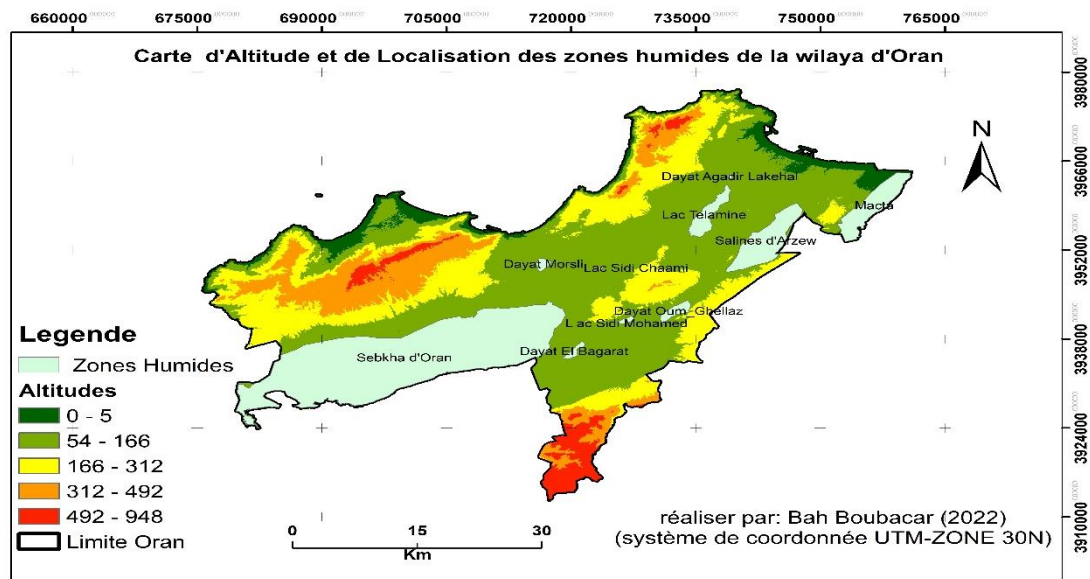


Figure 3: carte d'altitude de localisation des zones humides d'Oran.

Ces complexes de zones humides de la wilaya d'Oran ont des écosystèmes différents d'une zone à une autre en fonction de certains facteurs naturels ou anthropiques déterminant ainsi leurs dynamiques et leur évolution dans le temps et dans l'espace.

Tableau 2: les zones humides inventoriées à dans la wilaya d'Oran.

Noms du site	Dairas	Communes	Superficies (ha)	Classées site Ramsar
Les marées de la Macta	Béthioua, Sig, Stidia	Bethioua	45000	2001
Lac Telamine	Gdyel	Gdyel	2399	2004
Les Salines d'Arzew	Bethioua	Bethioua	5800	2004
Grande Sebkhha d'Oran	Boutelis	Misserguine	56870	2001
Dayat Oum Ghellaz	Oued Tlélat	Oued Tlélat	300	
Dayat el Bagart	Oued Tlelat	Tafraoui	200	
Dayat Morsli	Sénia	Sénia	150	
Lac Sidi Chami	Sénia	Sidi Chami	16	
La zone de Ghadir Lakehal	Gdyel	Gdyel	27	
Lac de Sidi Mohamed	Oued Tlelat	El Braya	60	



### ***1.3.1.1. La grande sebkha d'Oran***

La sebkha d'Oran, une dépression endoreïque qui s'étend sur une superficie de 56870 ha au sud d'Oran à 110 mètres d'altitude, limitée au Nord par le massif du Mardjadjo dont l'altitude maximale est de 589 mètres, au Sud par le massif de Tessala dont l'altitude maximale est de 1061 mètres. Avec l'accumulation des sédiments alluvionnaires par le biais de l'érosion sur son lit, la Sebkha d'Oran a une profondeur de 80 mètres avec une dysémetrie dans sa partie orientale.

Par contre au niveau de la sebkha d'Oran, le climat présente une certaine contradiction, il est du type méditerranéen au point de vue écarts de précipitations journaliers et saisonniers, mais de caractère steppien au point de vue de la température moyenne, de la hauteur annuelle de pluie et de la répartition saisonnière des précipitations, il est la résultante d'un climat littoral méditerranéen et d'un climat désertique d'abri (SOLETANCHE, 1950).

L'écoulement moyen s'évalue à 260 mm/an dans les Tessala, alors que dans le Mardjadjo il est de l'ordre de 220 mm/an sur la crête. Nous avons plus de 100 mm/an en moyenne, aux endroits les plus bas, et 20 à 30 mm/an pour les terrains cultivables et 15 à 20 mm/an pour les plaines les plus arides.

La structure géomorphologique du Tessala est peu compacte avec une perméabilité de 2 à 3 mètres de profondeur, défavorable à l'écoulement par contre celle du Mardjadjo favorise l'écoulement des eaux de pluie. Ainsi le ruissellement moyen atteignant la sebkha est évalué à 30 ou 35 hm<sup>3</sup>/an et l'évaporation moyenne est du même ordre. L'apport annuel à la sebkha est évalué à 500 ou 600 hm<sup>3</sup>, soit en moyenne 0,15 m d'eau sur 4000 km<sup>2</sup> (Kacem, 2006).

Les accumulations de sel dans les sebkhas sont dues à la concentration des solutions roches évaporitiques dans les eaux de ruissellement par l'action érosive.

Dans les monts de Tessala des formations évaporitiques s'intercalent dans la série stratigraphique. Ce sont des formations gypso-salines associées à des bancs d'argiles ou de marnes, eux aussi imprégnés de sel à l'état diffus ou lardés en inclusion. Cette association évaporites-Marnes ou argiles est fréquente, elle est dû à la solubilité des évaporites, qui fait qu'elles ont été dissoutes dans les roches perméables alors qu'elles ont été dissoutes dans les roches imperméables (G. Gaucher, S. Burdin, 1974).

De ce fait la salinisation des eaux de la Sebkha provient des roches évaporitiques affleurant le mont de Tessala, par contre l'évaporation lente des eaux de la Sebkha durant la période sèche met en évidence les couches de sel de quelques centimètres. Actuellement les formations gypso-salines en relief continuent à saler les plaines situées en contrebas, par les sédiments salés qu'ils fournissent aux eaux de ruissellement et par la salure qu'ils communiquent aux eaux qui sont entrées en contact avec eux (Hassani, 1987).

Durant la période sèche, la déflation exercées sur les formations à texture fine (sels) entraîne les floculations d'argiles en petits agrégats fait de microcristaux et des particules détritiques sur le long des rives ainsi que sur les plaines. Ce processus forme un horizon de structure granulaire de quelques centimètres d'épaisseur. Le lessivage par dissolution des sels libère les matières insolubles. L'accumulation continue de cet horizon entraîne la formation des bourrelets éoliens d'argile, de limon et de sable fin, le long de la rive sous le vent. Ces formations connues aussi sous le nom de « lunette » peuvent atteindre des

dizaines de mettre. Repérées et expliquées pour la première fois en Australie, elles ont été étudiées depuis autour des playas américaines, et des sebkhas algériennes et tunisiennes où les plus importantes d'entre elles représentent des édifices construits au cours du dernier inter pluvial (Kacem, 2006).

Dans la partie Sud de la Sebkha s'étend la plaine de Mleta, elle est prolongée au sud-Est par la plaine de Mafak et celle de Tameira au Sud-Ouest. Les plaines de la Mleta et de Maflak présentent à l'affleurement des alluvions récentes attribuées à l'Holocène. La Plaine de Tameira présente quant à elle des alluvions anciennes attribuées au Pléistocène (Benziane, 2013).

Les sols de la Sebkha correspondraient à des marnes parfois argileuses parfois calcaires, contenant en poids 20% d'eau ; 3 à 10% de gypse et 12 à 15% de Chlorure de Sodium (NaCl) ; par contre le pourcentage des sables est négligeable sauf au débouché de quelques oueds (Soletanche, 1952).

L'écosystème de la Sebkha d'Oran recèle une diversité d'espèce floristique sur les plaines qui l'enclavent contrairement à la dépression endoreïque qui est dépourvue de flore halophyte ou d'hydrophyte. Les espèces halophytes rencontrées sur les plaines sont généralement des pins d'Alep, des eucalyptus, des chênes lièges et des cèdres. Le site accueille de nombreuses espèces migratrices, en particulier des flamants et autres échassiers qui fréquentent les zones humides très peu profondes. La population de flamants roses *Phoenicopterus roseus* et de tadornes de Belon *Tadorna tadorna* dépasse le seuil de 1 % (Direction Générale des Forêts, 2001). A titre indicatif 1860 Tadornes de Belon ont été recensés en 1999 et 7220 flamants rose en 2000 selon le rapport de la Direction Générale des Forêts.



*Figure 4: la sebkha d'Oran (src : [http://christianpotin.canalblog.com/albums/la\\_grande\\_sebkha\\_d\\_oran\\_150\\_ans\\_d\\_aménagement\\_impossible/index.html](http://christianpotin.canalblog.com/albums/la_grande_sebkha_d_oran_150_ans_d_aménagement_impossible/index.html)).*

### ***1.3.1.2. Les marais de la Macta***

Les marais de la Macta sont situés à l'aval du bassin versant de la Macta au nord-ouest de l'Algérie, qui s'étend sur une superficie de 14000 km<sup>2</sup> avec une population de 1 231 824 habitants en 1998 et de 1 724 905 habitants en 2008. En 2015 on estimait 262536 hbts vivant dans les périphéries des zones humides avec une 5,89 hbts/km<sup>2</sup>. Le bassin de la Macta

est limité au Nord-Ouest par les chaînes montagneuses du Tessala au Sud par les hauts plateaux de Maalif à l'Ouest par les plateaux de Telagh et à l'Est par les monts de Saïda. Le bassin versant de la Macta est drainé par trois cours d'eau important: Oued EL Hammam, Oued mekkerra et Oued Saïda.

Les marais de la Macta sont les lieux de confluence de différents cours d'eaux du bassin de la Macta dans une dépression triangulaire qui s'étend sur une superficie de près de 45000 ha. Cette dépression est limitée au Nord par un cordon dunaire, au Nord-Ouest par la Sebkha d'Arzew et au Nord-Est par les retombés du plateau de Mostaganem. Sur le plan administratif, la wilaya de Mascara possède la plus grande partie des marais et le reste est réparti entre la wilaya d'Oran et celle de Mostaganem.

Le réseau hydrographique de la Macta est constitué de plusieurs cours d'eaux : oued Tankara, oued Oggaz, oued Krouf, oued Mellah, oued Sig, oued Habra et oued Tinn. Trois grands oueds drainent la Macta : oued sig, qui traverse la zone sur une distance de 23, 43 km, l'oued Habra, c'est la plus important dont la distance est de 30,51 km et l'oued Tinn qui est drainé sur une distance de 13,61 km (Meghrabi, 2017). Caractérisé par un climat semi-aride, la région a reçu en moyenne dans les deux dernières décennies 300 à 400 mm de pluie par an (Agence de Bassin, 2009). La moyenne des précipitations sont violentes et tombent entre octobre et Avril.

La dépression des marais de Macta s'inscrit dans la continuité d'une série de dépression synclinale qui s'étend de Miliana à Oran. Cette dépression est constituée de quatre formations géologiques :

- Le quaternaire continentale qui couvrent une superficie de 43690 ha soit 98,18% de la dépression des marais ;
- Le pliocène continental et marin avec respectivement 601 ha et 153,64 ha soit un pourcentage respectif 1,35 et 0,35 % de la superficie des marais ;
- Le calabrien qui représente 0,12% de la dépression des marais avec une superficie 55, 36 ha.

Les formations géologiques datent du mécanisien et sont responsables de la salinisation des plaines sublittorales de l'Oranie, une autre source de salinisation est l'évaporation de la lagune que constitue la plaine de Habra, après l'effondrement de la Thyrréide et la transgression préflandrienne qui a de nouveau rempli d'eau de mer, la grande dépression (Tinthoin, 1948).

Sur le plan pédologique le terrain est composé de sol humifères au niveau de la zone dunaire littorale et sublittorale ; de sol alluviaux où domine la texture argileuse au niveau des plaines et de solontchaks (sol salin) et solonetz pour le reste de zone humide (Gaucher et Simonneau, 1951).

D'un point de vue hydro-écologique, trois grandes zones homogènes peuvent être identifiées : la zone des marais (10000 ha), la zone de végétation naturelle et la zone des cultures (Sitaybe et al., 2008).

La première zone aussi appelée zone centrale, Elle englobe les terre submergé temporairement ou permanemment, il s'agit des mares des marais des basses plaines, des embouchures, des bras d'oueds, des méandres, des lacs salés ou des sebkhas.

La deuxième zone correspond à la zone tampon, moins humide, elle est le support d'une flore halophile, dont Atriplex et Salsola. Des groupements de salsolacées annuelles,

considérées comme rares en Afrique du Nord, ont été recensées. On y trouve *Salicornia europea*, extrêmement rare en Afrique du Nord et en Algérie en particulier, ainsi que *Spergularia Doumerguaei*, endémique de l'Oranie littorale (P. SIMONEAU et P. QUÉZEL, 1960).

Les analyses entreprises par Megharbi ont permis de recenser 14 espèces endémiques présentes dans la zone humide. Ces endémiques sont réparties en trois catégories : endémique Algérienne, endémiques algéro-marocaine, endémiques algéro-tunisienne mais les endémiques locales sont les plus nombreuses (Megharbi, 2017).

En plus d'une diversité floristique la zone tampon et centrale sont des lieux d'habitats pour diverses espèces faunistiques en raison de la rétention de l'azote et du phosphore aminé par la végétation qui favorisent le développement de certains microorganismes et champignons dont dépend le règne animal. 47 espèces d'oiseau d'eau dont 17 limicoles, 11 espèces marines et 16 espèces de rapaces ainsi que de nombreuses espèces terrestres telles que l'Outarde canepetière et la sarcelle marbrée considéré comme rare. La nidification de certaines espèces a été confirmée, par le passé, comme la Sarcelle marbrée et le Tadorne casarca. L'Outarde canepetière ainsi que le flamant Rose sont présents toute l'année (Ledant et al, 1981).

Les invertébrés et les poissons comme l'anguille (*Anguilla anguilla*), la carpe (*Cyprinus carpio*), le barbeau (*Barbus sp.*) et la gambuse (*Gambusia affinis*) et de nombreux amphibiens et reptiles sont également présents (Ghodhani et Amokrane, 2013).

La troisième zone est celle de la zone de transition où les populations locales pratiquent des activités socio-économiques telles que la céréaliculture, les cultures maraîchères et l'arboriculture, qui couvrent maintenant les terrains asséchés et défrichés au début du siècle dernier. La première couvre la superficie la plus importante estimée à 14113 ha ensuite vient l'arboriculture qui occupe une aire de près de 8819 ha (DSA ,2015).

En plus de l'agriculture, le pastoralisme tient une place importante dans l'économie de la population rurale agglomérée autour de la Macta. L'élevage des bovins est considéré comme le plus important avec un cheptel de 50 000 tête d'ovins détenu par une population nomade (environ 200 personnes) des régions du sud de l'Oranie, fréquente régulièrement la plaine de la Macta (Direction de l'Agriculture, 2009). L'élevage des caprins et des bovins y est pratiqué aussi mais reste considérablement minime par rapport à celui des ovins. Ces trois zones ne fonctionnent pas indépendamment, mais en interactions, ce qui fait l'originalité de cet écosystème.



*Figure 5: les marais de la Macta (src : Ghodbani et Amokrane, 2013).*

### *1.3.1.3. Le lac Telamine et les zones de Ghedir Lakehal*

Le lac Telamine est une dépression endoreïque de forme elliptique formé de trois cuvettes, situé dans la commune de Gdyl. Il est limité au Nord par la route nationale N13 et les agglomérations de Gdyl, de Hassi Mefsoukh et d'El Ayaida, au Nord-Ouest par les retombées de la Monagne des lions, de l'Ouest au Sud par la route wilayale W41 et par les Agglomérations de Hassi Ben Okba, de Benfreha et de Bouafatis et à l'Est par la route Nationale N11 et les hauteurs dominantes de la colline le séparant des Salines d'Arzew. Le plan d'eau du lac couvre une superficie d'environ 2399 ha avec un périmètre d'environ 20 km. Le lac est bordé par la plaine de Télamine, qui sert pour l'agriculture et le pâturage. La dépression du lac Telamine est le plus vaste bassin fermé du plateau d'Oran, après celui occupé par la Sebkhia d'Arzew (Dubuis, Simonneau, 1960).

Classé depuis 2004 comme site international à protéger dans la liste Ramsar, le lac Telamine a une longueur d'environ de 8,5Km et une largeur qui varie entre 0,5 et 1,5 Km. Le lac de Télamine occupe une superficie de 2399 ha et un périmètre de 20Km.

En 1948, le lac était constitué de deux mares nettement séparées, dont l'une de 2 ha est la dayat de Fleurus près de Legrant et l'autre environ 6 ha près de Saint-Cloud (Dubuis et Simonneau, 1960).

Le climat répond à l'étage bioclimatique semi-aride avec une pluviométrie annuelle comprise entre 300 et 400 mm et des T° avec 9° pour janvier, le mois le plus froid, et 32° en août, le mois le plus chaud. Le lac est alimenté par deux principaux oueds : oued Essebat et oued Chabat Djanal, les eaux de pluie et les eaux de ruissellement provenant des hauteurs dominantes ; son débit d'eaux temporaires est estimé à 10000 m<sup>3</sup> puisque le lac s'assèche durant l'été par évaporation.

Quant aux caractéristiques physico-chimiques du sol entourant le lac Telamine, ce sol est de couleur grise à noire, il est riche en matières organiques et possède un horizon calcaire très dur, renfermant des géodes terreux, l'encroutement est formé de gypse pulvérulent (Boualaine ,1955). Le PH de ces solantchaks est compris entre 7.9 à 8.4 (Adelmalek, 1986).

Ainsi sous l'influence des défrichements et des cultures, les pâturages de Telamine se sont changés en saline, impropre à toute végétation et l'on est passé insensiblement de la dayat à la sebkha (Thinthouin, 1949, Dubuis et Simoneau, 1960).

Actuellement le site est caractérisé par une végétation naturelle composée de plantes herbacées adaptées à la salinité du milieu, sont présentes les Sansouires caractérisées par la Salicorne une plante halophile dont les taux de recouvrement atteignent 100% en certains endroits (Anonyme IV, 2004 in Bahi, 2012).

Les plaines bordant le lac servent surtout à la céréaliculture et l'arboriculture notamment celle de l'olivier ainsi que pour le pâturage. Le site est aussi reconnu pour une diversité faunistique composée d'espèces locales et migratrices. En 2011, 6560 anatidés ont été observés sur le site qui sont entre autre les canards de différentes classes (canard colvert, canard de Souchet, canard siffleur etc...), les Tadornes de Belon et les Sarcelles d'hiver ; 5950 Flamants Rose et 605 Echasse Blanche ont aussi été observés sur le site sans pourtant être exhaustif (Direction Générale des Forêts, 2011).

Actuellement le lac connaît une dégradation inquiétante d'ue aux pressions faites par les activités agricoles et le surpâturage, mais aussi par le déversement des eaux usées des communes périphériques et par la zone industrielle de Hassi Aneur.

Quant à la zone humide de Ghedir Lakehal, elle est située à 1 km au nord du lac Telamine avec une superficie de près de 27 ha, limitée au Nord par le nœud de connexion entre la route nationale N 11 et N13, à l'Ouest par les communes de Hassi Mefsoukh et de Haï Boumama, au sud par le lac Telamine et à l'Est par la commune de El Ayaida. Elle est alimentée par les pluviométries saisonnières et les eaux de ruissellement provenant des plaines environnantes. C'est une dépression endoréique se situant aux points d'affaissement d'une plaine agricole, de ce fait la dayat est enclavée par des cultures céréalières et arboricoles avec de la végétation halophyte et ripisylve sur ces berges.



*Figure 6: le lac Telamine (src : <https://www.aps.dz/regions/81669-zone-humide-de-telamine-oran-un-site-pour-accueillir-les-ornithologues-et-les-visiteurs>).*

#### ***1.3.1.4. Les salines d'Arzew***

Appelée aussi « El Melaha », elle se présente comme une dépression endoréique de forme allongée, orientée du S.SO au N.N.E. Le lac salé ou sebkha est d'une superficie de 5800 ha. Il a la forme d'un chenal pointu à son extrémité sud-Ouest, et s'étend sur 12 km pour une largeur de 3 km (Tremblin, 1982). Situés à l'extrême Nord-Est de la Wilaya d'Oran, ils sont limités au Nord par la route nationale N 97, le djebel Djira et par les plaines de Gourirat, à l'ouest par les Hauteurs dominantes du plateau des Hamayans (100 à 200m) le séparant du Lac Telamine sur une distance de près de 7 km, du Sud au Sud-Ouest par la route wilayale

W41, la forêt de Moulay Ismail et par le djebel Debbie ; à l'Est par la commune de Alaimia et les plaines agricoles.

Composé d'amas éolien avec du gypse, le bassin versant a un débit de 10.000 mètres cubes chariés par 2 Oueds importants : Chabet Esseba et Chabet Djanal, et par les eaux des nappes phréatiques. La région se situe dans l'étage bioclimatique semi-aride avec une pluviométrie annuelle comprise entre 300 et 400 mm et des T° avec 9° pour janvier, le mois le plus froid, et 32° en août, le mois le plus chaud.

Le fond de la saline est constitué par un mélange d'argile boueuse grise et de sable quartzueux fin avec cristaux de gypse lenticulaires (Thinthoin, 1949). Les nappes phréatiques, qui sont sous cette formation géologique datent du pliocène et constituent une source de minéralisation pour les eaux des salines. D'après Pequignot (1890), les eaux des salines peuvent contenir jusqu'à 100mg/l de chlorure de Sodium faisant de la Sebkha une source d'exploitation minérale (exploitation du sel) dont la traces remonteraient de l'époque romaine, qui l'utiliserait à l'époque pour la salaison des peaux. Actuellement les salines produisent 80 000 tonnes de sel par an.

Cette Sebkha est bordée dans sa partie nord et nord-ouest par une série de petites dunes qui sont des lunettes provenant de l'accumulation des argiles et de sel (pseudo-sable) qui sont arrachés du fond de la cuvette par les vents de secteur Ouest Sud-Ouest, durant la saison sèche. Ces dunes se situent immédiatement sur la bordure de la sebkha et isolent des dépressions où affleurent souvent des sources salées (Dubuis et Simonneau, 1960).

Les flancs se relèvent par des hauts anticlinaux réguliers pour atteindre 125 à 180 m d'altitude sur la rive occidentale et 160 à 250 m sur la rive orientale (Thinthoin, 1948). Aux deux extrémités se trouvent deux points bas dont l'altitude ne dépasse pas 95 m au Sud-Sud-Est et 80 m au Nord-Nord-Est (Bouanani, 1991).

Le site présente une physionomie monotone d'habitats peu diversifiés caractérisant en général les milieux salés. La végétation naturelle halophile, presque absente, est composée de touffes de *Chamaerops humilis* sur les talus, de *Juncus sp.*, *Sueda sp.* et de quelques sujets de *Tamarix sp.* Sur les bords. Sur les berges sèches on rencontre des sansouires, végétation salée inondée au gré des précipitations et couvertes de salicornes (*Salicornia sp.* et *Arthrocnemum sp.*) qui colonisent les terres immergées dès le retrait de l'eau (D.G.F, 2005).

Le milieu recèle une diversité faunistique composée d'espèces endémiques et migrateurs. L'avifaune recensé sur le site en 2011 d'après la D.G.F est de 420 individus répartis en différentes espèces dont les plus importants sont les Tadornes de Belon (185), les canards de Souchet (90), Gravelo à collier interrompu (50), les Flamants Rose (35) etc.... d'autres espèces communes comme le sanglier (*Sus Scrofa*), le lapin de garenne et le lièvre existent également sur le site.

La région est caractérisée par la présence de campements de semi-nomades appelés « Hammayades » dont l'activité économique est l'agriculture très extensive à faible rendement.

La présence de cultures dans ces zones est due généralement à un défrichement qui a pour origine l'extension de la céréaliculture qui constitue pour les semi-nomades une activité après l'élevage. Cette céréaliculture vise deux objectifs: Apports fourragers pour les troupeaux, Culture vivrière non spéculative (Ghezlaoui, 2001).



Mais l'activité pastorale pratiquée dans cette région est un facteur de dégradation pour le tapis végétal par endommagement des végétaux à racine peu profonde, seules les halophytes avec des racines profondes résistent. Cette action entraîne une déstructuration des plages leur donnant un aspect chotteux en été. En revanche le piétinement constant des bétails entraîne la formation d'une microtopographie constituée de buttes et de creux et contribue au maintien de l'humidité de l'horizon superficiel des sols par le tassement des eaux météoriques.

La texture étant riche en sables, on a un lessivage de sels et une diminution de la salinité à la surface surtout au niveau des buttes, d'où l'installation de groupements sub-halophiles à *Lygeum spartum*, Les groupements halophytes à *Salsola* et *Salicornia* s'installent dans les zones basses généralement à la bordure de la Sebkha (Ghezlaoui, 2001).



*Figure 7: les salines d'Arzew (src : <https://www.vitamedz.com/fr/Algerie/Salines-d-arzew-commune-de-arzew-wilaya-d-oran-51545-Musiques-1.html>).*

#### ***1.3.1.5. La Dayat Morsli et lac Sidi Chami***

Située au sud de la ville d'Oran et entre la jonction de l'aire formée par quatre voies principales. La Dayat Morsli est une dépression endoréique d'une superficie de près de 150 ha, elle est limitée au Nord par la troisième boulevard périphérique, au Sud par la quatrième rocade, à l'Est par la route nationale N4 et wilayale W33 et à l'Ouest par la route nationale N2A.

La Dayat Morsli est située dans le domaine de l'Atlas Tellien, dans l'unité tectonique du nord de l'Algérie. Elle est séparée de la mer par les reliefs du Murdjajo. La zone ceinturant la Dayat Morsli présente un modelé plat dû à la mise en place de remblais qui ont été ensuite nivelés. À certains endroits, les décharges de déchets ont créé des modelés moutonnés dont l'altitude varie de 87 à 94 mètres (AECOM, 2010).

Selon la classification des climats méditerranéens établis par Emberger, la dayat de Morsli se situe dans l'étage bioclimatique semi-aride inférieur avec des précipitations moyennes annuelles de 375 mm et des températures moyennes annuelles de 18,92°C observées par la station météorologique d'Oran Sénia. Les valeurs mensuelles maximales et minimales des températures sont respectivement 26,8°C et 10,42°C.

La Dayat Morsli était principalement alimentée par les rejets de la zone industrielle Es Senia et par ceux des agglomérations urbaines qui favorisaient son eutrophisation. Depuis quelques mois, seules les eaux pluviales provenant du réseau routier environnant alimentent la zone humide puisque les eaux usées provenant des zones industrielles sont dorénavant



acheminées vers une STEP (AECOM, 2010). Les eaux de la dayat de Morsli ont une salinité située entre 0,5 à 30,0 g/l.

L'ensemble du site est recouvert d'une couche de remblais d'argile sableuse, salée et peu perméable pouvant atteindre jusqu'à 13 mètres de profondeur, en certains endroits (B.E.V.OR, 2006). Le complexe d'écosystème formé autour de la dayat abrite des végétations halophyles à port chamaephytique ou nanophanérophytique appartenant à la famille des Chénopodiacées. La flore du milieu riverain de la Dayet Morsli est une végétation frutescente et crassulescente, des sansouires méditerranéennes et hauts de prés salés thermoatlantiques (Gehu, Gehu-Frank, 1982). D'après les études menées par AECOM Tecult dans la région 20 espèces ont été recensé dont 3 espèces aquatiques qui sont **les joncs à feuilles aiguës et les scirpes maritimes, des Jonc maritimes**.

La végétation aquatique est largement dominée par les groupements à *Scirpus maritimus* et *Juncus maritimus*. Ces groupements végétaux s'installent sur un substrat vaseux, engorgé d'eau et occupant les bordures des points d'eau permanent. La végétation naturelle de la Dayat Morsli présente une physionomie monotone des habitats où on rencontre des groupements monospécifiques à *Salicornia arabica*, *Suaeda fruticosa*, *Atriplex halimus* et *Salsola vermiculata* (AECOM, 2010). La flore de la région se présente sous forme de steppe dégradée bordant les rives de la dayat sur les terrains plats et servent essentiellement de pâturage pour les ovins.

Les observations et les études menées sur la faune de la dayat de Morsli ont concernées uniquement son avifaune et qui a été menée par la conservation des forêts de la wilaya d'Oran durant la période 2007-2008. Il en est ressorti de cette étude 53 espèces d'oiseaux appartenant à 22 familles et à 36 genres. Parmi les 34 espèces d'oiseaux d'eau recensées, on compte 23 espèces hivernantes, 18 espèces migratrices de passage et 12 espèces nicheuses. Il est à noter que la composition avifaune du milieu ne comporte aucune espèce sédentaire, ce qui met en évidence l'importance du site comme lieu de repos pour les oiseaux migrants.

La dayat est ceinturée à l'Est par des plaines agricoles et du sud au sud-ouest par la zone industrielle d'ES Seina III, des dizaines d'usines parmi lesquelles des usines de papier peint, de transformation du plastique ainsi qu'une usine agroalimentaire selon la direction de l'urbanisme et de la construction (2007).

La seconde zone humide est située à sept (7) km à l'Est de la dayat Morsli, le lac Sidi Chami est limité au nord par les plaines agricoles, au sud-Est par la commune de Sidi Chami et à l'ouest par la route wilayale W35. Le lac Sidi Chami est une dépression endoréique d'une superficie de près de 16 ha avec de la végétation halophyte sur ces rives. Le lac est alimenté par des précipitations saisonnières et les eaux de ruissellement. Les plaines alluvionnaires situées au nord du lac servent à la céréaliculture et l'arboriculture.



Figure 8: la dayat Morsli (src : <https://www.horizons.dz/zone-humide-dhayat-morsli-oran-150-millions-de-da-pour-sa-protection/>).

### ***1.3.1.6. Les dayats Bagrat, Oum Ghellaz et Sidi Mohamed***

Ces trois dayats sont situées au sud-Est de la wilaya d'Oran entre les salines d'Arzew et la Sebkhia d'Oran avec une distance de près 5 km les séparant les unes des autres. La dayat El Bagrat est une dépression endoréique de allongée d'une superficie de près de 200 ha avec une orientation NE-SO ; située au sud-est de la sebkhia d'Oran, elle est limitée au Nord par les zones industrielles AGC SIM SPA et Nutrimag et à l'Est par l'aéroport Militaire d'Oran Tafraoui, la dayat est enclavée par des plaines alluviales de Tlelat ayant des fonctions agricoles dans la zone.

La dayat Sidi Mohamed est aussi une dépression endoréique d'une superficie de près 60 ha, elle est située à 5 Km à l'Est de la dayat El Bagrat les infrastructures situées à proximité d'elle sont les zones industrielles de Oued Tlelat situées à sa partie Sud-Ouest et la route wilayale W35 à l'Est. La dayat est bordée à sa partie Nord par des maquis arborés sur des sommets dominants avec des plaines encaissantes qui drainent les eaux provenant des sommets vers la dayat, du Sud au Sud-Est on retrouve les plaines agricoles des Touares qui bordent la dayat. Cette dayat en grande partie par des pluviométries saisonnières.

Quant à la Dayat Oum Ghellaz, elle est située au sud-Ouest des salines d'Arzew et à 4 km de la dayat Sidi Mohamed. C'est une dépression endoréique d'une superficie de près de 300 ha. Au Nord se localise les maquis arborés sur les hauteurs dominantes vallonnées qui drainent les eaux de ruissellement vers la dayat. Elle est enclavée par des plaines agricoles, notamment pour l'arboriculture et la céréaliculture.

Les groupements végétaux de ces trois zones humides sont identiques avec des végétations halophytes et ripisylves bordant leurs rives. Les données officielles sur l'avifaune de ces trois zones n'étant pas à notre portée, nous pouvons mentionner la présence des oiseaux migrateurs au niveau de la dayat Morsli d'après le rapport de la conservation des forêts recueillis lors de son inventaire d'hiver de 2020. Il s'agit des Flamants roses, l'échassier blanc, le grand cormoran et autres mangeurs de poissons.



*Figure 9: dayat El Baqrat (src : <https://www.vitamedz.com/fr/Oran/lac-sale-de-daiet-el-baqrat-227061-Photos-31-51543-1.html>).*



*Figure 10: Dayat Oum Ghellaz (src : <https://www.aps.dz/algerie/tag/Zones%20Humides?start=10>).*

### **I.3.2. Les Menaces et pression sur les zones humides d'Oran**

Les complexes des zones humides oranaises subissent des pressions, qui sont les facteurs moteurs des dégradations fulgurantes des espaces faunistiques et floristiques, certaines formes de ces pressions influent aussi sur le régime hydraulique de ces zones humides.

Parmi les facteurs qui ont certainement contribué à la variation constatée de la composition floristique de la flore halophile des zones humides d'Oran, en plus de la salinité, nous retenons deux facteurs principaux qui sont le changement climatique et l'anthropisation (Bahi et al., 2020).

Le réchauffement climatique qui est un phénomène dépendant du changement climatique, augmente l'évapotranspiration des eaux des zones humides et des atténuations sur les pluviométries, ce qui impacte la recharge des cours d'eaux et les nappes phréatiques, qui sont l'un des composants sinéqua-non au bon fonctionnement des zones humides.

D'après Bahi et al. (2020), les baisses de précipitations, l'augmentation des moyennes de températures ainsi que la durée de saison sèche dans la région d'Oran, ont provoqués le passage du niveau sub-humide au niveau semi-aride, ce qui a vraisemblablement conduit à une modification floristique des zones humides d'Oran. En effet, une aridité climatique est susceptible de favoriser une thérophytisation massive des milieux naturels en région méditerranéenne (Bammi et al., 2004 ; Miara et al., 2013).

Le deuxième facteur entrant dans la dégradation des zones humides Oranaise est l'anthropisation de ces milieux par les activités humaines et l'extension des agglomérations et de leurs infrastructures vers ces zones. Les activités telles-que l'agriculture le pâturage, sont les principales causes de la dégradation des zones humides oranaises. En effet l'extension des terres agricoles vers les zones tampons dans certaines zones humides comme le Telamine constitue un facteur de dégradation de la biodiversité de leurs écosystèmes ainsi que leur exposition à l'envasement des cuvettes d'eau par le transport des sédiments. L'agriculture est le facteur le plus important dans la perte des zones humides méditerranéennes. De vastes superficies ont été drainées et converties à des fins agricoles (Of Your Map, 2020).

Les activités agricoles constituent aussi une source de pollution pour ces zones humides par le lessivage de certains éléments chimiques pouvant perturber leurs chaînes trophiques. En effet la pollution générée par l'utilisation de pesticides dans l'agriculture et de potassium dans la conservation des olives à Sig, ainsi que par le rejet dans la nature d'eaux usées industrielles non ressenti, peut être nocif pour beaucoup d'espèces d'oiseaux, comme la cigogne (M. METZMACHER, 1979).

Les zones humides d'Oran ont depuis longtemps été l'endroit privilégié de pâture des ovins et des bovins de la région (Bahi et al., 2020). Dans certaines zones humides la pratique intensive de cette activité conduit au dénudement des sols dû au non-respect du cycle végétal. Ce processus conduit à l'exposition des versants à l'érosion ainsi qu'à l'envasement des plans d'eau. La réduction de la flore de ses zones humides par ces deux activités impact négativement sur leurs habitats naturels ainsi que sur leurs diversités faunistiques.

L'urbanisation et l'implantation des industries à proximité de certaines zones humides telles que la dayat Morsli, le lac Telamine, les salines d'Arzew constituent une source de dégradation pour les écosystèmes aquatique et terrestre de ces zones humides dû à leurs rejets d'eau vers ces zones.

Depuis presque une décennie, la pression anthropique sur l'exploitation des ressources s'est accentuée dans cette région (Macta) et l'on a assisté à l'émergence de nouveaux facteurs de dégradation, tels que la pollution, le braconnage et l'urbanisation (GHODBANI, 2009). En effet les rejets des eaux usées des agglomérations et des usines sont les facteurs de pollution et d'eutrophisation des zones humides. Elle favorise la prolifération de certaines espèces, comme le goéland brun ou le goéland argenté (*Larus fuscus*, *Larus argentatus*). Selon plusieurs spécialistes, une dilatation des niches écologiques altère la diversité spécifique (BRUN, 2000). La réalisation des infrastructures de grande envergure nécessitant le déblaiement, le remblaiement ou l'assèchement d'une partie des zones humides constituent des risques de pollution et des menaces de disparition des zones humides Oranaise. A titre d'exemple la réalisation de la route nationale N11 qui a nécessité le déblaiement d'énorme quantité de sable sur le cordon dunaire de la Macta, la construction de la station de dessalement d'une capacité 500 000 m<sup>3</sup>/j non loin de l'embouchure de la Macta et le projet d'assèchement de la sebkha d'Oran sont autant de menaces qui planent sur le complexe des zones humides Oranaise.

La multiplication des décharges sauvages (industrielles, urbaines et hospitalières) dans certaines zones humides d'Oran contribue aussi à la pollution des eaux superficielles et des nappes phréatiques. Selon les données des Services d'Hygiène Communales les plaines de la Macta, de Sig et de l'Habra regroupent un total de 25 décharges dont 8 sauvages et 7 autorisées mais non contrôlées.

Une autre menace sur la biodiversité des zones humides est le braconnage illégal des espèces protégées de ces zones humides. Tout récemment, afin de contrôler cette situation qui menace dangereusement la biodiversité ici et dans les autres zones humides algériennes, huit décrets exécutifs ont été promulgués. Ils fixent d'une manière désignée les règles d'obtention du permis de chasse, l'organisation administrative et associative de l'activité et le respect des périodes de chasse (JORA, n° 70, 2007) (Ghodhani et al., 2013).

### **I.3.3. Cadre juridique des zones humides en Algérie**

L'Algérie à travers ces politiques de gestion de ces ressources naturelles a adopté des décrets et des politiques de gestion de ces dernier pour une exploitation durable ces dernières tout en préservant l'écosystème de ces milieux.

- Le décret 81-02 du 17 janvier 1981 portant ratification du protocole relatif à la prévention de la pollution de la mer Méditerranée par les opérations d'immersion effectuées par les navires et aéronefs, fait à Barcelone le 16 février 1976 ;
- Le décret n° 82-440 du 11 décembre 1982 portant ratification de la convention africaine sur la conservation de la nature et des ressources naturelles, signée à Alger le 15 septembre 1968 ;
- Le décret n° 82-439 du 11 décembre 1982 portant adhésion de l'Algérie à la convention relative aux zones humides, d'importance internationale, particulièrement comme habitat de la sauvagine, signée à Ramsar (Iran) le 2 février 1971.

A travers ces décrets le pays a ratifié des conventions internationales supranationales auxquelles il doit se conformer pour la gestion de ces milieux. La ratification des conventions internationales a amené les instances institutionnelles a adopté des stratégies pour la protection de ces ressources tels-que :

Le Plan National d'Action Environnementale et de Développement Durable (P.N.A.E.D.D) qui définit l'ensemble des actions que l'Etat se propose de mener dans le domaine de l'environnement pour un quinquennat.

La stratégie Nationale de gestion des écosystèmes des zones humides établie dans le cadre des prescriptions de la convention Ramsar qui a appelé chaque partie contractante a élaborer une stratégie de gestion nationale des milieux humides d'ici l'horizon 2015. Cette stratégie élaborée avec la participation de 14 ministère s'inscrit dans le Schéma National d'Aménagement du Territoire (SNAT) avec pour objectif global de garantir une gestion éco systémique des Complexe des Zones Humides (CZH) afin d'assurer le bon fonctionnement des zones humides en vue de leur permettre de fournir des services écologiques au profit des générations actuelles et à venir et en faveur du développement économique durable, ainsi qu'une meilleure résilience aux changements climatiques. Cet objectif global se décline en quinze (15) objectifs spécifiques que l'Etat veut atteindre d'ici l'horizon 2030.

#### ***1.3.3.a. La convention Ramsar***

La Convention sur les zones humides (Ramsar, Iran, 1971) est un traité intergouvernemental qui a pour mission: «La conservation et l'utilisation rationnelle des zones humides par des actions locales, régionales et nationales et par la coopération internationale, en tant que contribution à la réalisation du développement durable dans le monde entier» (Secrétariat de la Convention de Ramsar, 2013).

L'idée de créer une convention pour la conservation et l'utilisation rationnelle des ressources des zones humides fut lancée pour la première fois en 1962 lors de la conférence du projet MAR (pour « MARécages », « MARshes », « MARismas »), organisée par M. Luc Hoffmann, avec la participation de l'Union internationale pour la conservation de la nature et de ses ressources (connue plus communément sous le nom d'Union internationale pour la Conservation de la Nature, UICN), du Bureau international de Recherches sur les Oiseaux d'Eau et les zones humides, BIROE (aujourd'hui Wetlands International) et du Conseil

International pour la Protection des Oiseaux, CIPO (aujourd'hui BirdLife International) aux Saintes-Maries-de-la-Mer en Camargue, France, du 12 au 16 novembre 1962. Ce dernier était né dans le souci de faire face à l'assèchement rapide ou la destruction de vastes étendues de marécages et de zones humides en Europe et par le déclin numérique des oiseaux d'eau qui en résultait. Pendant les huit années qui suivirent, des textes furent élaborés lors de plusieurs réunions techniques internationales (St. Andrews, 1963; Noordwijk, 1966; Leningrad, 1968; Morges, 1968; Vienne, 1969; Moscou, 1969; Espoo, 1970), organisées essentiellement sous les auspices du BIROE, et avec les conseils du professeur G.V.T. Matthews, sous l'impulsion du Gouvernement des Pays-Bas. À l'origine, le projet de convention visait spécifiquement à conserver les oiseaux d'eau par la création d'un réseau de refuges mais au fil de son évolution, et grâce en particulier aux avis experts de M. Cyrille de Klemm, Conseiller juridique, la conservation des habitats des zones humides (plutôt que celle des espèces) prit une place prépondérante (secrétariat de la convention de Ramsar, 2013).

Mais ce n'est qu'au 2 février 1971 que la convention Ramsar voit le jour dans la station balnéaire de Ramsar en Iran, lors d'une réunion internationale regroupant 18 pays, qui fut organisée par M. Eskander Firouz, Directeur du Département iranien de la chasse et de la pêche.

C'est en décembre 1975, que la Convention est entrée en vigueur après réception par l'UNESCO, qui avait accepté d'être le dépositaire de la Convention, du septième instrument d'adhésion ou de ratification, déposé par la Grèce.

En 1986 et 1997, le protocole de Paris et les Amendements de Regina furent respectivement mis en vigueur. Le premier étant préconisé lors d'une Session extraordinaire de la Conférence des Parties contractantes, organisée en 1982 à Paris au siège de l'UNESCO, établit une procédure d'amendement de la Convention (Article 10 bis) et adopte les versions officielles du traité en allemand, en anglais, en arabe, en espagnol, en français et en russe. Quant aux seconds ils concernent des amendements aux Articles 6 et 7 et instaurent un Comité permanent intersessions et établissent un secrétariat permanent et un budget de la Convention qui ont été établis à l'issue d'une Session extraordinaire de la Conférence des Parties contractantes qui a eu lieu à Regina, au Canada, en 1987.

Normalement, les nouvelles Parties contractantes adhèrent à la Convention de Ramsar amendée par le Protocole de Paris et les Amendements de Regina, selon les instructions de l'article 9 de la convention. En janvier 2013, 163 pays étaient Parties contractantes à la Convention et plus de 2060 zones humides, couvrant plus de 197 millions d'hectares figuraient sur la Liste Ramsar des zones humides d'importance internationale (S G R, 2013).

L'inscription des sites par les parties contractantes sur la liste Ramsar des zones humides d'importance internationale est autorisée sous réserve de remplir les prescriptions des articles 2.2 et 2.3. Cependant les parties contractantes ont établis des critères d'inscriptions qu'un site doit satisfaire au moins une pour légitimer son inscription à la liste. La dernière modification de ses critères remonte de 2005 lors de la COP9 à l'issue de laquelle le neuvième critère a été arrêté.

### ***1.3.3.b. Le projet MedWet : convention à l'échelle méditerranéenne :***

Né suite au colloque de 1991 organisé par le Bureau international de recherche sur les Oiseaux d'Eau et les zones humides (BIROE), maintenant Wetlands International sous le

thème « **La gestion des zones humides méditerranéennes et leurs oiseaux** » à Grato en Italie. Le projet MedWet a été conçu comme un mécanisme de mise en œuvre de la déclaration du colloque, opérant sous l'égide de la convention Ramsar ; en d'autre terme c'est une entité intergouvernementale de collaboration dont le but est la promotion et le soutien des politiques et des actions multi-acteurs sur le terrain pour la conservation, la restauration et l'utilisation durable des zones humides méditerranéennes.

En 1992 sous le soutien des Ministères italiens et grecs de l'Environnement, de l'Institut pour la Conservation de la Nature et des Forêts (ICNF) (Portugal), les Conventions de Barcelone et de Berne, le WWF-Italie, et la Commission Européenne (CE), du Secrétariat de la Convention de Ramsar, d'ONG internationales et d'institutions nationales spécialisées dans les questions relatives aux zones humides, le projet MedWet 1 qui impliquait cinq (5) pays (**Espagne, France, Grèce, Italie et Portugal**) fut lancé et financé par ses institutions avec pour objectif de développer des méthodes et des outils qui seraient spécifiques à la Méditerranée.

Durant la période 1996 le projet MedWet 2 fut lancé avec pour objectif d'étendre le MedWet 1 avec l'adhésion de cinq (5) pays dont aucun n'appartenait à l'UE à l'époque (Albanie, Algérie, Croatie, Maroc et Tunisie) et l'adoption d'une nouvelle méthode socio-économique de conservation et d'utilisation rationnelle des zones humides, qui est devenue une préoccupation majeure du travail de MedWet à ce jour.

En 2013, suite à la communication du gouvernement Grec à Medwet qu'il ne pourrait plus financier le secrétariat de MedWet à Athènes. Ce denier a été délocalisé et prit fonction en mai 2014 en France dans les locaux de La Tour du Valat, Institut de recherche pour la conservation des zones humides méditerranéennes, en Camargue, qui abrite le siège du secrétariat du MedWet jusqu'à ce jour.

Le projet MedWet tel-que établi dans ces textes juridiques est composé de cinq organes qui travaillent en synergie pour atteindre les dix sept (17) Objectifs du Développement Durable (ODD), notamment les objectifs 6,13,14 et 15 d'ici 2030 dans les vingt-sept (27) pays méditerranéens et périméditerranéens à travers la mise en œuvre effective dans un premier temps du quatrième plan stratégique de la Convention de Ramsar sur les zones humides établis lors de la Conférence des Parties contractantes qui a eu lieu du 1er au 9 juin 2015 en Uruguay, pour la période octennale (2016 – 2024) :

- Aborder les causes de la perte et de la dégradation des zones humides méditerranéennes ;
- Contribuer efficacement à la conservation et à la gestion des Sites Ramsar de la Méditerranée ;
- Encourager l'utilisation rationnelle de toutes les zones humides méditerranéennes ; et
- Améliorer la mise en œuvre de la Convention de Ramsar dans la région méditerranéenne.

## **I.4. Conclusion**

Après cette présentation synthétique des zones humides à l'échelle planétaire et l'état des lieux des zones humides d'Oran nous pouvons en déduire que les conséquences de la mauvaise gestion des zones humides (dessèchement et de dégradation de leur écosystèmes) ont eu pour gain de cause l'éclosion des organisations internationales (RAMSAR),

supranationales (MedWet) et la mise en œuvre des programmes nationaux en vue de revaloriser ces milieux dans le cadre d'un développement durable.

Concernant les zones humides de la wilaya d'Oran, nous pouvons en déduire que ces dernières subissent des pressions différentes en fonctions de leurs localisations. La Dayat Morsli (périurbanisation), la Dayat El Bagrat (déchets industriels) et le lac Sidi Chaami (rejets des eaux en sont des exemples illustratifs des différentes pressions et dégradations subis par les zones humides d'Oran.

Avec l'adoption de la stratégie nationale de gestion des écosystèmes des zones humides, de gros progrès ont été fait concernant la protection de ces milieux.



**Chapitre II : Approche diachronique pour la  
modélisation de la dynamique des ZH**

## **II. Approche diachronique pour la modélisation de la dynamique des ZH**

### **II.1. Introduction**

Si à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle l'apparition de la photographie aérienne fut une avancée pour la compréhension du fonctionnement des phénomènes de notre milieu ainsi que les interactions des différents éléments qui la compose et leur dynamique, leur modélisation ne serait faite qu'au cours du 20<sup>ème</sup> siècle. En effet grâce à la photographie analogique basée sur les supports du film argentique, des travaux de différents objectifs sur différents phénomènes ont été menés par certains auteurs sur des échelles inférieures au 1/30 000. Dès 1990, le passage de la photographie analogique à la photographie numérique a permis l'amélioration de la prise de vue et la disponibilité des données en un laps de temps plus court.

Mais au milieu du 20<sup>ème</sup> siècle l'apparition des satellites artificiels a permis une observation continue des phénomènes à l'échelle planétaire dans un large éventail de longueur d'onde permettant l'étude des phénomènes variés par rapport à leurs réponses spectrales. Par ailleurs, l'avancée technologique, notamment par celles des modèles et méthodes numériques basées sur l'apprentissage automatique statistique, a mis en évidence le suivi des phénomènes spatiales ainsi que la compréhension de leur dynamique et des interactions entre ses différents composants. La possibilité de prédiction de leurs états futurs, permet donc d'appréhender leur devenir et d'adopter des mesures ou des politiques de conservation ou de prévention des risques de dégradation de certains milieux.

L'objectif de ce chapitre est de dresser un état de l'art des différents systèmes d'acquisition et d'analyse des données spatiales de télédétection en particulier pour la modélisation des zones humides et de leur dynamique dans un contexte prédictif spatiotemporel.

### **II.2. Les données de la Télédétection dans l'étude des milieux humides**

L'acquisition des données par la télédétection dans le domaine du visible aux hyperfréquences a permis l'acquisition continue des données sur les phénomènes qui se manifestent sur notre planète ainsi que sur la dynamique des éléments qui composent la biosphère. La télédétection offre une gamme de données de plus en plus couramment utilisées pour cartographier les zones humides à l'échelle du paysage - bassin versant, région (Rundquist et al., 2001).

#### **II.2.1. Les photographies aériennes**

La terre étant un vaste système composé d'éléments interconnecté qui déterminent les milieux dans lequel nous vivons. L'homme afin de se sentir en haut de ce système et contrôler ou du moins comprendre et anticiper les changements actuelles ou future afin d'en tirer profil à développer des moyens au fil des ans pour le suivi et la collecte des données sur le fonctionnement de ce système.

Si l'avènement de satellites artificiels d'observation de la terre n'a vu le jour qu'au-cours du 20<sup>ème</sup> siècle, l'éclosion de son prédécesseur (photographie aérienne) remonte à la fin du

18<sup>ème</sup> siècle. En effet, en 1785 les frères Montgolfier inventent l'aérostat qui aura connu des avancés jusqu'à l'avènement de l'avion en 1903 par les frères Wright. Les principaux pionniers du développement de l'aérophotogrammétrie sont les Autrichiens Scheimpflug et Kammerer, le Français Saconney, le Russe Thiele, les théoriciens allemands Finsterwalder et Von Gruber et enfin les constructeurs Poivilliers, Bauernsfeld, Predhumeau, Hugershoff, Nistri et Santoni, l'aéronaute Suisse Spelterini et l'aviateur Suisse Mittelholzer, le promoteur Suisse de l'application de la méthode stereophotogrammetrique: le géologue R. Helbling et le constructeur génial d'appareils géodésiques et photogrammetriques : H. Wild (Vuille, 1950).

En 1903, la propulsion de l'aéronautique par les frères Wright a amené les ballons sphériques et captifs à céder le pas à l'avion dans la photographie aérienne dû aux contraintes techniques et financières imposées par ces derniers. C'est au cours de la première guerre mondiale que le développement de l'aviation, la photographie aérienne, la cartographie militaire ont pris un rythme sans précédent, donnant naissance à de nouveaux appareils de prise de vues et des instruments de restitution. Durant les années qui suivirent, la photographie aérienne connaît un essor considérable non seulement pour des raisons militaires mais aussi civiles et scientifiques. C'est ainsi qu'en 1946, les premiers clichés spatiaux, ont été pris aux Etats-Unis, à une altitude de 130km, avec une caméra de 35 mm montée à bord d'un V2.

Depuis lors, les photographies aériennes ont été utilisées pour la cartographie des zones humides : Anderson et Wobber, 1973; Cowardin et Myers, 1974. Des photographies aériennes panchromatique, couleur et infrarouge couleur à une échelle inférieure au 1/30000<sup>ème</sup>, sur support papier ou sur support film, servent couramment de documents de base pour délimiter les surfaces en eau et la végétation des zones humides, l'émulsion infrarouge (Rapinel, 2012).

Les appareils de prise de vue doivent être excessivement précis avec des objectifs exempts de distorsions ; le plan de l'image doit être mathématiquement perpendiculaire à l'axe optique et situé exactement dans le plan focal de l'objectif. Les missions de prise de vue photographique aérienne consistent en la couverture d'une superficie donnée par la photographie aérienne dans une période, qui est déterminée en fonction de l'objectif de la mission. Cette mission peut être faite dans le cadre d'un inventaire des ressources naturelles, d'une reconnaissance du territoire (occupation du sol et type d'utilisation du sol), d'un suivi de la dynamique des milieux (artificiels, naturels) etc....

Vers la fin des années 1990, l'évolution de la photographie analogique (films argentiques) vers la photographie numérique a marqué un pas dans la collecte massive et précise des données grâce aux caméras numériques montées à bord des avions qui offre une résolution améliorée que les caméras analogiques et une disponibilité rapide des clichés et leurs archivages sans passer par les phases de développement et de scannages contrairement aux clichés obtenus par les caméras analogiques.

Malgré cette évolution dans la collecte des données par les photographies aériennes, elles restent limitées par rapport aux images satellitaires. En effet même si les photographies aériennes nous offrent une haute résolution leurs acquisitions restent néanmoins à des échelles inférieures au 1/30000, ce qui signifie que les missions de photographie aérienne couvrent généralement des zones limitées. Les photos acquises par les caméras analogiques sur les rouleaux de film argentique sont des négatifs nécessitant des phases de

traitement qui se font dans les chambres photographiques. Lors du traitement de ces photos négatives, une exposition à la lumière des films entraîne une variation des valeurs numériques réelles correspondant à la réflectance réelle des objets conduisant ainsi à des erreurs d'interprétation et de classification des images. De plus, selon l'émulsion et l'échelle des photographies aériennes, certaines formations végétales des zones humides sont difficilement, voire non identifiables (Rapinel, 2012). De plus les contraintes météorologiques et les coûts onéreux des photographies aériennes ne permettent pas un suivi continu des phénomènes dynamiques. De surcroît la qualité de l'interprétation des photos aériennes dépend de la qualité de l'auteur puisque les critères d'interprétation ne sont pas toujours explicites et varient d'une zone à une autre.

Face à l'indisponibilité des photographies aériennes et la lourdeur des ressources humaines et financières mobilisées pour les missions aériennes ; des nouveaux dispositifs de prise vue aérienne se sont développés depuis une vingtaine d'années à savoir les ULM et les drones. Les prises de vue aérienne par ces dispositifs se font en basse altitude, permettant ainsi une amélioration de la qualité des informations acquises sur les zones couvertes lors de leurs missions. En plus la souplesse de programmation de leurs missions induisent à leur forte disponibilité en un temps record leur permettent de couvrir des événements catastrophiques et leurs évolutions à des très haute résolutions temporelles (feux de forêt, inondation, mouvement de terrain etc...).

Généralement, l'échelle des clichés se situe entre le 1/1000<sup>ème</sup> le 1/2000<sup>ème</sup>, la taille du pixel variant entre 0,05m x 0,05m et 0,5m x 0,5m ; ce qui donne un caractère complémentaire aux données acquises par ces nouveaux dispositifs vis-à-vis des photographies aériennes et des images satellitaires acquises par des capteurs civils dont les pixels ont une taille minimale de 0,40m x 0,40m (Rapinel, 2012). Ce type de clichés est notamment utilisé dans et à proximité des zones humides pour identifier et cartographier des habitats végétaux, effectuer le suivi de cours d'eau (analyse de l'occupation des berges, état de la végétation rivulaire, le suivi de la dynamique de leur lit mineur – îlots –, le suivi de la végétation (Lejot et al., 2011).

Toutefois, les drones et les ULM ont des limites notamment les corrections liées à la géométrie de leurs prises de vue, leurs faibles capacités de couvrir de grandes surfaces et les coûts élevés de leurs services.

*Tableau 3: Référence Bibliographique des photographies aériennes et leurs caractéristiques qui ont été utilisées dans l'étude des zones humides (Rapinel, 2012).*

Plateforme	Capteur	Mise en service	Résolution spatiale	Résolution spectrale	Référence Bibliographique
Aéroporté	Reflex argentique	1970	0,5 m	RVB (Bleu, Vert, Rouge)	Anderson et Wobber, 1973 ; Cowardin et Myers, 1974
Aéroporté	Reflex numérique	2000	0,5 m	RVB (Bleu, Vert, Rouge)	Langanke et al, 2007 ; Shuman et Ambrose, 2003
Aéroporté	Reflex numérique	2000	0,5 m	RVB (Vert, Rouge, PIR)	Baily et al., 2006 ; Baily et al., 2003
Aéroporté	Nd	2005	0,5 m	Vert : 0,42 -052 Rouge : 0,52 -	Bork et Su, 2007

				0,60 PIR : 0,63 -0,69	
Drone (Pixy)	Reflex numérique	2000	0,1 m	RVB (Bleu, Vert, Rouge)	Lejot et al. 2011

## II.2.2. L'imagerie multispectrale et hyperspectrale des satellites

Au cours du 20<sup>ème</sup> siècle, les systèmes d'acquisition des informations spatiales avaient pris une autre dimension en passant des vecteurs aéroportés aux vecteurs spatiaux. Cette avancée technologique fut accompagnée par l'avènement des capteurs de grande résolution spectrale, spatiale et radiométrique.

Les trois dernières décennies furent marquées par des avancées énormes dans la précision d'acquisition des informations spatiales en termes de résolution radiométrique et spectrale par la mise aux points des capteurs de Haute Résolution (HR) et de Très Haute Résolution (THR) spatiales et munis des détecteurs et des caméras multipectrales et hyperspectrale.

Ainsi plusieurs études ont été menées sur les zones humides en exploitant les données issues des deux modes d'acquisition des informations spatiales avec des résolutions spatiales, spectrales, temporelles et radiométriques différentes en fonction de leurs problématiques et de leurs objectifs.

### II.2.2.1. Dans le domaine du visible et de l'infrarouge

Les images multispectrales sont couramment utilisées dans l'étude des zones humides pour la détection et la cartographie de l'occupation du sol. Avec les capteurs de Haute Résolution spatiale (HRS) le suivi de la dynamique des milieux humides et la distinction de certaines espèces végétales sont devenues plus pratiques notamment avec les satellites SPOT (Töyrä et Pietroniro, 2005; Alexandridis et al., 2009) et Landsat (Baker et al., 2006; Civco et al., 2006; Herrero et Castaneda, 2009 ;). Contrairement aux photographies aériennes ces satellites ont l'avantage de couvrir de grande surface avec des fauchées différentes et des scènes variantes (SPOT 60 x 60 km, Landsat 185 x 185 km). Leurs configurations spectrales leur permettent ainsi de mieux discriminer les surfaces en eau et les couverts végétaux selon leur biomasse et leur teneur en eau que les photographies aériennes, toutes émulsions confondues (Rapinel, 2012). Les séries temporelles annuelles et interannuelles permettent de mieux discriminer les différentes formations végétales des zones humides ou suivre l'évolution de leurs surfaces en eau (Ozesmi et Bauer, 2002). En effet les images satellitaires permettent de faire un suivi de l'évolution des zones humides et de replacer ces zones dans un contexte géographique large afin de mieux comprendre les éléments qui concourent à leurs dynamiques.

Ces satellites embarquent les capteurs de haute résolution spatiale : SPOT-4 (20x20m en mode multispectral, 10x10m en mode panchromatique), Landsat7 TM 7 (30x30m en mode multispectral et 15x15m en mode panchromatique) et SPOT5 (10x10m en mode multispectral, 5x5m et 2,5x2,5m en mode panchromatique et super-mode panchromatique). Leur limite réside sans leur incapacité à discriminer certaines espèces végétales des zones humides selon les études de certains auteurs (Civco et al., 2006; Hubert-Moy et al., 2006). Mais par contre elles ont montré leurs intérêts pour le suivi de certaines espèces comme les roselières avec les images de SPOT-5 de 10x10m d'après Davranche (2008) ou les

principaux habitats des zones humides des bas-fonds de vallées selon Hubert-Moy et al. (2006).

Depuis les années 2000 la mise en services des satellites embaquant des capteurs de Très Haute Résolution Spatiale (QUICKBIRD IKONOS) ont permis de cartographier les zones humides et l'occupation de leurs sols de manière précise par une discrimination de certains nombres d'espèces. En effet les images issues des satellites QUICKBIRD ET IKONOS avec des résolutions spatiales comprises entre 4 et 2,4 m en mode multispectral et entre 1 et 0,6 m en mode panchromatique ont permis l'analyse et la cartographie détaillée des végétations en bordure des cours d'eau (Laba et al., 2008 ; Sobocinski et al., 2006), des tourbières (Dissanska et al., 2009), et des végétations aquatiques associées aux plans d'eau (Dogan et al., 2009). Cette cartographie des zones humides s'est encore améliorée avec la mise en service en 2011 du satellite WorldView2 qui embarque des capteurs possédant des résolutions spectrales (huit bandes spectrales comprises entre 400 et 1040 nm) et spatiale (2 m en mode multispectrale et 0,2 en mode panchromatiques) plus grandes que les deux précédents. Les images issues de ce satellite ont permis la cartographie des différents habitats des milieux lagunaires (Huaguo et al., 2011). En plus de leurs nombreux avantages les THRS présentent des limites notamment leurs emprises au sol (< 150 km<sup>2</sup>) qui ne permet pas de couvrir l'ensemble d'un bassin versant avec une seule scène, et d'autre par leur coût environ 20 \$ /km<sup>2</sup> contre environ 0,2 \$/km<sup>2</sup> pour des images satellitaires acquises par des capteurs à plus faible résolution spatiale (Rapinel, 2012).

Des images hyperspectrales ont aussi montré leurs importances dans l'étude des zones humides, telle que les images issues de la caméra hyperspectrale CHRIS embarquée à bord du satellite PROBA-1 qui avait pour mission de caractériser finement la végétation des zones humides et leurs environnements dans le cadre du programme européen Globwetland de l'ESA (Barducci et al., 2009).

Tableau 4: caractéristiques des images des capteurs passifs utilisées dans l'étude des zones humides (Rapinel, 2012).

Satellite	Capteur (Nbre de bande)	Année de Mise en service	Résolution spatiale	Résolution spectrale	Référence Bibliographique
SPOT-5	HRG (6)	2002	10 m	vert : 0,49-0,61 rouge : 0,61-0,68 PIR : 0,68-0,89 MIR : 1,58-1,75 0,48-0,71	Töyrä et Pietroniro, 2005; Alexandridis et al., 2009 ; Hubert-Moy et al., 2006 ; Davranche, 2008
Landsat-7	ETM + (8)	1999	30 m	bleu : 0,45-0,52 vert : 0,52-0,60	Baker et al., 2006 ; Civco et al., 2006 ; MacAlister et Mahaxay,

				rouge : 0,63-0,69 PIR : 0,76-0,90 MIR : 1,55-1,75 MIR : 2,08-2,35 therm : 10,4-12,5	2009 ; Herrero et Castaneda, 2009 ; Rover et al., 2011; Hurd et al., 2006 ; Klemas et al., 2005 ; Sugumaran et al., 2004
Quickbird		2001	2,4 m	bleu : 0,45-0,52 vert : 0,52-0,60 rouge : 0,63-0,69 PIR : 0,76-0,90	Laba et al., 2008 ; Sobocinski et al., 2006 ; Dogan et al., 2009 ; Clément et al., 2008 ; Harris et Bryant, 2009 ; Civco et al., 2006 ; Dissanska et al., 2009
PROBA-1	CHRIS (19)	2001	15 m	0,41-1,05	Barducci et al., 2009

### II.2.2.2. Dans le domaine de l'infrarouge thermique

Chaque objet absorbe une quantité de l'énergie incidente dans une certaine longueur d'onde en fonction de leur nature et de leur capacité d'absorption. Cette énergie absorbée par les objets de la surface terrestre est émise sous forme d'infrarouge thermique, qui est mesurée par des capteurs qui utilisent des photodétecteurs dont la surface est sensible au contact des photons infrarouges émis par la Terre. Les images issues des bandes d'infrarouges thermiques ont montré leurs intérêts dans l'étude des zones humides. Ces images permettent de délimiter les surfaces d'eau libre et de déterminer les sols hydromorphes.

Les thermographies issues de caméras thermiques aéroportées permettent d'estimer les propriétés thermiques et par conséquent de façon indirecte des réserves en eau du très proche sous-sol (Jackson, 1982). Elles sont souvent utilisées de façon complémentaire aux images enregistrées dans d'autres parties du spectre électromagnétique, le domaine optique ou le domaine des hyperfréquences (Jensen et al., 1986).

### II.2.2.3. Le domaine des hyperfréquences des capteurs actifs :

Les hyperfréquences sont émises en grande quantité par les capteurs actifs contrairement au soleil qui produit moins. La détection des hyperfréquences réfléchies par les capteurs RADAR (Radio Detection And Ranging) a permis la mise en évidence de certains composants des zones humides durant certaines périodes de l'année du fait de leurs capacités à pénétrer les couches supérieures de la surface terrestre et à acquérir les informations sous certaines conditions météorologiques inappropriées aux capteurs passifs. En effet la pénétration des hyperfréquences sous les couches supérieures de la surface terrestre permet de mettre en évidence les nappes phréatiques et fournir des indicateurs sur le degré d'humidité des sols, qui est un facteur déterminant dans l'émission et la réflexion des hyperfréquences. L'humidité des sols est appréhendée à partir des images RADAR avec plus de précision qu'avec des images acquises dans le visible et le proche infrarouge, puisque les données RADAR informent sur la teneur en eau des 10 premiers cm du sol nu à peu couvert (Shi et al., 1997).

En plus grâce à la pénétration des hyperfréquences émissent par les RADAR sous les couvertures végétales nous pouvons détecter l'humidité et les secteurs submergés du support pédologique de ces plantes et leurs structures (morphologie, orientation) facilitant des fois leurs identifications (Kasischke et Bourgeau-Chavez, 1997; Kasischke et al., 1997).

Les images RADAR de type SAR (Synthetic Aperture Radar) sont les plus couramment utilisées dans l'étude des zones humides. En effet des 1978, le satellite Seasat, qui avait pour mission d'observer les océans (leurs variation de température, leur élévation etc...) a produit des images, qui ont montré leurs intérêts dans l'identification des zones inondées, ceci a été confirmé avec les images SIR -C (Shuttle Imaging Radar) et JERS-1 L-HH (Japanese Earth Resources Satellite) (Hess et al., 1995; Townsend et Walsh, 1998).

Jusque dans les années 2007, la résolution spatiale des satellites RADAR était un facteur limitant leurs utilisations dans l'étude des zones humides, leurs résolutions spatiales qui avoisinaient les 10 m, se sont considérablement améliorées avec la mise en orbite du satellite TerraSAR-X en 2007 et de son jumeau TanDEM-X en 2010, qui ont offert de nouvelles perspectives pour le suivi des zones humides. En effet grâce aux multiples modes d'acquisition RADAR du satellite TerraSAR-X : **Staring SpotLight** (jusqu'à 0,5 m de résolution, scène de 8 km de large sur 4 km de long), **Spotlight** (jusqu'à 1 m de résolution, scène de 10 km de large sur 5 km de long) ; **StripMap** (jusqu'à 3 m résolution, scène de 30 km de large sur 50 km de long) etc..., les deux satellites fournissent des Modèles Numériques de Terrain (MNT) avec des résolutions spatiales variant entre 12 et 2 m et des observations SAR 2D avec des résolutions spatiales allant jusqu'à 0,5 m en **mode Staring SpotLight**.

Une autre limite de l'utilisation des images RADAR est l'importance des chatoiements (bruits) dans les images, qui nécessite d'importants prétraitements par des opérateurs avertis (Rapinel, 2012). Le chatoiement est produit par l'interférence aléatoire, constructive et destructive, provenant de la diffusion multiple qui se produit dans chaque cellule de résolution (CCT).

D'autres instruments novateurs d'acquisition des informations spatiales dont nous nous abstenons de développer ont montrés aussi leurs importances dans l'étude des zones humides telle que les LIDAR (Light Detection and Ranging), qui permettent la mesure de la hauteur de la canopée végétale par rapport au sol. Le premier retour de l'impulsion proche infrarouge de ce dernier enregistre seulement la position du premier objet (sommet de canopée, toit...) tandis que le dernier retour indique la hauteur du dernier objet, qui correspond, selon les conditions d'acquisition et à la densité de la canopée, au sol ou à de la végétation (Harding et al., 2001).

*Tableau 5: caractéristiques des images RADAR utilisées dans l'étude des zones humides (Rapinel, 2012).*

Satellite	Capteur	Année de mise en service	Résolution spatiale	Résolution spectrale	Pola.	Références Bibliographiques
SIR-C/X-SAR	SIR	1994		C, L	Quad	Hess et al., 1995 ; Pope et al., 1997
JERS-1	SAR	1992	17 m	L	Single	Townsend et Walsh, 1998 ; Wdowski et al., 2008



ERS-1 et 2	SAR	1991 et 1995	6 – 30 m	C	Single	Kasischke et Bourgeau-Chavez, 1997 ; Kasischke et al., 1997 ; Kushwaha et Dwivedi, 2000 ; Gineste et al., 1998 ; Prigent et al., 2001 ;
------------	-----	--------------	----------	---	--------	---

### II.3. Le concept de modélisation et de simulation spatiale

Depuis la fin des années 1970, se sont développées, dans différents domaines scientifiques, des pratiques de modélisation et de simulation qui possèdent en commun le fait de représenter de façon explicite des entités et leurs comportements sous une forme informatique et d'étudier, grâce à la puissance qu'offrent les ordinateurs actuels, les structures émergentes qui naissent, in silico, de leurs interactions virtuelles (Treuil et al., 2008).

Cependant la modélisation du comportement de ces systèmes est appréhendée par différentes approches en fonction de la conjonction du comportement des entités d'un système réel aux algorithmes de simulation du modèle choisis.

Il faut cependant noter que l'évolution et la prolifération des langages ou des règles de modélisation est liée à l'évolution des systèmes d'acquisition et de traitement de données, comme les mesures de télédétection et les outils d'analyse spatiale. La capacité à disposer de grande quantité de données géoréférencées a fait naître de nouveaux besoins dans les domaines de la représentation des connaissances, de la modélisation et de la simulation (Degenne, 2012).

Différents modèles de simulation ont été conçus, développés et appliqués au fil des années dans différentes disciplines avec des vocabulaires différents : les ABM « Agent Based Model » (Parunak, Savit et al. 1998), « orientées-objet » (Uhrmacher, 1997), « particulières » (Schweitzer, 1997), « individu-centrées » (Grimm and Railsback, 2005), « holoniques » (Koestler, 1967) ou « multi-agents » (Drogoul, Vanbergue et al. 2003) etc....

#### II.3.1. Le modèle et la modélisation

Un modèle est une construction abstraite qui permet de comprendre le fonctionnement d'un système de référence en répondant à une question qui le concerne (Treuil et al., 2008). Ce système de référence représente une partie de la réalité dont on modélise par des mécanismes de mesure, d'observation ou d'expérimentations qui produisent des données ou des théories générales. Ces données peuvent être de différentes natures (quantitatives ou qualitatives) et provenir de différents niveaux d'organisation du système.

Le modèle étant une représentation abstraite d'un système, il s'appuie sur un langage de modélisation pour faire une représentation simplifiée du système auquel il fait référence, qui est plus facile à manipuler que le système lui-même. Le choix du langage de modélisation dépend d'une part des traditions du domaine scientifique considéré, d'autre part de considérations sur les propriétés souhaitées pour le modèle (généralisation, démonstration

analytique, traduction en programme informatique, communication à une audience spécifique) (Treuil et al., 2008). Mais un modèle peut être représenté par plusieurs langages de modélisation en fonction de l'objectif des scientifiques. Enfin, un langage de modélisation n'est pas obligatoirement formel, son sémantique et son syntaxe s'appuient sur des abstractions et des relations entre ces abstractions que nous nommerons par la suite concepts de modélisation (Treuil et al. 2008).

Comme mentionné en dessous, un modèle est fondé sur des théories mais n'en pas une même si dans la pratique les deux termes sont souvent confondus dans les débats scientifiques du fait de l'inconsistance des scientifiques sur ces derniers. L'explication de Glennan (2005) semble être adéquate pour bien élucider la relation entre ces deux concepts, ce dernier décrit « *la relation entre la théorie et le modèle comme une relation entre le général et le particulier : là où une théorie a pour ambition de décrire le fonctionnement et l'évolution d'un ensemble de systèmes de référence, le modèle est une instantiation de cette théorie pour un système en particulier* ». La théorie exprime l'a priori du scientifique sur l'évolution ou l'état du système, et fournit les abstractions sous-jacentes au langage de modélisation ; elle peut aussi intervenir dans le choix des données à considérer ou à rechercher. À ce titre, nous considérerons qu'elle fournit l'ossature (ou l'une des ossatures) qui permettra la construction du modèle (Treuil et al., 2008).

Cependant avant de développer les langages de modélisation, il semble prioritaire de distinguer les deux type de modèles existants dans la famille des modèles abstraits : **les modèles statique et dynamique**. le premier fait référence à la représentation de la structure d'un système de référence dans un instant T sans pour autant intégrer les règles de son évolution dans le future tandis que le seconde intègre des hypothèses ou des règles concernant l'évolution dans le temps du système de référence.

En outre qu'il faut retenir dans le concept de la modélisation est qu'il n'y a pas de model formel pour représenter un système spécifique puisse qu'un même phénomène ou un autre système complexe peut être abordé avec des problématiques différents, donc différents langages de modélisation peuvent être utilisé pour répondre à chaque problématique. Inversement, il est également possible de concevoir une multiplicité de modèles, tous basés sur des théories différentes, exprimés dans des langages différents, afin de répondre à la même question posée au même système de référence (Treuil et al., 2008).

### II.3.2. La simulation

Vulgarisé après l'avènement de l'informatique, le terme simulation était connu dans le monde scientifique comme étant une imitation d'un processus par un autre. Mais le développement des systèmes informatiques à donner une autre dimension de compréhension à ce concept, de ce fait plusieurs définitions ont été données par des chercheurs de différentes disciplines bien qu'elles renvoient tous à la simulation informatique qu'on peut regrouper en trois grandes acceptations :

- ✓ La première soutenue par les disciplines sociales, définissent le mot simulation comme étant un sous-ensemble de l'activité de modélisation défini au début de cette section, donc ils considèrent la simulation comme une activité de construction des modèles dynamiques (Gilbert and Troitzsch, 2005).
- ✓ La deuxième acceptation est soutenue plutôt par les disciplines expérimentales comme la physique et la biologie, ils considèrent la simulation comme étant une

activité, qui partant d'un « *modèle [dynamique], se donne comme but de construire des dispositifs expérimentaux qui feront réagir le modèle de la même façon que le système réel sur des aspects importants* » (Trick, 1996).

- ✓ La troisième acception qui est plutôt une généralisation des deux premières et acceptée d'ailleurs comme étant une définition plutôt complète dans le monde scientifique. Et la définition donnée par Shannon (1998), qui considère que la simulation est à un modèle dynamique ce que l'expérimentation est à un système réel. Dans cette logique où l'on considère le modèle comme une représentation compréhensive d'un système réel, la simulation est un ensemble de tests grâce auxquels il est possible pour un scientifique de raffiner cette compréhension et d'en tirer des connaissances nouvelles (Treuil et al., 2008).

Si nous partons de la troisième acception comme étant la pierre angulaire de notre point de vue sur la simulation, il paraît nécessaire d'arrêter une définition du mot expérimentation dont cette acception fait allusion.

**L'expérimentation** : définie par Treuil et al. (2008) comme étant une activité par laquelle, en fonction d'objectifs précis, et à l'aide d'un dispositif expérimental, on perturbe selon un protocole déterminé un système réel pour en comprendre le fonctionnement.

Au terme des explications de ces concepts primaires nous pouvons en déduire que la simulation est une activité exécutée à l'aide d'un dispositif informatique (software) *appelé simulateur*, dans lequel on perturbe selon un protocole déterminé un modèle dynamique afin d'atteindre un objectif précis. Par cette définition nous pouvons affirmer que seuls les modèles dynamiques sont soumis aux simulations contrairement aux modèles statiques, qui ne peuvent être perturbés ni soumis par une quelconque évolution par essence.

### 3.2.1. Objectifs et usages de la simulation

Comme nous venons de voir dans la section précédente, le mot simulation renvoie à un large éventail de définitions dans le monde scientifique, cette diversité est due aux multiples objectifs de la simulation dans différents domaines. De cette diversité d'objectifs et d'usages une classification des objectifs finaux de la simulation a été réalisée par les scientifiques (Simpson 2006).

*Tableau 6: Objectifs finaux de la simulation (Treuil et al., 2008).*

La simulation peut être utilisée à des fins de ...	
Validation Evaluation Vérification	La simulation a comme objectif de tester une hypothèse du modèle du système de référence, de le vérifier ou d'accréditer la théorie qui a servi à le construire.
Communication Formation Visualisation	La simulation a comme objectif de « montrer » et de partager le modèle de la dynamique du système de référence.
Compréhension Exploration Explication	La simulation sert à comprendre le fonctionnement du système de référence, en considérant le modèle comme une réplique miniature qui pourra être étudiée plus facilement
Contrôle Action Pilotage	La simulation a comme objectif de servir de support à une prise de décision ou à un contrôle qui influera sur l'état (réel) du système de référence.
Prévision	La simulation sert à prévoir les évolutions possibles du système de

Prédiction Anticipation	référence, en fonction d'évolutions ou de perturbations spécifiques.
----------------------------	--

Toutefois ces différentes catégories d'objets peuvent être joints pour une étude ; ainsi on peut concevoir un modèle d'un système de référence dans **une période T1**, le valider en comparant à ce même système de référence dans **une période T2** pour ensuite projeter **les évolutions futures de ce système de référence**. Différents usages peuvent aussi être combinés concernant les objets du système de référence sur lesquels les connaissances sont à acquérir par simulation et la façon dont celle-ci est utilisée en relation avec ces objets. Ces usages sont classés en quatre catégories selon Treuil et al. (2008) dont les deux premiers servent à des travaux de démarche théorique et les deux derniers à des expérimentales.

- La simulation sert ici à explorer en détail la dynamique d'un modèle. Par exemple, elle permet de vérifier qu'il reste cohérent, en termes de dynamique, jusque dans certaines limites de valeurs ou de paramètres. C'est un usage à vocation « interne », sans connexion véritable avec le système de référence du modèle.
- La simulation est utilisée pour développer des hypothèses, d'autres modèles ou pour affiner leurs théories sous-jacentes. Il s'agit d'un mode exploratoire qui sert par exemple de support aux expériences de pensée courantes en sciences (Dennett, 1991).
- Quand aucune expérimentation ne peut être menée sur le système de référence, pour des raisons éthiques, légales (présence d'humains, d'animaux), pratiques (durée, faisabilité) ou économiques, la simulation est utilisée pour mener des expérimentations « par procuration » sur un modèle qui se substitue à ce système.
- De façon moins radicale que dans l'usage précédent, la simulation est ici utilisée comme support ou comme complément à des expérimentations sur le système de référence, en accompagnant la démarche expérimentale « réelle », et parfois même en la pilotant. Cet usage permet par exemple d'anticiper sur des résultats de préconiser des mesures, ou encore de quantifier la distance entre modèle et système de référence.

Ces différents objectifs et usages sont toutes influenceurs des choix de technique de modélisation et de constitution du modèle. Ils vont par exemple influencer sur le choix des hypothèses de simplification, sur le niveau de représentation du système de référence, sur le degré de fidélité que le modèle devra posséder à son égard, ou sur la façon dont il pourra être validé (Treuil et al. 2008).

### II.3.2.2. Simulateur et structure de modèle

La construction du modèle d'un système de référence et sa simulation se font dans un dispositif informatique appelé simulateur. Donc de ce fait nous comprenons que la construction modèle et sa simulation doivent respecter les contraintes imposées par le simulateur. Ces contraintes peuvent être déclinées en deux catégories :

- **Des contraintes structurelles** définies par le simulateur, qui vont imposer une certaine forme de description et de formalisation du modèle.
- **Des contraintes d'accès** qui spécifient ce qu'implique le fait pour le modèle de pouvoir être « perturbé » et qui vont également prescrire une certaine forme de description (Treuil et al., 2008).

Avant d'entamer une explication détaillée de ces deux contraintes une définition du concept simulateur s'impose.

**Simulateur** : Programme (ou plate-forme) informatique capable d'interpréter des modèles dynamiques, et utilisé(e) pour produire les perturbations désirées sur ces modèles.

A partir de cette définition nous pouvons comprendre pour qu'un modèle dynamique puisse être compris et simulé, il faut que ce dernier soit formalisé et interprétable par le simulateur notamment en terme de langage de programmation d'une part et d'autre part que les concepts de modélisation employés soient communs au modèle et au simulateur (sans quoi l'idée même d'interprétation n'a pas de sens) (Treuil et al., 2008). Un modèle devant être simulé dans un simulateur doit répondre à ces deux contraintes structurelles qu'on peut regrouper sous le **terme « de méta modèle »**, qui est défini comme étant « le modèle du langage de modélisation dans lequel sont exprimés les modèles dynamiques qu'un simulateur est censé pouvoir interpréter, il définit des concepts de modélisation, leurs propriétés et les relations existant entre ces concepts indépendamment des techniques d'implémentation informatique utilisées par le simulateur » (Treuil et al., 2008).

Donc de ce fait les différentes techniques de modélisation (à base d'agents, à base d'automates cellulaires, à base Markovienne etc...) vont définir des métas modèles que les utilisateurs doivent respecter. Ces métas modèles doivent être compris comme des lignes directrices des techniques de modélisation et non des spécifications détaillées, il faut noter aussi que ces métas modèles sont indépendants des dispositifs informatiques (langages, plates-formes, matériels) dans lequel on les implémente et simule et ne garantissent donc pas un programme informatique qui fonctionne correctement. Il faut cependant noter aussi que les métas modèles sont indépendant des objectifs de la simulation c'est-à-dire ce que l'on souhaite observer ou perturber à l'issue d'une simulation. Ces derniers sont soumis surtout aux deuxièmes contraintes dont le modèle sera soumis, les contraintes d'accès.

Un modèle dynamique renferme en effet deux composants distincts : une représentation de la structure du système de référence (exprimée dans le langage du méta modèle), et une représentation des lois régissant sa dynamique (Treuil et al., 2008). Ces deux composants du modèle sont représentés par des données ou d'éléments informatiques numériques (« *le minimum pour un modèle dynamique étant d'être pourvu d'un élément représentant le temps* » (Treuil et al., 2008) qu'on appelle **les paramètres du modèles**. Donc la perturbation ou le calibrage d'un modèle par un simulateur sera contrôlé par les données qu'on appelle **entrées** par contre les données mesurables ou observables qui en résulteraient de cette manipulation seront appelées les **sorties**.

**Entrées et sorties** : Les entrées d'un modèle dynamique sont des paramètres dont la valeur est définie en dehors du modèle et qui représentent ce que le simulateur peut perturber. Les sorties d'un modèle dynamique sont également des paramètres qui expriment ce que l'on cherche à mesurer en réponse à ces perturbations (Treuil et al. 2008). Compte tenu de ces deux paramètres (entrées, sorties), et les types de manipulations qui les influencent nous pouvons distinguer deux types de modèle dynamiques : **les modèles déterministes et les modèles stochastiques**.

Les premiers sont conduits par une approches mathématiques déterministe de ce fait ne contiennent aucuns paramètres dépendant du hasard. Quant aux second ils sont basés sur des approche probabilistes de ce fait contiennent des paramètres dépendants du hasard. En d'autre terme un modèle déterministe produira donc toujours la même réponse si on lui

fournit les mêmes entrées initiales. Une simulation sur un modèle stochastique, par contre, pourra générer des sorties différentes à chaque expérimentation (ce dont le processus expérimental devra tenir compte) (Treuil et al. 2008).

### 3.2.3. Conception du modèle opérationnel

La simulation étant une expérimentation d'un système de référence sur un dispositif informatique, elle doit passer par certaines étapes de calibration et d'essai pour obtenir le **modèle opérationnel valide et exécutable**.

**Modèle opérationnel** : Modèle dynamique spécifié dans un langage qui respecte le méta-modèle associé à un simulateur, et qui peut être directement interprété ou exécuté par ce simulateur (Treuil et al., 2008).

En effet le respect des contraintes imposées par les méta modèles d'une technique de modélisation dans la modélisation d'un système de référence ne garantis pas l'obtention d'un modèle valide et exécutable. Le modèle représentant le système de référence qui a été généré suite à l'application des lignes directrices imposées par le méta modèle est appelé **modèle de référence**. Ce modèle de référence peut être exécuté par n'importe quel simulateur exigeant le même méta modèle.

Mais pour trouver le modèle opérationnel en partant du modèle de référence une série d'itération multiple est souvent requise au-cours de laquelle **des modèles conceptuels** sont générés. Ces modèles conceptuels sont définis comme étant le résultat des actions de Raffinement ou reformulation du modèle de référence, dans le cadre du méta-modèle imposé par le simulateur, qui tend vers un programme informatique exécutable (modèle opérationnel) sur le simulateur (Treuil et al., 2008).

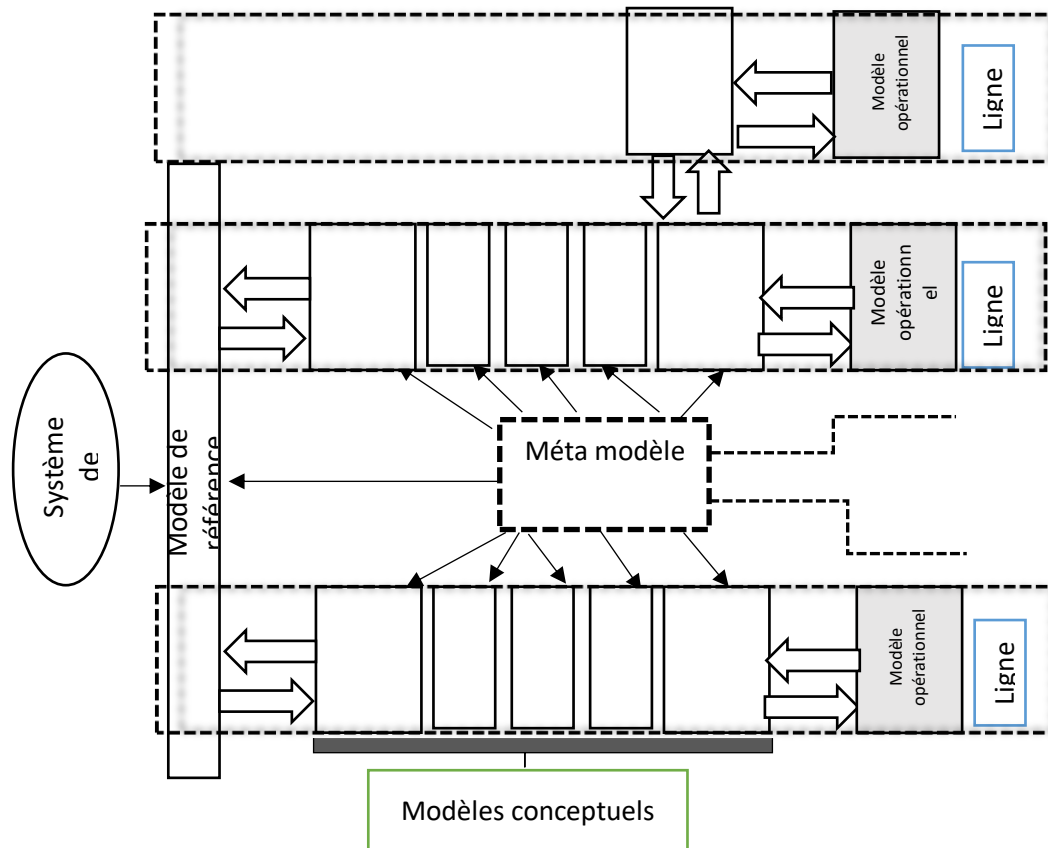


Figure 11: Trois lignes de modèles issues du même modèle de référence (Treuil et al., 2008).

Cette succession de génération des modèles conceptuels entre le modèle de référence et le modèle opérationnel, qui d'ailleurs des allers retours sont permises, sert à décrire plus finement la logique interne et certaines propriétés du modèle de référence et à analyser les connaissances manquantes ou impossibles à représenter dans le langage de modélisation. Cette succession de modèles jusqu'au modèle opérationnel est appelé **lignée de model**. Cependant il faut noter qu'à partir d'un modèle de référence il peut exister plusieurs lignées de modèle aboutissant à des modèles opérationnels différents et exécutable sur des simulateurs différents à condition que ceux-ci, bien entendu, spécifient le même méta-modèle (Treuil et al., 2008).

Toutes ces lignées constituent une famille de modèles, qui est donc organisée autour d'un méta-modèle commun. Dans le domaine de la modélisation, il sera ainsi possible d'identifier des familles spécifiques et, selon la précision du méta-modèle employé, des sous-familles au sein de chacune d'entre elles (Treuil et al., 2008).

### **II.3.3. Les techniques de modélisation dynamiques**

En tant que géographes et vu la problématique de notre étude, nous nous bornerons à développer dans cette section les modèles utilisés dans les études précédentes portant sur les aspects spatio-temporels des phénomènes géographiques.

#### *II.3.3.1. Les automates cellulaires*

Les automates cellulaires (Cellular Automata (CA) en anglais) sont une technique computationnelle qui permet entre autres d'analyser et de prédire les changements spatiotemporels de la surface (Tiné, 2018). Cette technique de modélisation et de simulation fut développée dans les années 1940 par le physico-mathématicien **J. Von Neumann** et le **mathématicien S. M. Ulam dans le Los Alamos National Laboratory (Etat Unis)**. Monsieur Von Neumann a créé le concept de CA et les premiers ordinateurs (Langlois, 2008). Un autre pionnier de cette technique de modélisation fut Alan Turing qui a développé une machine pour décoder automatiquement les messages cryptés pendant la Deuxième Guerre mondiale (Langlois, 2008). Les méthodes utilisées par ces derniers n'étant pas adéquat au progrès de la technologie informatique. C'est seulement dans les années 1970 que le mathématicien John Conway a publié le concept de CA dans le jeu de la vie, un modèle qui a des règles de transition simples pour simuler l'évolution d'une génération dans le temps (Langlois, 2008).

La définition même du paradigme des automates cellulaires prend en compte l'aspect spatiotemporel, en effet la simulation par automate cellulaire (CA) comprend quatre éléments dont le simulateur doit prendre en compte : l'espace cellulaire, le voisinage, les pas du temps, une ou plusieurs règles de transition locales, qui décrivent comment calculer l'état d'une cellule pour un instant  $T$  à partir de l'état de cette même cellule et de l'état des cellules voisines à l'instant  $T - 1$ . La définition du voisinage pouvant être différente selon les besoins, comme par exemple les voisinages de Von Neumann et celui de Moore qui sont les plus couramment utilisées (Degenne, 2012, Kamusoko & Gamba, 2015). La notion d'espace cellulaire est représenté par des grilles appelée « **pixel** », quant aux voisinages il fait référence à un ensemble de cellule contigu. L'initialisation des cellules se fait par association d'un état discret à chaque cellule parmi l'ensemble des états implémenté dans les automates. L'évolution des états des cellules est fonction des règles de transition implémentée dans les automates. Cette évolution ou changement d'état des cellules se fait

simultanément à pas de temps de discret au-cour duquel l'état des cellules se voit influencé, voire modifié, par l'état des cellules adjacentes, conformément aux règles de transition spécifiées (Tiné, 2018). Les logiciels de construction d'automates cellulaires permettent pour la plupart une expression déclarative des règles de transition : la programmation de l'automate se présente sous la forme d'une liste de règles de transition, sans ordre particulier (Degenne, 2012).

Les CA peuvent être utilisés dans une large gamme de disciplines ; cependant ce n'est qu'en 1990 que les automates cellulaires ont fait leurs apparitions dans les études géographiques pour des études urbaines. À partir de ce moment, les CA sont devenus populaires dans plusieurs lignes de recherche géographique (Torrens & Benenson, 2005), telles- que dans les études de dispersion des feux de forêt (César, Valente, & Dias, 2012; Gaudreau, Perez, & Drapeau, 2016), des dynamiques urbaines (Arsanjani, Helbich, Kainz, & Bolorani, 2012; Ozturk, 2015; Shafizadeh Moghadam & Helbich, 2013), les changements de l'utilisation de la couverture du sol (Yu et al., 2010; Yu, Chen, Wu, & Khan, 2011) etc....

Cependant l'utilisation des CA dans les études géographiques à fait apparaître un autre concept qui est l'automate géographique. Les automates géographiques ont la propriété de posséder des cellules géoréférencées ainsi que des règles géoréférencées, de ce fait on peut citer les relations spatiales entre les automates et les processus qui guident les changements de la localisation dans l'espace, c'est-à-dire que le modèle a une relation spatiale directe avec les processus (Tiné, 2018). Donc, si la localisation des automates change, le résultat du modèle changera également. (Torrens & Benenson, 2005).

Malgré une simplicité de la modélisation par automates cellulaire, ceux-ci reste des modèles dynamiques à structure statiques des automates c'est-à-dire que la topologie du réseau de cellules ne change pas durant une simulation ainsi que les règles de voisinage et de transition. Ceci constitue une limite pour la modélisation de certains systèmes ou phénomènes impliquant des interactions à différents niveaux d'échelles (Degenne, 2012).

Certaines de ces contraintes peuvent être surmontées avec certaines techniques de modélisation comme c'est le cas des Modèles à Base d'Agent.

### II.3.3.2. Modèles à base d'Agent ou Agent Based Model en anglais (ABM)

L'ABM (Agent Based Model, en anglais) est une méthode computationnelle qui permet de créer, d'analyser et de faire l'expérience de modèles composés d'agents qui interagissent dans un environnement (Abdou et al., 2012). Ces agents sont dotés d'attributs, de comportements, et de capacités de perception et de communication (Treuil et al., 2008). **L'état** d'une entité à un instant T est déterminée par l'ensemble des valeurs des attributs de cette entité en cet instant et l'ensemble des états des entités en un instant T constituent **l'état microscopique ou l'état du système**. Les capacités de perception des entités leur permettent de consulter un sous-ensemble de cet état microscopique, habituellement de façon localisée dans l'environnement (Treuil et al., 2008). La dynamique des états des entités est contrôlée par les règles de comportement, en intervenant sur les états des entités qui les portent ou sur leur existence même (création et destruction), ainsi que sur les états et existences des autres entités intervenant dans les éventuelles actions, communications ou interactions décrites dans les comportements (Treuil et al., 2008).

Cependant la technique à base d'agent n'oblige aucune contrainte structurelle ni aucune indications sur une «agentification » particulière. C'est ainsi que de nombreux métas



modèles « agents » ont été développés en fonction de la perception des systèmes de référence par les différentes disciplines : communication entre agents (FIPA 2007), mécanismes d'exécution des comportements (Wooldridge, Jennings et al. 2004), réification des groupes d'agents (Ferber, Gutknecht et al. 2004), interaction avec l'environnement (Marilleau 2006), etc...Ils restent tous, cependant, à de rares exceptions près, indépendants du domaine auquel ils s'appliquent et des outils logiciels qui les implémentent (Treuil et al., 2008). Cette genericité (qui permet d'appréhender des systèmes de référence très différents, et qui autorise l'emploi de multiples techniques de simulation) constitue une des forces actuelles des approches à base d'agents, mais aussi une de leurs faiblesses car la diversité des méta-modèles et des modèles développés lors des travaux de recherche rendent difficiles la définition d'un véritable cadre méthodologique commun ainsi que la réutilisation des travaux existants (Treuil et al., 2008). Il faut noter qu'en dépit de la récente apparition de l'approche à base d'agent dans les études géographiques, ce dernier a montré son potentiel avec des résultats satisfaisants, ceci lui a valu le mérite d'être une référence dans l'appréhension des phénomènes géographiques (Torrens & Benenson, 2005).

### *II.3.3.3. Les modèles hybrides*

Chaque technique de modélisation ayant des atouts, des limites et des processus de raisonnement différents, déterminer souvent une méthode de modélisation s'avère être difficile. Ainsi afin de tirer la meilleure partie de chaque technique de modélisation pour fournir de meilleur résultat, la méthode hybride est souvent appréciée, qui consiste à la combinaison de deux ou plusieurs techniques, qui permet de corriger les limitations qui peuvent survenir lorsqu'une seule approche est utilisée, en donnant plus de puissance au modèle (Ghosh et al., 2017). Pour cette raison, les études basées sur les modèles hybrides de la modélisation des simulations deviennent de plus en plus adoptées (Ozturk, 2015). En effet plusieurs modèles hybrides ont été développés par la combinaison des approches différentes telles que les modèles hybrides basés sur agents (Crooks & Castle, 2012; Filatova et al., 2013), des modèles d'automates cellulaires couplés aux Chaînes de Markov (Ghosh et al., 2017; Ozturk, 2015, Yuan, Yiping, Lei et Danqing, 2015), le Neural Network-Fuzzy sets (Azari, Tayyebi, Helbich, & Reveshty, 2016, Liu, Dai, & Xiong, 2015; Munshi, Zuidgeest, Brussel, & van Maarseveen, 2014).

La régression logistique ou Régression Logistique (LR) en anglais est une méthode statistique, qui calcule la probabilité d'un événement en fonction d'un certain nombre de variables explicatives. Cette méthode est souvent utilisée pour calculer la probabilité de changement de la couverture de la surface (Munshi et al., 2014). En raison des résultats qu'elle fournit, cette méthode est largement utilisée dans les études des phénomènes géographiques pour l'analyse des variables de résultats binaires et dans les modèles de simulation spatiale.

Le LR permet d'analyser la relation empirique entre différentes entités géographiques considérées comme variables dépendantes et un certain nombre de variables explicatives pour ensuite calculer la probabilité de transition entre les deux entités (Arsanjani et al., 2012). L'une des limites de cette méthode est qu'elle ne prend pas compte l'aspect spatial et son dynamique. Pour pallier cette limite, une méthode hybride de combinaison de la régression logistique aux automates cellulaires (CA-LR) a d'abord été proposée par Wu (2002) pour simuler les changements ruraux-urbains en Chine. Depuis lors cette approche hybride a été appliquée dans plusieurs études relevant de la géographie telles que dans l'expansion urbaine (Arsanjani et al., 2012; Liu, Dai, & Xiong, 2015; Munshi et al., 2014), la couverture de la surface (Lin, Chu, Wu, & Verburg, 2011; Sohl et al., 2016), et pour les changements des

milieux humides (Yu et al., 2010). Grâce à cette approche les limites des LR sont comblées par les automates cellulaires pour produire un modèle crédible avec des résultats fiables.

### **II.3.4. Etude des milieux humides par l'approche de la modélisation**

Plusieurs études sur les zones humides ont été menées par des approches diverses des techniques de la modélisation (Feng, Yang, Hong, & Cui, 2016; Hattermann et al., 2008; Ouellet d'Amours, 2010; Ozah, Adesina, & Dami, 2010; Quillet et al., 2013). Dans cette section nous ferons un tour d'horizon sur les études précédentes sur les zones humides qui ont appliquée des approches de modélisation pour appréhender l'évolution de ses écosystèmes endémiques afin de mieux nous située parmi les différentes approches dans la perspective d'adopter la plus adéquate pour l'étude de notre zone d'étude qui fera l'objet du chapitre suivant. Ainsi dans l'étude des zones humides d'une région qui a perdu des surfaces pour l'agriculture depuis des années 1950, Yu et al. (2010) ont utilisé les automates cellulaires pour mieux appréhender l'évolution de ces milieux humides. Au Canada Tiné et al, (2019) ont utilisé l'approche hybride CA-Markov and Logistic Regression pour simuler l'évolution des zones humides ouvertes dans la région d'Abitibi-Témiscamingue au Québec. Parsa et Salehi (2016) ont aussi utilisés l'approche CA-MARKOV pour prédire les changements future dans le comté de Naghadeh, en Iran pour une période de 27 ans (2014-2041).

L'étude de Yu et al. (2010), consistait à appréhender les facteurs motrices de changement d'occupation des sols et de simuler l'évolution spatiotemporelle du paysage de la plaine Sanjiang en chine, qui a connu une dégradation de ses milieux humides en raison du développement de la région durant ces dernières décennies. Ils ont utilisés trois images (1995, 2000 et 2006) pour la calibration du modèle représentant le système de la région d'étude et sa simulation. L'image de 1995 et de 2000 ont été utilisées pour la calibration du modèle. En effet les changements observés entre ces deux dates ont permis définition des règles de transition dans le modèle de CA, et l'année 2006 pour valider les résultats. Les variables choisis par Yu et al. (2010). Yu et al. (2010) ont choisi des variables qui permettaient de calculer les modifications de la surface en ce qui concerne les zones qui ont changé de terres humides à des zones d'agriculture, en considérant les données vérifiées et simulées à propos des types de surface obtenus dans le traitement des images satellites (Tiné, 2018). Puis ils ont simulés et comparés le comportement des cellules avec trois méthodes dans les logiciels différentes : Neutral Network, Decision Tree et Logistic Regression suite à laquelle, ils ont conclu que l'approches Decision Tree, avait donnée des résultats satisfaisants pour la simulation des changements dans leur région d'études. En effet l'approche CA avait donné une précision de 84% entre le changement observé et simulé entre les années 2000 et 2006, ceci a permis l'utilisation de cette technique pour simuler le changement du paysage des zones humides de la région chinoise (Yu et al. 2010).

Au Canada Tiné et al. (2019), ont utilisé la méthode hybride couplant régression logistique au CA-MARKOV pour étudier les tendances d'évolution des zones humides ouvertes dans la région d'Abitibi-Témiscamingue. Pour leur études Tiné et al. (2019) ont utilisés trois images Landsat à des dates différentes 1985, 1995 et 2005. Tiné et al. (2019) ont utilisé la régression logistique binaire pour calculer les probabilités de changement entre chaque classe d'entités (Water, Open Wetlands, Urban, Agriculture and Forest). Les tendances observées entre les années 1985 et 1995 ont permis de définir les règles de transition. Ces données ont été implémentées dans le LCM (Land Change Modeler) pour construire un modèle de

simulation. Une première simulation a été faite entre 1995 et 2005 qui a permis de valider le modèle par une comparaison entre les données observées sur l'images Landsat classifiées de 2005 et le résultat de la simulation pour l'année 2005. En effet l'indice de mesure de la capacité du modèle a effectué une simulation parfaite a donné des résultats satisfaisants avec un Kstandard de 92,40 % en considérant toutes les classes et de 78,59 % en considérant uniquement les classes Water et Open Wetlands. La validation du modèle a permis de faire une projection pour les années 2015, 2025,2035, 2045 et 2055. L'analyse des changements entre 1985 et 2005 a montré une augmentation d'environ 63 % dans les zones humides ouvertes, tandis que les résultats de la simulation ont indiqué que cette tendance persisterait jusqu'en 2055 avec une augmentation continue des zones humides ouvertes dans la région (Tiné et al., 2019).

En Iran, Parsa et Saleh (2016) ont surveillés et analysés les LULC (Land Use Land Change) du comté de Naghadeh pour ensuite utiliser les CA-Markov pour les tendances d'évolutions sur une période de 27 ans (2004-2041). Les images Landsat TM et OLI de 1987, 2000 et 2014 ont été utilisées pour faire une classification supervisée des entités : bâties, plans d'eau, terres agricoles et terres nues. Les indices Kappa de ces images classifiées était respectivement de 85, 4%, 86,03% et 88,9% (Parsa et Saleh, 2016). L'utilisation des CA-MARKOV pour la simulation de l'utilisation des terres entre 2000 et 2014 des résultats satisfaisants. Les résultats ont indiqué la croissance des régions bâties (zone urbaine) de 1989 à 2014, alors qu'il y avait une diminution des terres nues. L'utilisation des terres projetée pour 2041 a révélé une plus grande urbanisation avec une expansion potentielle des terres agricoles et nues (Parsa et Saleh, 2016).

A l'image de ces trois exemples d'études par les CA, CA-MARKOV et Régression Logistique nous pouvons en déduire que ces méthodes produisent plutôt des résultats satisfaisants avec des problématiques différentes. Il faut noter que chaque région à un système particulier de développement et de processus éco systémiques des milieux humides donc chaque région aura ses particularités dans son modèle (Tiné, 2018).

## **II.4. Conclusion**

La synthèse bibliographique de l'utilisation de la télédétection et de la modélisation dans l'étude et la prédiction de la dynamique spatiale présenté dans ce chapitre à mis en évidence l'intérêt de ces techniques dans la prédiction et la dans la préservation des ressources naturelles et des écosystèmes endémiques, qui sont de plus en plus menacé par la dynamique d'une population en constance croissance. Avec L'évolution de la technologie géospatiale de nouvelle perspective d'appréhension du territoire on fait l'objet de plusieurs recherches. En effet les études prospectives de la dynamique de l'espace permettent de mieux appréhender les évolutions futures et d'anticiper leurs impacts négatifs. Les techniques de modélisation et de simulation permettent également de projeter des scénarios d'aménagement afin de pouvoir les confrontés et choisir des scénarios viables.

## **Chapitre III : Construction du modèle de simulation de l'évolution des ZH d'Oran**

# III. Modélisation du modèle de simulation de l'évolution des ZH d'Oran

## III.1. Introduction

La simulation de l'évolution des zones humides permet d'établir un processus de changement, qui fournit une base scientifique de référence pour reconnaître le détail et la tendance du changement des zones humides, et rendre la gestion et la protection des zones humides plus raisonnables (Yu, Zhengwei et Xin, 2010).

Plusieurs études ont été menées sur les changements d'occupation des sols (LULC en anglais) afin d'identifier les facteurs motrices de ces changements et d'appréhender l'évolution de ces milieux naturels dans le souci d'atteindre les objectifs du développement durable. En effet les LULC sont devenus l'un des enjeux majeurs du développement durable et des changements environnementaux globaux (Halmy, Gessler, Hicke, & Salem, 2015; Wei, Qiping, Wang, & Hong, 2015).

Ce chapitre décrit les différents aspects de modélisation et de mise en application relatifs à notre approche de simulation de la dynamique des zones humides à Oran.

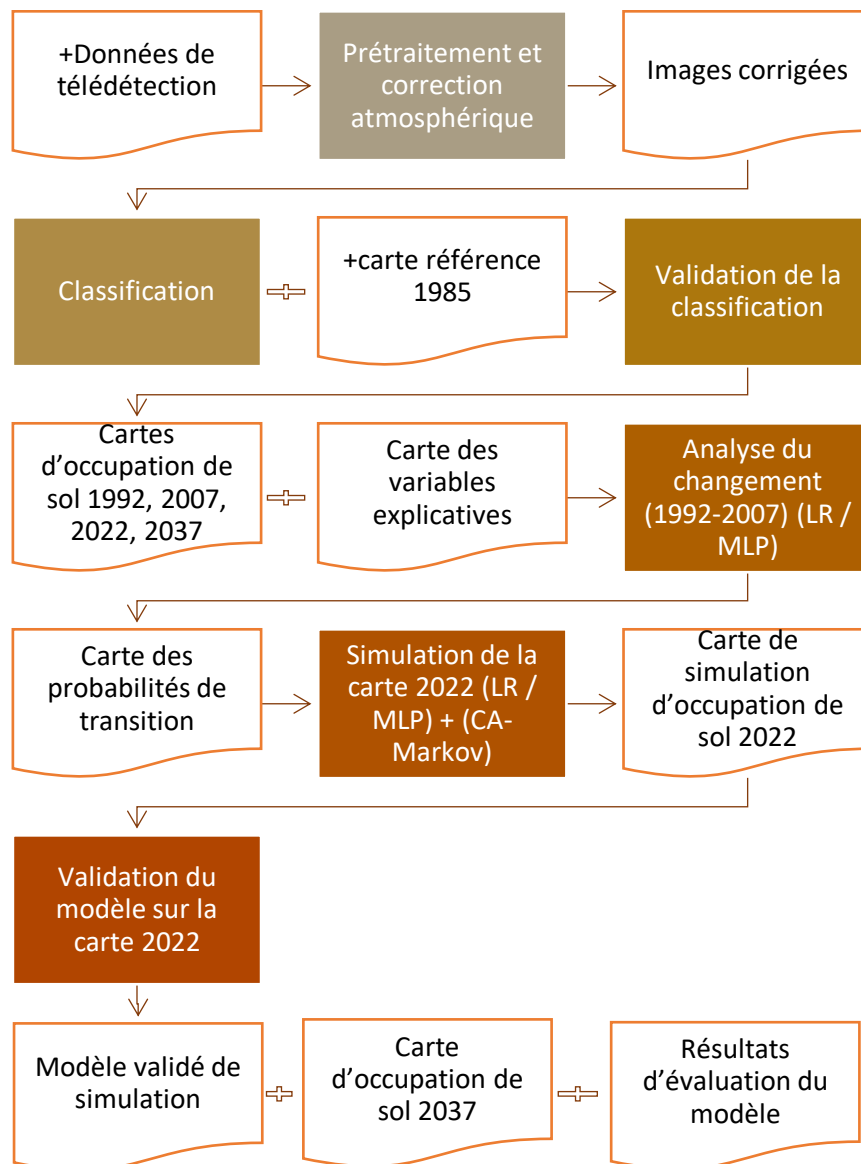
## III.2. Démarche globale

Nous appliquons une démarche déterministe de classification de l'occupation du sol d'Oran sur trois images satellitaires de Landsat acquises à différentes dates 1992, 2007 et 2022. On a opté pour un intervalle de 15 ans afin de mettre en évidence l'observation des changements.

Les deux premières images serviront de calibration par apprentissage automatique. En effet l'observation des changements entre les images multi temporelles est un processus permettant d'identifier et de quantifier les effets temporels (Deep & Saklani, 2014) ; la dernière servira de validation du modèle qui sera conçu pour la simulation de l'évolution des zones humides.

1. Notre démarche commence par un prétraitement de normalisation et de correction atmosphérique sur les données de télédétection acquises par satellite en trois temps sur la région d'étude (1992, 2007, 2022).
2. Une fois les images corrigées, un processus de classification est appliqué sur chaque image pour la détection des zones humides mais aussi d'autres catégories d'occupation du sol.
3. Une validation de la classification serait nécessaire en se référant à la carte établie par photographie aérienne de haute résolution en 1985.
4. À partir des cartes d'occupation de sol (1992 et 2007) couplées avec la carte des variables explicatives, on procède à l'analyse globale des changements par régression logistique (LR) et par réseaux de neurones multicouches (MLP). Ceci permettra d'obtenir deux variantes de cartes de probabilités de transition inter-classes.
5. La phase finale de notre démarche se concrétise ainsi par l'application des chaînes de Markov afin d'induire les règles de transition des automates cellulaires. Cette simulation par apprentissage sur 1992→2007 va produire une carte synthèse 2022.

6. Ainsi, un traitement de validation, par rapport à la carte d'occupation de sol 2022, va produire le modèle final de simulation des changements. Ceci va permettre de projeter l'état d'occupation de sol en 2037 et estimer l'efficacité de notre modèle.



*Figure 12: Processus global de modélisation et de prédiction du changement d'occupation du sol.*

### III.3. Détection des ZH par classification des images satellitaires

Le processus de classification s'applique sur les données satellitaires pour chaque année et de façon statique et séparée. Il représente l'assise de travail pour la modélisation ultérieure de la dynamique de l'occupation de sol. Nous décrivons dans cette section les aspects théoriques et pratiques de cette phase préliminaire.

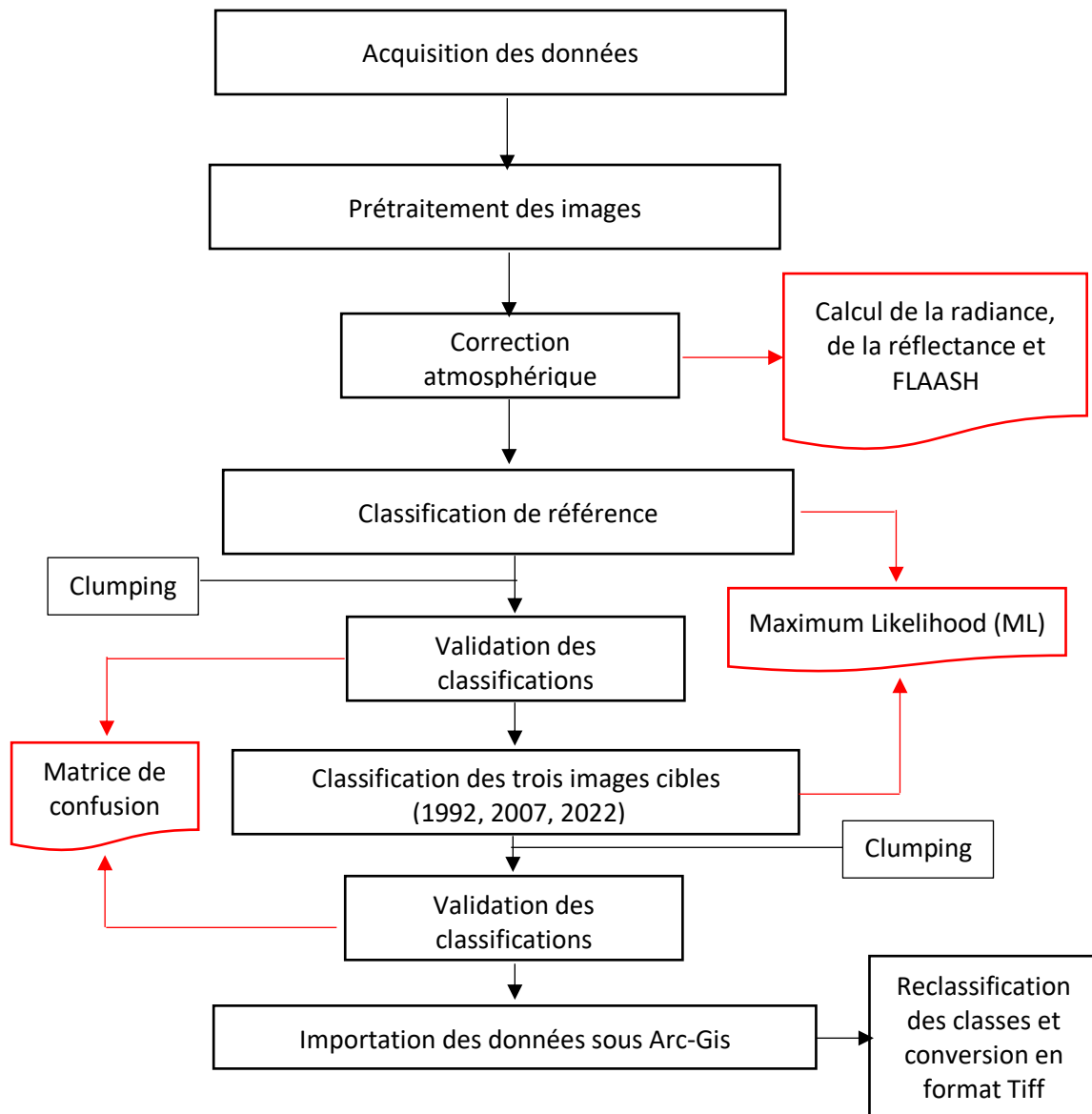


Figure 13: schéma explicatif des étapes de la classification des images satellitaires

### III.3.1. Les données de télédétection

Dans cette étude nous avons utilisé les images fournies par les différents capteurs du satellite Landsat : **MSS, TM, ETM+, OLI, TIRS**. Ces images sont prises à des dates différentes 1992, 2007 et 2022, les caractéristiques des satellites LandSat utilisés sont présentes dans le tableau ci-dessous. Les images ont été choisies en fonction des mois (Janvier Mars) correspondant à la période phénologique de la flore des zones humides et de leurs crues permettant ainsi de faire un dénombrement assez précis des zones humides puisque certaines de ces zones humides s'assèchent durant la période chaude ; L'utilisation d'une image prise dans cette période aurait fourni des informations plus ou moins erronées sur l'état de fait des ZH d'Oran.

*Tableau 7: Caractéristiques des satellites utilisés dans l'étude.*

Satellite	Date de mise en orbite et fin de la Mission	Capteurs	Nbre de Bande	Résolution spatiale
Landsat-5	1984-2013	MSS et TM	<p>Capteur MSS</p> <p>Bande 4 : (0,5 à 0,6 <math>\mu\text{m}</math>),</p> <p>Bande 5 : (0,6 à 0,7 <math>\mu\text{m}</math>),</p> <p>Bande 6 : (0,7 à 0,8 <math>\mu\text{m}</math>),</p> <p>Bande 7 : (0,8 à 1,1 <math>\mu\text{m}</math>)</p> <p>Capteur TM :</p> <p>Bande 1 : (0,45 - 0,52 <math>\mu\text{m}</math>),</p> <p>Bande 2 : (0,52 - 0,60 <math>\mu\text{m}</math>),</p> <p>Bande 3 : (0,63 - 0,69 <math>\mu\text{m}</math>),</p> <p>Bande 4 : (0,76 - 0,90 <math>\mu\text{m}</math>),</p> <p>Bande 5 : (1,55 - 1,75 <math>\mu\text{m}</math>),</p> <p>Bande 6 : (10,40 - 12,50 <math>\mu\text{m}</math>),</p> <p>Bande 7 : (2,08 - 2,35 <math>\mu\text{m}</math>)</p>	<p>Capteur MSS : 57 x 79 m</p> <p>Capteur TM : 30 x 30 m</p> <p>Sauf pour la bande thermique : 120 m</p>
Landsat-7	1999 – en cours	ETM+	<p>Bande 1 : (0,45 - 0,52 <math>\mu\text{m}</math>),</p> <p>Bande 2 : (0,52 - 0,60 <math>\mu\text{m}</math>),</p> <p>Bande 3 : (0,63 - 0,69 <math>\mu\text{m}</math>),</p> <p>Bande 4 : (0,77 - 0,90 <math>\mu\text{m}</math>),</p> <p>Bande 5 : (1,55 - 1,75 <math>\mu\text{m}</math>),</p> <p>Bande 6 : (10,40 - 12,50 <math>\mu\text{m}</math>)</p> <p>Bande 7 : (2,08 - 2,35 <math>\mu\text{m}</math>),</p> <p>Bande 8 : (0,52 - 0,90 <math>\mu\text{m}</math>),</p>	<p>30 x30 m</p> <p>sauf pour la Bande 6 : 60 x 60 m</p> <p>Bande 8 : 15 x 15 m</p>
LandSat-8	2013 – en cours	OLI et TIRS	<p>Capteurs OLI :</p> <p>Bande 1 : (0,43 - 0,45 <math>\mu\text{m}</math>),</p> <p>Bande 2 : (0,450 - 0,51 <math>\mu\text{m}</math>),</p> <p>Bande 3 : (0,53 - 0,59 <math>\mu\text{m}</math>),</p> <p>Bande 4 : (0,64 - 0,67 <math>\mu\text{m}</math>),</p> <p>Bande 5 : (0,85 - 0,88 <math>\mu\text{m}</math>),</p> <p>Bande 6 : (1,57 - 1,65 <math>\mu\text{m}</math>),</p> <p>Bande 7 : (2,11 - 2,29 <math>\mu\text{m}</math>),</p> <p>Bande 8 : (0,50 - 0,68 <math>\mu\text{m}</math>),</p> <p>Bande 9 : (1,36 - 1,38 <math>\mu\text{m}</math>).</p> <p>Capteur TIRS :</p> <p>Bande 10 : (10,6 - 11,19 <math>\mu\text{m}</math>)</p> <p>Bande 11 : (11,5 - 12,51 <math>\mu\text{m}</math>)</p>	<p>Capteur OLI : 30 x 30 m sauf pour la Bande 8 :</p> <p>15 x 15 m</p> <p>Capteur TIRS : 100 x 100</p>



*Tableau 8: caractéristique des images utilisées pour la classification des LULC.*

Images	Date d'acquisition	Satellites	Résolutions (m)	Capteurs	Bandes
1992	12/03/1992	LandSat-5	30 x 30	TM	
2007	09/01/2007	LandSat-7	30 x 30	ETM+	
2022	10/01/2022	LandSat-8	30 x 30	OLI	

### III.3.2. Prétraitements sur les images

Les images satellitaires nécessitent souvent des prétraitements liés à leurs distorsions radiométrique, géométrique ainsi que des corrections atmosphériques. Tout d'abord on a utilisé le logiciel ArcGis 10.2 pour extraire notre zone d'étude dans les scènes correspondantes aux trois images. Les images raster résultantes de cette opération ont été converties en format ASCII pour pouvoir les importer dans le logiciel Idrisi-selva version 17 pour les autres traitements afin d'établir une classification fiable de l'occupation du sol.

#### III.3.2.1. Les corrections atmosphériques

La correction des effets de l'atmosphère sur une image est toujours associée à un étalonnage en grandeurs physiques (réflectances) des comptes numériques, qu'elle complète en vue d'accéder à une propriété physique propre à la surface (Kergomard, 2000). Les images satellitaires sont souvent affectées par les effets atmosphériques de différentes manières. Au niveau moléculaire les courtes longueurs d'ondes sont affectées par la **diffusion de Rayleigh**, ce phénomène peut être observé dans le ciel, qui apparait en couleur bleu à cause de la forte diffusion des longueurs d'ondes situées dans l'intervalle bleu du spectre électromagnétique. A ceci s'ajoute l'absorption des énergies dans certaines longueurs d'ondes par les principales composantes de l'atmosphère telle-que l'oxygène, le dioxyde de carbone, l'ozone et les vapeurs d'eaux (particulièrement les deux derniers). Les aérosols sont les composants primaires de la formation des brumes dans l'atmosphère basse, et les principaux vecteurs de la **diffusion de Mie et de la diffusion non sélective** (qui affectent toutes les longueurs d'ondes de manière égale).

#### 3.2.2. Les méthodes de correction Atmosphériques

Dans cette étude nous avons procédé à des corrections atmosphériques avec les modules de calibration radiométrique, FLAASH (Fast Line of Sight Atmospheric Analysis Hypercubes) et du Dark object substration (DOS) du logiciel ENVI 5.3.

##### III.3.2.2.1. Calibration radiométrique

L'étalonnage permet de donner une interprétation physique à la valeur numérique de chaque pixel de l'image, en la reliant à une grandeur appelée luminance par l'intermédiaire d'un coefficient d'étalonnage absolu (Zemali et al., 2009). Ce traitement permet de corriger la dégradation du signal du capteur par l'application d'une correction linéaire sur les coefficients de calibrage. L'outil calibration radiométrique d'ENVI 5.3 propose deux types d'étalonnage : la radiance et la réflectance.

#### III.3.2.2.2. La radiance

Cette option s'applique à des images qui ont des gains et des décalages pour chaque bande. Ces informations récupérées dans les fichiers métadonnées des capteurs ensuite l'équation ci-dessous est appliquée pour calculer la radiance  $L_\lambda$ :

$$L_\lambda = \text{Gain} \times \text{pixel} + \text{Offset}$$

Gain et offset sont des coefficients de pré-calibration calculés sur terre lors des tests, pixel correspond à la valeur numérique du pixel.

#### III.3.2.2.3. Réflectance

La réflectance du Haut de l'Atmosphère (Top Of Atmosphere « TOA » en anglais) est une mesure sans unité qui calcule le rapport entre le rayonnement réfléchi et le rayonnement solaire incident sur une surface donnée<sup>(2)</sup>. ENVI permet de calculer TOA réflectance si l'image a des gains, des décalages, une irradiance solaire, une élévation du soleil et un temps d'acquisition définis dans les métadonnées ; information qu'il peut lire sur les fichiers métadonnées des images. Les valeurs de sortie varient entre 0 et 1.

Si le fichier d'entrée ne contient pas de métadonnées pour les gains et décalages de réflectance, ENVI calcule la réflectance TOA à l'aide de l'équation suivante<sup>(1)</sup>:

$$\rho_\lambda = \frac{\pi L_\lambda d^2}{ESUN_\lambda \sin \theta}$$

$L_\lambda$  = Radiance en unités de Watt par mètre carré stéradian micromètre ( $W/(m^2 * sr * \mu m)$ )

$d$  = Distance Terre-Soleil, en Unités Astronomiques. (UA).

$ESUN_\lambda$  = Irradiance solaire en unités de Watt par mètre carré stéradian micromètre ( $W/(m^2 * sr * \mu m)$ )

$\theta$  = élévation du soleil en degrés.

#### III.3.2.2.4. Température de Luminosité

Cette option n'est disponible que pour les images thermiques Landsat-8, ETM+ et TM. Les températures de brillance (en Kelvin) sont calculées comme suit<sup>(1)</sup>:

$$T = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L_\lambda} + 1\right)}$$

$K1$  et  $K2$  sont des constantes d'étalonnage, en Kelvin. ENVI lit ces valeurs à partir des métadonnées Landsat.

#### III.3.2.2.5. FLAASH (Fast Line of Sight Atmospheric Analysis Hypercubes)

FLAASH est un module de correction atmosphérique, qui corrige les longueurs d'ondes dans le visible, le proche infrarouge et l'infrarouge à ondes courtes, jusqu'à 3  $\mu m$  à travers son code de transfert de rayonnement MODTRAN. Il existe une panoplie de type d'atmosphère et d'aérosols dans le module MODTRAN dont l'utilisateur peut choisir pour représenter sa scène ensuite une solution MODTRAN unique est calculée pour chaque image. ENVI utilise MODTRAN version 5.2 (MODTRAN5v2r1) <sup>(1)</sup>. Le module FLAASH permet de faire les traitements suivants sur les images satellitaires :

- Correction de l'effet d'adjacence (mélange de pixels dû à la diffusion de l'éclat réfléchi par la surface),

- Une option pour calculer une visibilité moyenne de la scène (quantité d'aérosol/de brume). FLAASH utilise les techniques les plus avancées pour gérer des conditions atmosphériques particulièrement contraignantes, telles que la présence de nuages,
- Carte de classification des cirrus et nuages opaques,
- Polissage spectral réglable pour la suppression des artefacts <sup>(1)</sup>.

Ces traitements sont faits en partant d'une équation standard pour la luminance spectrale de chaque pixel des capteurs optiques (l'émission thermique est négligée) et aux matériaux lambertiens plats ou leurs équivalents. L'équation s'écrit :

$$L = \left( \frac{A\rho}{1 - \rho_e S} \right) + \left( \frac{B\rho_e}{1 - \rho_e S} \right) + L_a$$

Où:

- $\rho$  est la réflectance de surface du pixel
- $\rho_e$  est une réflectance de surface moyenne pour le pixel et une région environnante
- $S$  est l'albédo sphérique de l'atmosphère
- $L_a$  est le rayonnement rétrodiffusé par l'atmosphère
- $A$  et  $B$  sont des coefficients qui dépendent des conditions atmosphériques et géométriques mais pas de la surface.

En résumé la méthode FLAASH consiste à estimer la quantité d'aérosols, de brumes sur les pixels sombres des surfaces terrestres en suivant les observations de Kaufman et al. (1997) d'un rapport presque fixe entre les réflectances pour de tels pixels à 660 nm et 2100 nm. Cette opération est effectuée en faisant une itération des deux équations précédentes sur une plage visible (ex : 17 km à 200 km). Les valeurs moyennes des réflectances de chaque plage visible sont récupérées par l'algorithme sur les longueurs d'onde de 6610 et 2100 nm pour les pixels sombres ensuite on interpole la meilleure estimation de la plage visible en faisant correspondre le rapport au rapport moyen d'environ 0,45 observé par Kaufman et al. (1997). A partir de cette estimation de la portée visible, FLAASH effectue une deuxième et dernière boucle de calcul MODTRAN au-dessus de l'eau <sup>(1)</sup>.

### III.3.3. Méthodologie de la classification des images

Après le prétraitement des images satellitaires on a procédé à la classification des images de nos trois années cibles. Les méthodes empiriques d'identification des objets sur les scènes basées sur les critères d'analyse comme la teinte, la texture et la structure, se sont avérées limitées pour les images de faible ou de moyenne résolution ; de nos jours l'utilisation des valeurs spectrales des pixels est la principale méthode utilisée pour classer les images par traitement numérique (Lawrence et al., 2010 ; Tang, et al., 2013). Cette méthode appelée classification multi-spectrale a l'avantage de rester proche de l'information originelle contenue dans l'image (Masclé, 2003). La méthode de classification utilisée dans cette étude consiste en l'application de cette approche sur notre zone d'étude.

En effet nous avons décidé d'adopter une démarche rétrospective de classification, qui consiste en l'identification préalable de nos classes d'intérêt sur les cartes au 1/50000 d'Algérie, couvrant la wilaya d'Oran. Ces cartes étant réalisées en 1985 nous avons téléchargé une image Landsat-5 de 1985 couvrant notre zone d'étude pour faire une classification basée sur la méthode ML (Maximum Likelihood). Les zones témoins de cette classification ont été extraites de nos cartes de référence dans le logiciel ArcGIS en faisant

une digitalisation polygonale de nos classes correspondantes sur les cartes de références. La carte résultante de cette classification a été comparée aux cartes de référence d'Algérie couvrant notre zone d'étude à l'issue de laquelle nous avons conclu un résultat satisfaisant.

Les réponses de zones témoins ont été utilisées pour classifier nos trois images à l'aide de la méthode ML (Maximum Likelihood). Cette approche de classification et d'analyse diachronique été utilisée avec succès dans les études antérieures sur d'autres zones (Helmi et al, 2007 ; Ahmad, 2012 ; Akoso, 2013).

### *III.3.3.1. Choix et identification des classes à cartographier*

Les cartes de référence que nous avons utilisées pour l'extraction de nos zones témoins comportaient plusieurs classes d'occupations du sol que nous avons regroupées en six classes comme décrites dans le tableau ci-dessous. Les raisons de notre choix pour ces classes, s'explique par leur interconnexion et leurs fortes dynamiques, qui s'effectuent souvent par la dégradation de certaines classes d'occupations avec des impacts négatifs à l'échelle locale et internationale (Yu et al., 2010).

En effet, face à l'urbanisation fulgurante, la dégradation des milieux naturels, la déforestation, et le mitage des zones tampons des zones humides vers l'agriculture et la perte des écosystèmes, nous avons jugé nécessaire d'analyser la dynamique et prédire l'évolution de ces catégories fortement interconnectées et interférées.

*Tableau 9: choix des classes d'intérêts à partir des classes de la carte de référence.*

<b>Classes de la carte de référence</b>	<b>code</b>	<b>Classes d'intérêt</b>
Chotts, lacs, marais, sebkha	1	Plan d'eau
Cours d'eau permanent, temporaire		
Barrages, retenues collinaires		
Terrain saturé d'eau	2	Terrain engorgé d'eau
Arboriculture	3	Agriculture
Céréaliculture		
Maraichage		
Maquis arboré	4	Végétation naturelle
Maquis épars		
Forêts Bois		
Habitats	5	Bâti
Infrastructures		
Equipements		
Sol nu	6	Sol nu

Une librairie spectrale a été établie pour chaque classe pour l'identification et la cartographie des trois années cibles (1992, 2007, 2022).

### *III.3.3.2. Interprétations des signatures spectrales des différentes classes*

L'identification et la classification modernes des images satellitaires sont basées sur la réponse spectrale des objets terrestres. Dans cette section nous allons faire une analyse synthétique de la signature spectrale des zones témoins de nos cinq classes.

### III.3.3.2.1. Les signatures spectrales de l'eau

En raison des contrastes de la signature spectrale de l'eau dus souvent à la concentration de certains éléments biogéochimiques nous avons pris la signature spectrale de différents échantillons de l'eau contrastés. Mais le profil spectral de ces milieux montre des réflectances similaires dans certaines bandes pour nos échantillons. Sur les profils on remarque une réflectance élevée sur les bandes 2 et 3 correspondant respectivement aux bandes Vert et rouge, par contre une décroissance de la réflectance est observée à partir de la bande 4 jusqu'à la bande 6 qui correspondent aux bandes Proche infrarouge et Moyen Infrarouge de Landsat TM-5.

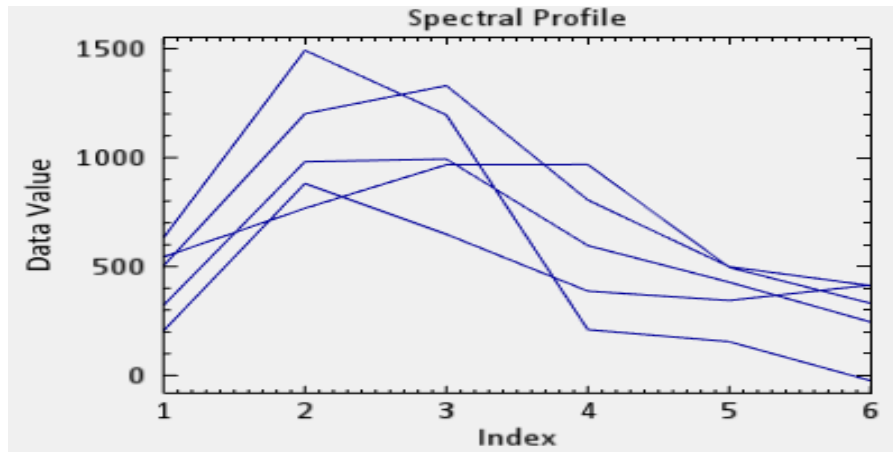


Figure 14: profils spectrales des échantillons pris sur l'eau.

### III.3.3.2.2. Les signatures spectrales de la classe terrain engorgé :

Cette classe est caractérisée par leur saturation en eau et des pics de réflectance dans la bande proche infrarouge, avec des contrastes très élevés dans la bande de l'infrarouge moyen entre certains échantillons de terrains engorgés. Par contre ces échantillons ont des profils qui se corrèlent dans le domaine du visible.

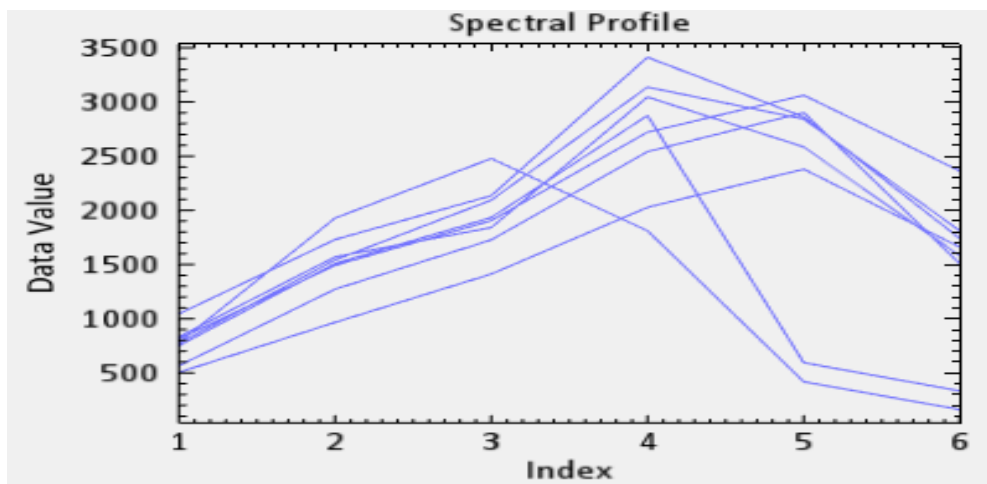


Figure 15: profil spectral des échantillons des terrains engorgés.

### III.3.3.2.3. Les signatures spectrales des Bâti :

La classe bâti regroupe tous ce qui est construction urbaine (habitats, équipements, infrastructures) étant donné que le profil spectral de ces éléments sont un peu contrasté nous avons pris des échantillons des différents éléments pour analyser leurs signatures

spectrales à l'issus de laquelle on a en déduit que ces éléments ont des profils spectraux croissants en partant du visible à l'infrarouge moyen. De plus ces éléments ont des luminances variantes dans les différentes bandes.

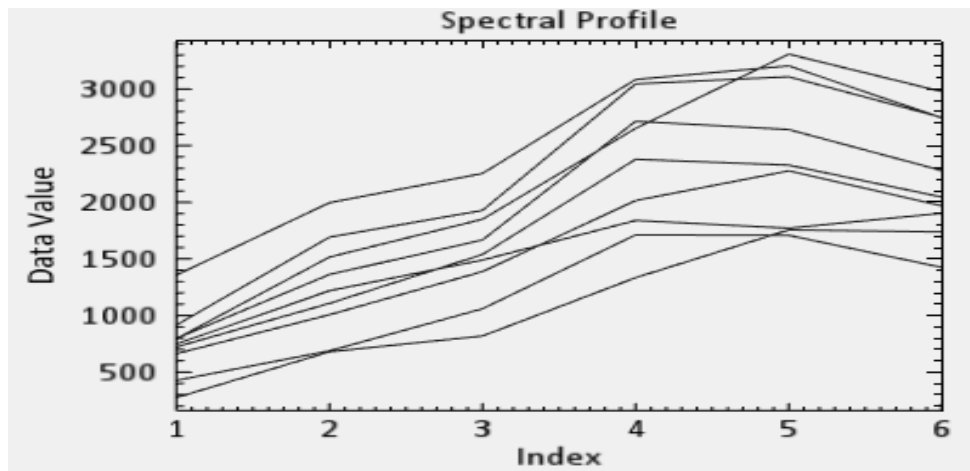


Figure 16: profil spectral des échantillons des bâtis (équipements, infrastructures, habitas).

#### III.3.3.2.4. Les signatures spectrales de forêts :

Cette classe regroupe les forêts denses, les maquis arborés et épars, et d'autres végétations naturelles herbacées comme l'alfa. Ces éléments étant caractérisés par leur forte réflectance dans le proche infrarouge présentent cependant des contrastes au niveau de leur profil spectral. Ces éléments se caractérisent par des faibles réflectances dans les longueurs d'onde de bleu.

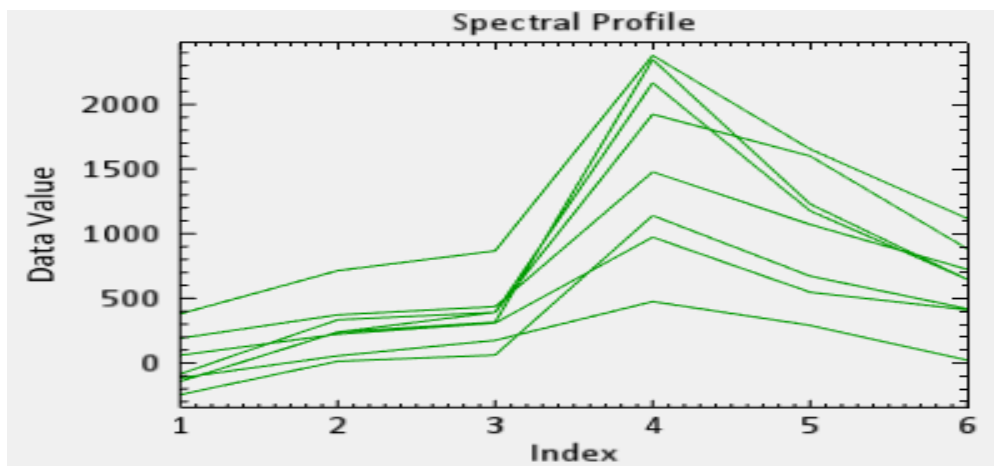
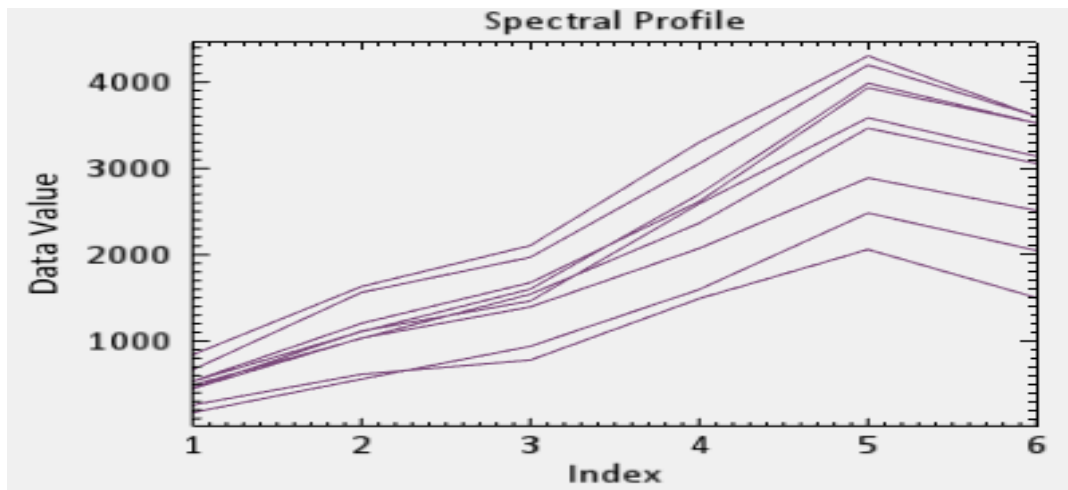


Figure 17: profil spectrales échantillons des forêts (forêts denses, maquis épars et arborés, alfas etc...).

#### III.3.3.2.5. Les signatures spectrales de la classe sol nu

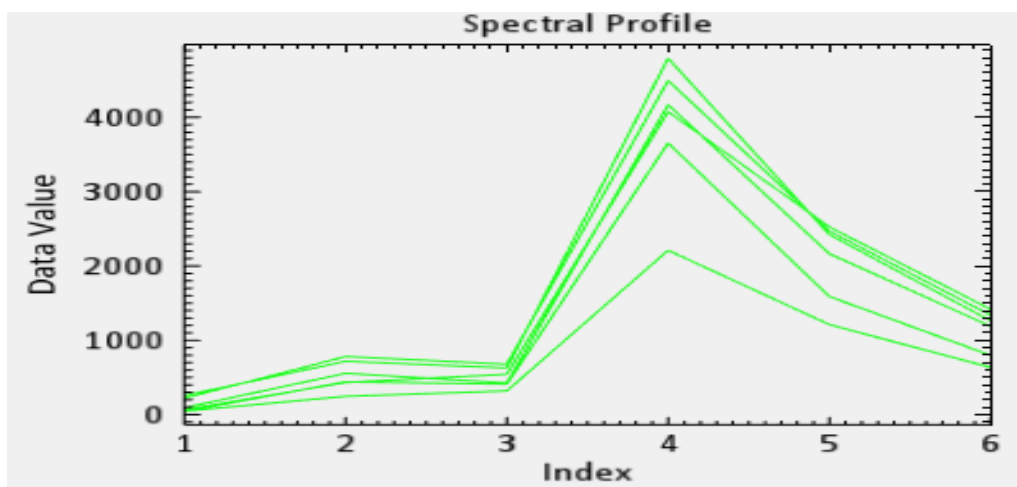
Les sols nus ont un profil spectral croissant comme les bâtis, ils réfléchissent plus les longueurs d'onde situées entre 1,55 et 1,75  $\mu\text{m}$  correspondant aux infrarouges à longue longueur d'onde.



*Figure 18: profil spectral des échantillons de sols nus.*

### III.3.3.2.6. Les signatures spectrales de la classe agriculture

Similairement aux forêts les cultures ont aussi une réflectance forte dans les proches infrarouges, mais la réflectance des cultures dans cette plage de longueur d'onde est supérieure à celle des forêts. Par contre ces deux classes ont le même profil au niveau des longueurs d'onde du Bleu et du vert avec des DN (Digital Number) avoisinant les 500 pour une composition colorée des bandes 2,4 et 5.



*Figure 19: profil spectral des échantillons de culture.*

### *III.3.3.3. Choix de la méthode classification*

Avec l'avancée de la technologie des informations, de nombreuses méthodes de classification, issues du monde de l'intelligence artificielle, ont été développées avec des bases mathématiques et algorithmiques différentes. Ces méthodes de classification peuvent être divisées en deux groupes : **les méthodes d'apprentissage supervisé et les méthodes d'apprentissage non supervisé** :

#### III.3.3.3.1. Classification par apprentissage supervisé

La classification supervisée peut être définie de manière informelle comme le processus d'utilisation d'échantillon identifié (c'est-à-dire les pixels déjà affectés à des classes d'information) pour classer les pixels non identifiés (c'est-à-dire attribuer des pixels non

classés à l'une des nombreuses classes d'informations) (Campbell et Wynne, 2011). Cette méthode de classification implique un processus d'apprentissage du logiciel à faire la distinction des différentes classes prédéfinies par l'utilisateur avec certains d'autres paramètres tels-que la définition des seuils de probabilité (méthode ML) ou d'angle spectral (méthode SAM) (Reddy, 2008). Plusieurs méthode de classification ont été développées tels-que les méthodes SAM (Spectral Angle Mapper), ML (Maximum Likelihood), MD (Mahalonabis Distance).

Dans cette étude nous avons opté pour la méthode ML pour classifier nos trois images. Cette méthode a été utilisée avec des résultats satisfaisants pour la classification des images Landsat ainsi que d'autres images issues d'autres satellites (Ahmad, 2012 ; Helmi, Affendi et Mansor, 2007). La génération des résultats non satisfaisant avec la méthode SAM en est aussi une raison d'orientation de notre choix vers la méthode ML.

### III.3.3.3.2. Classification par apprentissage non supervisé

Ces méthodes de classification se basent sur la réponse spectrale des pixels pour classifier l'image en un certain nombre de classes. Plusieurs méthodes appartenant dans la catégorie des classifications non supervisées ont été développées tel-que la méthode ISO data.

L'algorithme ISO data calcule les moyennes des classes uniformément réparties dans l'image pour faire une première discrétisation des classes. Puis il classe les pixels restant de manière itérative à l'aide de la méthode de la distance minimale. Chaque itération recalcule les moyennes et reclasses les pixels par rapport aux nouvelles moyennes des classes. Le fractionnement, la fusion et la suppression itérative des classes sont effectuées en fonction des paramètres de seuil d'entrée. Tous les pixels sont classés dans la classe la plus proche, sauf si un écart type ou un seuil de distance est spécifié, auquel cas certains pixels peuvent être non classés s'ils ne répondent pas aux critères sélectionnés <sup>(3)</sup>. Ce processus de reclassification des pixels se poursuit jusqu'à ce qu'il soit en dessous du seuil de changement de pixel ou que le nombre d'itération maximal soit atteint (Tou et Gonzalez, 1974).

### *III.3.3.4. La méthode du Maximum de Vraisemblance (Maximum Likelihood) :*

La méthode ML est une classification supervisée basée sur la probabilité Bayésienne, elle utilise les classes d'apprentissage pour estimer la moyenne et la covariance des classes qui seront utilisée pour estimer les probabilités d'appartenance des pixels à une classe donnée (Akosso, 2013). La méthode de classification ML avec des données d'apprentissages précises est la méthode qui génère plus de classification précise (Reddy, 2008). Les probabilités d'appartenance des pixels à une classe sont calculées à partir de la formule suivante :

$$g_i(x) = \ln p(i | \omega) = - \mathbf{1}/2 \ln |\Sigma_i| - \mathbf{1}/2 (x - m_i)^T \Sigma_i^{-1} (x - m_i)$$

- $i$  = classe
- $x$  = données à n dimensions (où n est le nombre de bandes)
- $p(\omega_i)$  = probabilité que la classe  $\omega_i$  apparaisse dans l'image et soit supposée la même pour toutes les classes
- $|\Sigma_{je}|$  = déterminant de la matrice de covariance des données de la classe  $\omega_i$
- $\Sigma_i^{-1}$  = sa matrice inverse
- $m_i$  = vecteur moyen



### III.3.4. Validation de la classification

Pour valider notre classification nous avons calculé la matrice de confusion de la classification de références (classification de l'image de 1985) qui était basée sur les cartes de références. En effet les régions d'apprentissage de l'image de 1985 ont été extraites des cartes d'Algérie au 1/50000 couvrant la Wilaya d'Oran. Nous avons choisi ces cartes comme vérité terrain parce qu'elles ont été réalisées avec des photographies aériennes de hautes résolution, (facilitant l'identification des différents types d'occupation du sol) et ont été validées sur la base des relevés de terrain. La validation de la carte d'occupation de référence, nous donne une hypothèse de validité de la classification des trois images de nos trois dates cibles (1992, 2007, 2022), puisque les cartes d'occupations de ces trois dates ont été réalisées sur la base de la réponse spectrale des régions d'intérêt de la carte de référence.

*Tableau 10: Matrice de confusion de la classification de 1985 en pixel.*

classes	eau	Terre engorgée	Sol Nu	Forets	Culture	Bâtis	Total	commissions
Eau	27238	4122	0	5	0	0	31365	4127
Terre engorgée	1475	10185	0	11	3	2	11676	1491
Sol Nu	124	10	5540	4972	107	14	10767	5227
Forets	70	105	173	45081	189	42	45660	579
Culture	56	14	615	10394	1157	13	12249	11092
Urbain	664	430	142	3074	6	597	4913	4316
Vérité Terrain	29627	14866	6470	63537	1462	668	116630	
omissions	2389	4681	930	18456	305	71		

*Tableau 11: Matrice de confusion de la classification de 1992 en pixel.*

Classes	Eau	Terre engorgée	Sol nu	Bâti s	Forets	Culture s	Total	commission s
Eau	27495	1083	34	0	30	0	28642	1147
Terre engorgée	11277	13046	327	0	53	0	24703	11657
Sol nu	215	37	18146	0	1266	0	19664	1518
Bâtis	1	0	1023	353	146	0	1523	1170
Forets	1430	1120	20503	7	152878	0	175938	23060
Cultures	0	0	702	0	1261	1160	3123	1963
Vérité Terrain	40418	15286	40735	360	155634	1160	253593	
omissions	12923	2240	22589	7	2756	0		

*Tableau 12: Matrice de confusion de la classification de 2007 en pixel.*

classes	Eau	Terre engorgée	Sol Nu	Forets	Cultures	Bâtis	Total	commissions
Eau	27458	2073	0	117	0	0	29648	2190
Terre engorgée	834	12241	10	84	0	4	13173	932
Sol Nu	138	276	5499	3078	273	9	9273	3774
Forets	1110	202	177	51948	173	31	53641	1693
Culture	53	4	755	7639	1002	1	9454	8452
Bâtis	34	70	29	671	14	623	1441	818
Vérité Terrain	29627	14866	6470	63537	1462	668	116630	
omissions	2169	2625	971	11589	460	45		

*Tableau 13 : matrice de confusion de la classification de 2022 en pixel.*

Classes	Terre engorgée	Eau	Sol nu	Forets	Cultures	Bâtis	Total	commissions
Terre engorgée	14363	699	0	0	0		0	699
Eau	121	28849	0	58	0		0	179
Sol nu	115	16	5052	418	4	3	5608	556
Forets	43	56	47	58812	8	0	58966	154
Cultures	1	0	309	2373	3274	0	5957	2683
Bâtis	104	7	3	599	17	1018	1748	730
Vérité Terrain	14747	29627	5411	62260	3303	1021	116369	
omissions	384	778	359	3448	29	3		

*Tableau 14: Résultat de la Matrice de confusion des classifications.*

Indicateurs	1985	1992	2007	2022
Qualité classification	76,99%	80,64%	84,69	95,70%
Total Omission	23%	15,98 %	15,31 %	4,29%
Total Commission	23%	15,98 %	15,31	4,29%
Indice Kappa	0,67 « = » 67%	0,69 « = » 69%	0,77 « = » 77 %	0,93 « = » 93%

Les formules ci-dessous ont été appliquées pour calculer les trois indicateurs, informant la qualité de la classification :

**qualité classification** = (nbre bien classé/Total terrain) × 100

**total omission** = (Total omission/Total Terrain) × 100

**total commission** = (Total commission/Total Terrain) × 100

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^n m_{i,i} - \sum_{i=1}^n (G_i, C_i)}{N^2 - \sum_{i=1}^n (G_i, C_i)}$$

- Avec  $i$  = classe
- $K$  indice de Kappa
- $N$  est le nombre total de valeurs classées par rapport aux valeurs de vérité
- $m_{i,i}$  est le nombre de valeurs appartenant à la classe de vérité  $i$  qui ont également été classées dans la classe  $i$  (c'est-à-dire les valeurs trouvées le long de la diagonale de la matrice de confusion)
- $C_i$  est le nombre total de valeurs prédites appartenant à la classe  $i$
- $G_i$  est le nombre total de valeurs de vérité appartenant à la classe  $i$

La classification basée sur la réponse spectrale des objets ne produit pas une classification correcte à 100% comme celle des méthodes empiriques, en effet les réponses spectrales de certains objets sont similaires de près dans certaines régions du spectre électromagnétique, cette similarité est souvent dûe aux contraintes atmosphériques qui a des effets de diffusion ou d'absorption sur l'énergie émise par le soleil et celle réfléchié par la surface terrestre. Cette similarité produit souvent des confusions entre certaines classes pour les algorithmes de classification. Pour pallier à ce problème, des néo-canaux peuvent être créés en faisant des opérations (additions, soustraction, multiplication, division) sur les valeurs spectrales des pixels pour réduire cette similarité telles que les indices de végétation (NDVI) et d'humidité (NDWI). Des simples corrections peuvent souvent réduire considérablement ces confusions. Dans cette étude le recours aux néo-canaux n'a pas été nécessaire pour la classification de nos images ; les corrections atmosphériques effectuées sur ces dernières lors des prétraitements nous a permis de bien distinguer nos classes d'intérêts. Mais par contre comme toute classification on a élaboré une matrice de confusion pour évaluer la qualité de la classification de nos images.

La matrice de confusion évalue la qualité de la classification en comparant les pixels de réalité terrain des différentes classes après classification. Cette méthode consiste à vérifier si les pixels de réalité terrain des différentes classes sont restés dans leurs classes respectives après la classification. La matrice révèle les pixels omis et commis de chaque classe, ces données sont en pourcentages. Une classification avec un pourcentage total de 70 % est acceptable. La qualité globale de la classification de notre carte de référence est de 76%, de ce fait on pourrait dire que notre classification de référence est valide. Les commissions et les omissions de la classification sont toutes les deux de 23%.

Les omissions représentent les pixels manquant d'une classe, quant aux commissions, elles représentent les pixels qui ont été classés dans une classe différente de leurs classes d'origine. L'indice Kappa calculé avec la formule ci-dessous a donné une valeur de 0,67, ceci vient de confirmer la qualité de la classification révélé par la matrice de transition. Cet indice mesure l'accord entre la classification et les valeurs de la réalité terrain. Une valeur kappa de 1 représente un accord parfait, tandis qu'une valeur de 0 ne représente aucun accord <sup>(4)</sup>.

### III.3.5. Choix et préparation des variables explicatives

La création des cartes potentielles de transition par la régression logistique nécessite des variables explicatives qui seront des variables indépendantes pouvant expliquer la variation du changement d'occupation sol. Cependant cette étape est cruciale dans la construction du modèle puisque c'est ces variables qui détermineront les probabilités de transition de chaque classe d'un pixel vers une autre. Dans cette étude nous avons utilisée neuf variables explicatives : *altitude, pente, distance aux routes, distance aux zones urbaines, distance aux zones humides, l'hydromorphie (réalisé avec l'indice CTI), la microtopographie, les types de sol, les potentiels agricole (réalisés avec la méthode AHP)*. Ces variables sont des cartes réalisées sous le logiciel ArcGIS. La réalisation des cartes de certaines variables ont nécessitées des méthodes analytiques. Le tableau ci-dessous présente les données et les méthodes utilisées pour la réalisation de ces différentes cartes.

*Tableau 15: listes des variables explicatives utilisées dans la régression Logistique et dans les MLP.*

Variables explicatives	Sources de données	Type de données	Résolution	Méthode utilisée
Altitude	EarthExplorer r USGS.gov	DEM	30 x 30	Fuzzy Membership
Pente		DEM	30 x 30	Slope outil and Fuzzy Membership
Distance aux zones urbaines		Carte d'occupation de 1992	30 x 30	Euclidian Distance and Fuzzy Membership
Hydromorphie		DEM	30 x 30	Coupon Index Topographic (CTI)
Microtopographie		DEM	30 x 30	Hydrological Modeling
Distances aux routes	Site Mapcruzin	vectériel	30 x 30	Euclidian Distance and Fuzzy Membership
Distances aux zones humides	Google Earth	vectériel	30 x 30	Euclidian Distance and Fuzzy Membership
Type de sol	Site ESDAC	Carte des types de sol de Durand (1992)	30 x 30	Digitalisation et rasterisation
Potentiel Agricole			30 x 30	Analytical Hierarchy Process (AHP)

La réalisation des cartes *de pente et d'altitude* a été faite à partir du DEM de 30m de résolution, téléchargé sur le site Earth Explorer de USGS ; ensuite on a fait une fuzzification pour standardiser les altitudes et les pentes. Quant aux cartes *de distance aux routes, aux zones urbaines et aux zones humides* elles ont été réalisées à partir de l'outil distance euclidienne d'Arc Gis. *La carte des types de sol* a été réalisée à partir de la carte pédologique de Durant et Barbut (1952) par digitalisation et rastérisation. La carte de microtopographie a été réalisée en faisant un capture de point d'écoulement sur le réseau hydrographique pour ensuite délimiter les micros cuvettes susceptible d'accumuler les eaux drainées par les réseaux hydrographiques environnants. Quant à la carte d'hydromorphie, elle exprime la capacité de drainage d'un terrain compte tenu de ses caractéristiques physiques. Cette carte a été réalisée à l'aide de l'indice Topographique composé (CTI) de (Moore et al., 1991), qui s'écrit sous la forme d'équation suivante :

$$\ln(a/\tan(\beta))$$

Avec :

- $a$  représentant la zone de chalandise par pixel
- $\beta$  faisant référence à la pente en radian.

L'équation ci-dessus ne précise pas si la pente est exprimée en radians ou en degrés. Il peut être utile de convertir la pente DEM en radians (Gessler et al., 1995). En plus si la résolution du DEM est assez grossière il faudrait la convertir en As. Les étapes ci-dessus pour réalisation de la carte d'hydromorphie :

- Remplissage des vides du DEM,
- Calcul de la direction et l'accumulation des flux,
- Conversion de  $a$  en AS avec l'équation suivante :

$$As = (\text{accumulation de flux} + 1) \times \text{Resolution du DEM}$$

- Conversion de la pente en radian avec l'équation ci-dessus :

$$rad(\beta) = (\beta \times 1,570796) / \text{resolution du DEM}$$

Les valeurs les plus élevées du **CTI** représentent les zones à grandes capacité de drainage avec des taux teneur important, contrairement aux valeurs faibles qui représentent les faibles des teneurs en eaux.

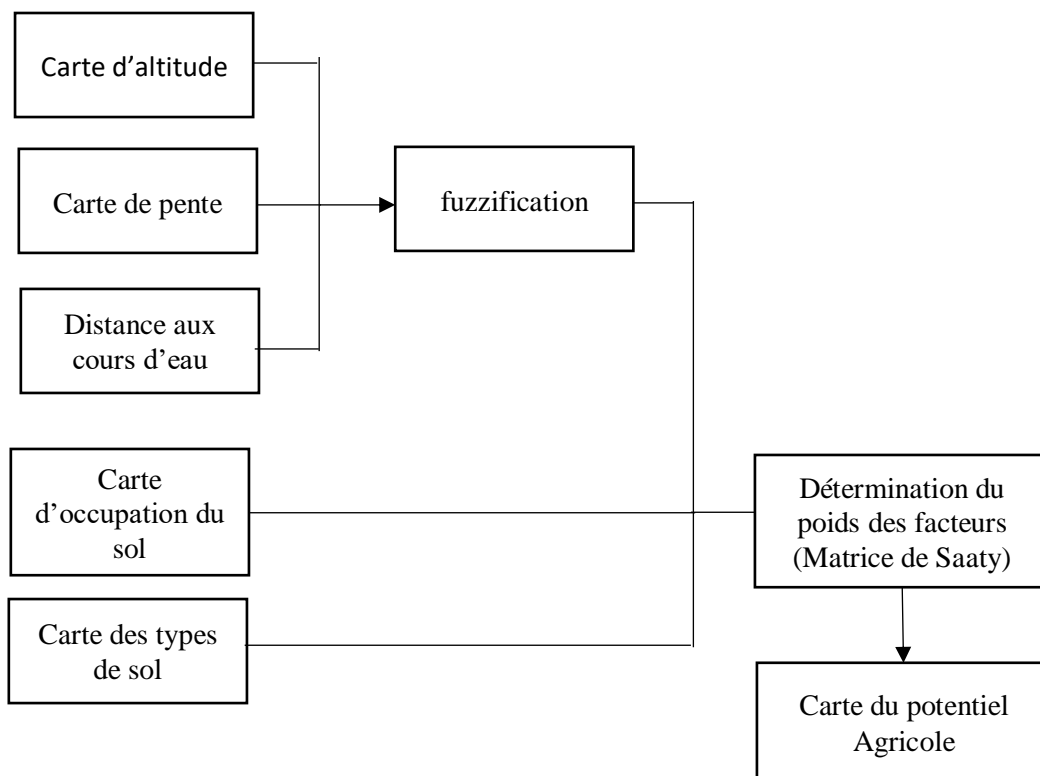
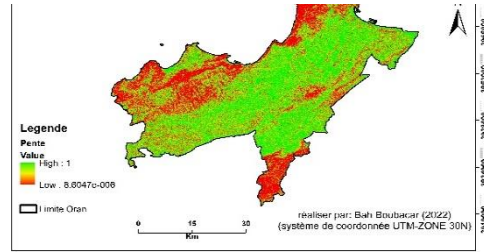
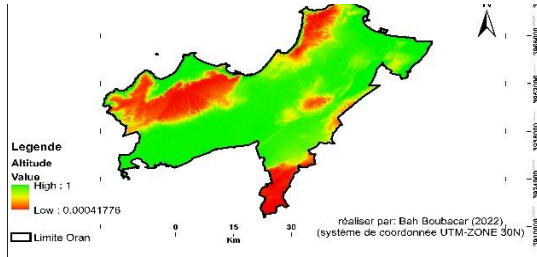


Figure 20: Etapes de réalisation de la carte du potentiel agricole d'Oran

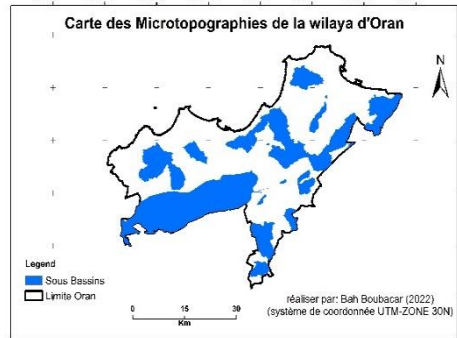
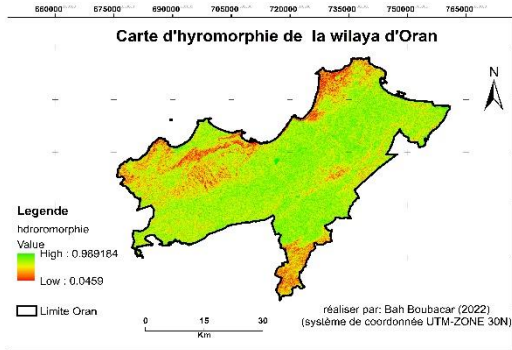
Quant à la dernière carte, elle correspond à la carte du potentiel agricole, elle a été réalisée avec la méthode AHP (Analytical Hierarchy Process) en combinant un certain nombre de facteurs déterminant la productivité d'un sol à l'aide de la matrice de Saaty (1980). La matrice de Saaty est une méthode d'aide à une prise de décision multicritère. Le schéma ci-dessus résume les grandes étapes de la réalisation de cette de potentialité agricole.

**Figure 21: schémas explicatifs des étapes de la réalisation de la carte du potentiel agricole.**



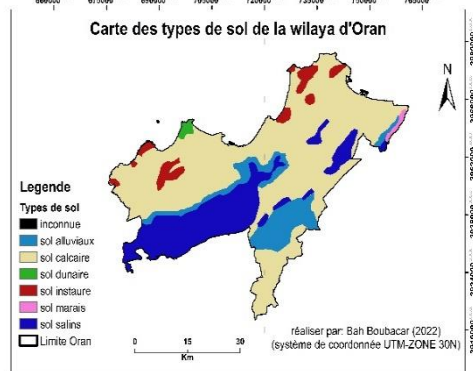
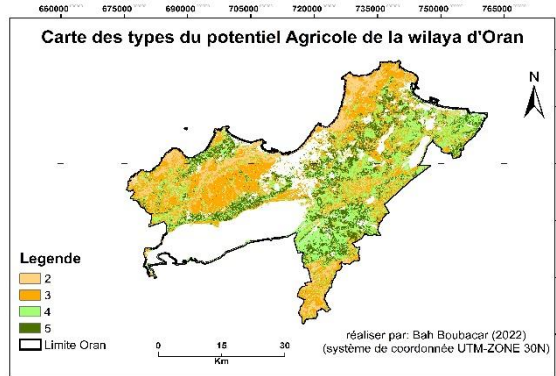
**Figure 22: carte d'altitude.**

**Figure 23: carte des pentes**



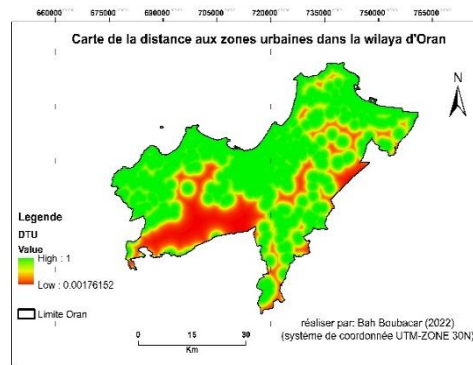
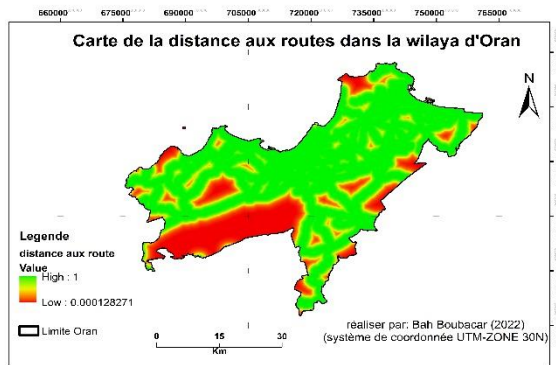
**Figure 24: carte d'hydromorphie**

**Figure 25: carte des microtopographies**



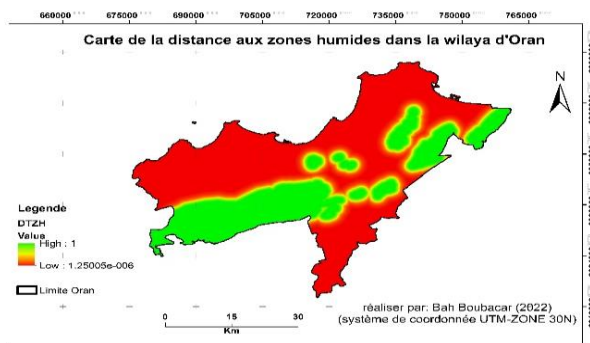
**Figure 26: carte du potentiel agricole**

**Figure 27: carte des types de sol.**



**Figure 28: carte des distances aux routes.**

**Figure 29: carte des distances aux zones urbaines.**



*Figure 30: carte de distance aux zones humides*

### III.4. Modélisation et simulation de l'évolution des ZH

Dans cette section nous allons construire deux modèles hybrides de simulation de l'évolution des zones humides de la wilaya d'Oran avec les CA-Markov-LR et avec les CA-Markov-MLP. Grâce à la régression Logistique nous allons calculer les probabilités de transition entre chaque classe. Etant donné que la régression Logistique ne prend pas en compte la spatialité des classes, les CA-Markov seront utilisés pour l'aspect spatial avec un voisinage de 3x3.

#### III.4.1. La régression Logistique

La régression logistique est une méthode statistique utilisée pour décrire la relation existante entre une variable dépendante appelée **variable à expliquer** et une ou plusieurs variables indépendantes appelée **variable explicative**. Cette méthode est généralement utilisée quand la variable à expliquer est de type qualitatif contrairement à son homologue (régression linéaire) qui est utilisée quand la variable à expliquer est de type quantitatif. Quand la variable à expliquer est de deux modalités on utilise la régression logistique binomiale par contre si celle-ci comporte plus de deux modalités mais qui ne sont pas ordonnées on utilise la régression logistique polychotomique nominale ; si les modalités de la variable explicative sont ordonnées on utilise la régression polychotomique ordinaire <sup>(5)</sup>. Tout ce type de régression fournit des probabilités de variabilité de la variable à expliquer en fonction de la variabilité des variables explicatives. Cette probabilité est comprise entre 0 et 1 ; 1 étant la plus forte probabilité de changement et 0 la plus faible.

Dans cette étude nous avons jugé judicieux d'appliquer la régression logistique binominale pour estimer les probabilités de transition entre nos différentes classes d'intérêt. L'avantage d'utiliser ce type de régression est qu'il offre la possibilité d'estimer la probabilité de changement entre chaque classe par rapport à toutes les autres classes, c'est-à-dire elle estime les probabilités de toutes les combinaisons possibles des classes de la variable à expliquer (ex : une carte avec cinq classes, fournit 25 (5 x 5) probabilités de transition quand on applique la régression logistique).

Dans le logiciel Idrisi la régression logistique qu'on utilise pour l'estimation des probabilités de transition entre les classes est calculée avec la formule suivante :

$$p(y_i = 1|X) = \frac{\exp(\sum \beta X)}{1 + \exp(\sum \beta X)}$$

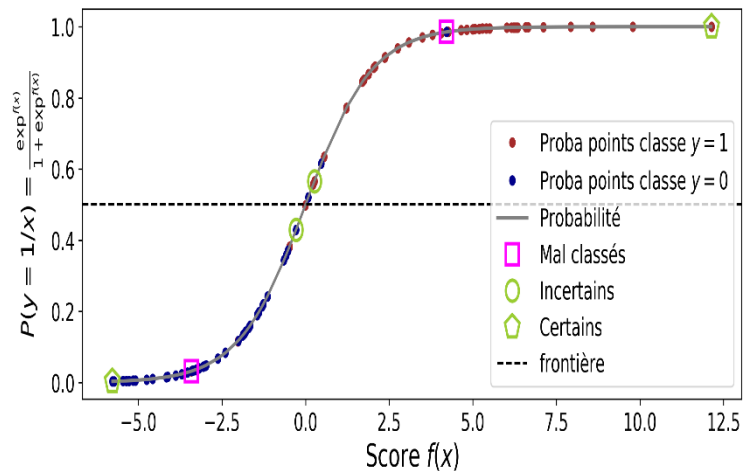


Figure 31: la courbe sigmoïdale de la régression logistique (src : <https://openclassrooms.com/fr/courses/5264666-appliquez-l-apprentissage-statistique-aux-objets-connectes/5361331-passez-de-la-regression-lineaire-a-la-regression-logistique>).

Avec :

- **P** la probabilité que classe y change vers une autre classe c'est être 1;
- **X** sont les variables explicatives ( $x_0, x_1, x_2, x_3, x_k$ ),  $x_0 = 1$
- **$\beta$**  Sont les paramètres à estimer ( $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_k$ )

Les coefficients  **$\beta$**  des variables explicatives sont estimés avec la méthode du maximum de vraisemblance qui s'effectue avec la formule suivante :

$$L = \prod_1^n \pi_i^{y_i} \times (1 - \pi_i)^{(n-y_i)}$$

- Avec :  $n = 1$

L = est Maximum de vraisemblance

$\pi_i$  Réprésente la probabilité que la classe i soit 1, il est calculé avec la formule ci-dessus.

Pour estimer les paramètres  **$\beta$**  avec le Maximum de Vraisemblance on calcule les valeurs des  **$\beta$**  qui annule les dérivées partielles des paramètres  **$\beta$**  en faisant introduire la fonction ln à la formule du ML ci-dessus, qui deviendra ainsi :

$$\ln L(y = 1|X) = \sum_i y^i \ln \pi_i - (n - y_i) \ln(1 - \pi_i)$$

**X** représente la matrice avec des colonnes et des lignes qui contiennent les valeurs des classes d'intérêts des images classifiées des variables à expliquer et celles des variables explicatives.

Le logiciel Idrisi utilise l'algorithme de *Newton-Raphson* pour trouver les valeurs des paramètres  **$\beta_i$** .

L'approche de la régression logistique binominale dans le logiciel nous fournis des cartes de probabilité de transition entre chaque classe avec toute les combinaisons possibles dans notre cas on obtiendra 25 (5 x 5) carte de probabilité de transition vu qu'on a cinq classes



d'intérêt. Le résultat de l'analyse LR dans le LCM donne un ensemble de cartes de transition potentiel qui indique le degré d'adéquation d'un pixel spatial pour qu'une transition donnée ait lieu. Les cartes de transition potentielle sont ensuite données en entrée à l'algorithme de CA-Markov (Eastman, 2015; Mas et al., 2014). Cette approche d'estimation des probabilités de transition entre les classes a été largement utilisée dans des études précédentes dont nous avons mentionné dans chapitre II (section II.3.c.).

### III.4.2. Les perceptrons Multicouches (Réseaux de Neurones)

Un perceptron multicouche est un réseau de neurone à action directe qui génère des probabilités de prédiction ou de classification à partir d'un ensemble de données d'entrée. Un MLP est composé de trois type de couches : *les couches d'entrées de sortie et cachés*. Chaque couche est composée d'un ou plusieurs nœuds appelé « *neurone* » en fonction des modalités de la couches d'entrée et de sortie de la couche de sortie.

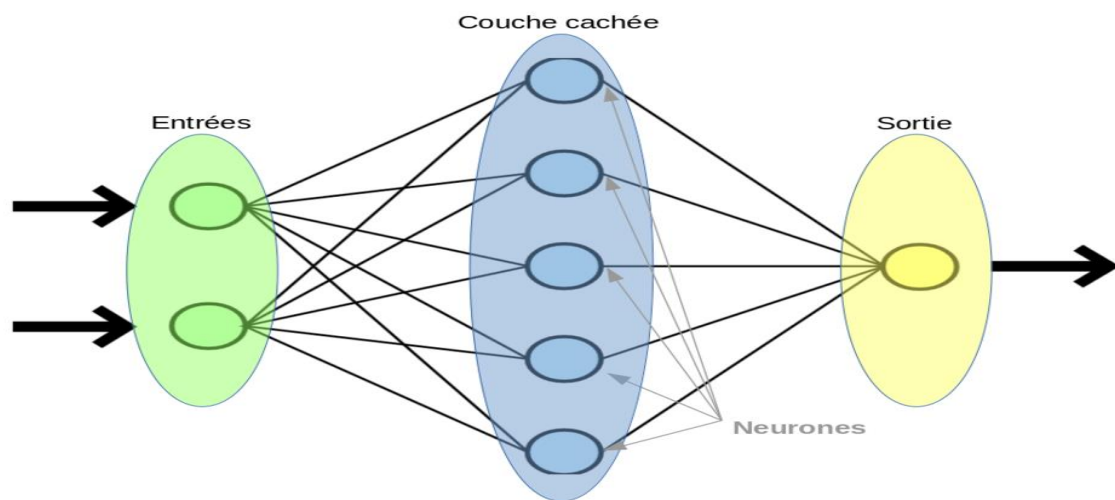


Figure 32: l'architecture d'un réseau de neurone multicouche (src : <https://bloomagazine.home.blog/2019/02/06/fonctionnement-du-perceptron-multicouche/>).

Les nœuds sont connectés par des vecteurs lignes pondérés avec des poids qui sont initialisés aléatoirement. La couche de sortie du MLP est une somme pondérée qui est entrée dans la fonction d'activation pour introduire la non linéarité dans la fonction Y, avec la formule suivante :

$$\hat{y} = f\left(\sum_{i=1}^n w_i x_i + b\right)$$

Avec

- $\hat{y}$  La variable dépendante prédite
- F la fonction d'activation
- $w_i$  Le poids des variables d'entrées
- $x_i$  La variable d'entrée
- $b$  la constante qui est généralement égale à 1.

L'optimisation des poids de chaque variable se fait avec la technique de la rétro-propagation en utilisant la descente du gradient pour trouver le convergé vers le minimum global

$$w_{new} = w_{old} - \eta \frac{\partial E}{\partial w_i} \quad \ll == \gg \quad w_{new} = w_{old} - \eta h_i(y - \hat{y})$$

- $w_{new}$  Le nouveau poids de la variable d'entrée
- $w_{old}$  L'ancien poids de la variable d'entrée
- $\eta$  La vitesse d'apprentissage « rate »
- $w_i$  Le poids i
- $h_i$  La couche cachée
- E la fonction d'erreur dont la formule s'écrit :

$$E = \frac{1}{2} (y - \hat{y})$$

### III.4.3. Les chaines de Markov

Le module Chaines de Markov d'Idrisi a été utilisé pour calculer les probabilités de transition entre la période 2007 et 2022, pour pouvoir ensuite être implémentées dans le module CA-Markov avec les surfaces de transition générée par la Régression Logistique et les MLP pour la période 1992-2007.

Pour calculer la probabilité de transition entre chaque catégorie le module fait d'abord un croisement des tableaux de superficie de chaque catégories pour les deux dates pour obtenir une matrice des surfaces transitées entre les deux dates ensuite il calcule les probabilités de transition avec la formule suivante :

$$MST = \begin{matrix} i & [S_{ii} & S_{ji}] \\ j & [S_{ij} & S_{jj}] \end{matrix}$$

Avec

- **MST** Matrice de Transition en surface
- $S_{ij}$  Surface transitée de la classe i vers la classe j entre les deux dates

$$P_{ij} = \frac{S_{ij}}{TLS_i}$$

Avec

- $P_{ij}$  Comme probabilité de transition de la classe i vers la classe j
- $TLS_i$  Total ligne de la surface de la classe i.

*Tableau 16: probabilité de Transition entre les différentes classes produit par les chaines de Markov.*

Classes	Zones humides	Agricultures	Sols nus	Bâtis	Forêts
Zones humides	0.5122	0.0068	0.431	0.0336	0.0165
Agricultures	0.0012	0.4947	0.2301	0.0549	0.2191
Sols nus	0.0038	0.4371	0.3744	0.0898	0.0948
Bâtis	0.0048	0.1358	0.0759	0.6442	0.1393
Forêts	0.0102	0.2635	0.0959	0.0743	0.5562



### III.4.4. Les automates cellulaires et les chaînes de Markov (CA-Markov)

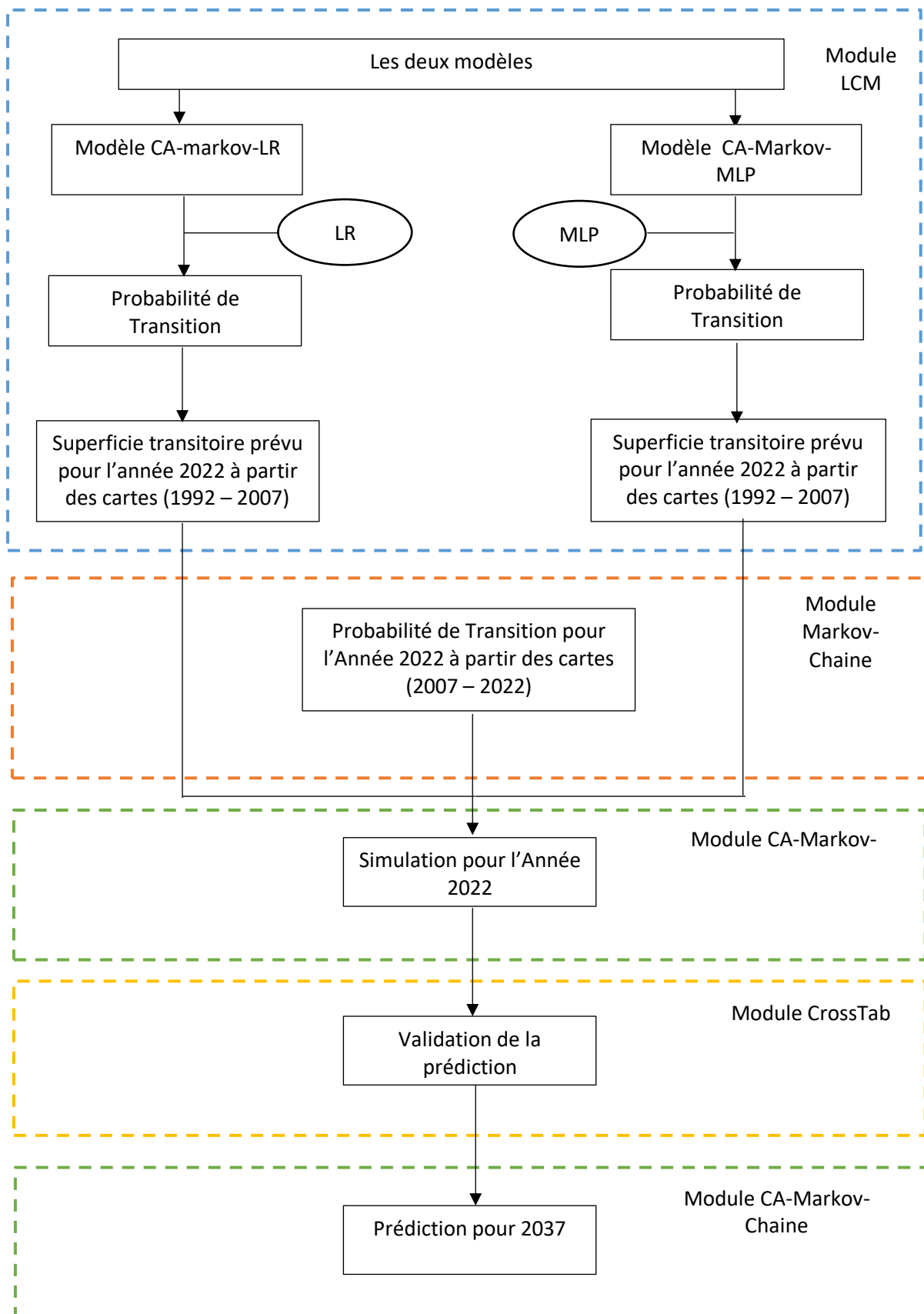


Figure 33: les processus de conception des deux modèles (CA-Markov-LR ; CA-Markov-MLP) (Nb : les rectangles en noir indiquent les données d'entrées et de sorties, les rectangles en tirets indiquent les différents modules utilisés pour chaque étape et les cercles

Cette technique étant détaillée dans le 2<sup>ème</sup> chapitre, dans cette section nous allons nous focaliser sur la procédure algorithmique de ce module dans notre modèle de prédiction. En raison de la tendance irrégulière de l'évolution de la dynamique de l'occupation du sol de notre zone d'étude, le module LCM d'Idrisi n'a pas pu nous fournir des cartes de probabilité de transition capable de produire un modèle satisfaisant pour notre prédiction. Donc nous avons eu recours au module CA-Markov afin d'introduire les tendances d'évolution des deux périodes (1992-2007 ; 2007-2022) dans notre modèle, ce qui nous a permis de produire un modèle avec de résultat satisfaisant.

L'expression mathématique derrière le module CA-Markov s'écrit de la manière suivante (Kafy et al., 2021; Wang et al., 2021) :

$$S_{t,t+1} = P_{ij} \times S_t$$

Où  $S_t$  exprime l'état de l'automate à l'instant  $t$  et  $S_{t+1}$  à l'instant  $t+1$  et  $P_{ij}$  la probabilité de transition à l'instant  $t$  calculée par les chaînes de Markov avec la l'équation donnée dans la section précédente. Le schéma ci-dessus explique les procédures de conception des deux modèles.

## III.5. Validation des deux modèles

### III.5.1. Validation de la régression Logistique

Pour la validation de ce modèle nous avons utilisé la courbe de ROC (Receiver Operating Characteristic) ou l'AUC (Area Under the Curve) pour valider d'abord les 20 sous modèles de transition générées par la régression logistique. Implémenté dans le module LCM, le ROC mesure l'exactitude de la prédiction produit par la régression Logistique en comparant les données prédites aux données observées d'un échantillon (Mas, Filho, Pontius, Gutiérrez, & Rodrigues, 2013). Une valeur de ROC de 0,7 à 0,8 indique un modèle acceptable, une valeur de 0,9 indique un modèle parfait (Lin et al., 2011). Par contre une valeur de 0.5 à 0,6 indique un modèle acceptable mais dont la prédiction est dû au hasard (Egan, 1975; Pontius, et Schneider, 2001). Le ROC ou la surface sous la courbe (AUC) combine le Taux de vrai positif (sensibilité) et de faux positif (spécificité) pour certain nombre de seuil, pour calculer l'AUC avec la formule suivante :

$$AUC = \sum_{i=1}^n [x_{i+1} - x_i] \times [y_i + (y_{i+1} - y_i)/2]$$

Avec :

- **AUC** = surface sous la courbe,
- $x_i$  Les faux positifs (spécificité) pour le seuil  $i$
- $y_i$  Les vrais positifs (sensibilité) pour le seuil  $i$

*Tableau 17: Résultats du ROC des différentes sous modèles.*

<b>Les sous modèles des différentes Transitions possibles</b>	<b>ROC</b>
Zones humides à Agriculture	0,98
Zones humides au Sols nus	0,96
Zones humides aux Bâtis	0,95
Zones humides au Forêts	0,94
Agricultures aux Zones humides	0,69
Agricultures aux Sols nus	0,61
Agricultures aux Bâtis	0,86
Agricultures aux Forêts	0,56
Sols nus aux Zones humides	0,74
Sols nus à l'Agriculture	0,86
Sols nus aux Bâtis	0,86
Sols nus aux Forêts	0,58
Bâtis aux Zones humides	0,82
Bâtis aux à l'Agriculture	0,89
Bâtis aux Sol nus	0,74
Bâtis aux Forêts	0,75
Forêts aux Zones humides	0,79
Forêts à l'Agriculture	0,71
Forêts aux Sols nus	0,73
Forêts aux Bâtis	0,84

### III.5.2. Validation du modèle CA-Markov-LR

Après la validation de la régression Logistique on a implémenté le module CA-Markov par la matrice de transition des surfaces générées par le LR combiné aux probabilités de transition générée par les chaines Markoviennes pour faire une simulation de l'occupation pour l'année 2022. Pour valider cette simulation on a utilisé l'indice de Kappa développé par Pontius et al. (2004). cet indice est couramment utilisé pour évaluer la précision d'une classification correcte de l'image satellitaire (Pontius et al., 2004). L'indice se calcule avec la formule suivante :

$$k = \frac{(P_o - P_c)}{(P_p - P_c)}$$

Avec

- $P_o$  Est la proportion de simulation correcte
- $P_c$  Est la proportion attendue de simulation correcte dans circonstances aléatoires
- $P_p$  Est la proportion de simulation correcte dans des circonstances idéales.

Un indice de Kappa de 1 indique une simulation parfaite, un indice de 0.75 ou plus indique une cohérence élevée, entre carte de référence et la carte simulée donc un modèle acceptable, par contre un indice de kappa de 0.4 ou moins indique une cohérence faible entre la carte simulée et la carte réelle donc un modèle inacceptable. Le tableau représente les indices de Kappa globale de la carte simulée et celui de chaque catégorie d'occupation.

Tableau 18: les résultats de l'indice de Kappa pour la comparaison de la carte simulée et la carte de référence.

Classes d'occupation du sol	Indice de cohérence (KIA)
Zones humides	0.9464
Agricultures	0.5206
Sols nus	0.7275
Bâtis	0.8476
Forêts	0.7971
Kappa global = 0,83	

### III.5.3. Validation du modèle CA-Markov-MLP

Les MLP utilisent un algorithme de propagation et de rétropropagation pendant leurs apprentissages jusqu'à ce qu'ils aient appris les caractéristiques de toutes les classes (Mandrekar, 2010). Le choix des variables explicatives affectent les résultats d'apprentissage des réseaux de neurone (Gharaibeh et al., 2020). Raison pour laquelle on fait une sélection des variables pour trouver un meilleur résultat d'apprentissage en comparant les résultats des Taux de précision (Accuracy rate) et de Mesure de compétence (Skill) de différents apprentissage. Le taux de précision est une valeur comprise entre 0 et 100 %, ou 100 est le meilleur modèle et 0 le pire modèle ; Un modèle avec un taux de précision de 75 est un modèle acceptable (Eastman, 2016b). Le Skill est une valeur comprise entre -1 et 1, ou 1 indique un meilleur modèle, 0 un modèle dont la précision est dû au hasard et -1 le pire modèle (Gharaibeh et al., 2020). La mesure de compétence (Skill) se calcul avec l'équation suivante :

$$s = \frac{(A - E_a)}{(1 - E_a)}$$

Avec

- **S** la mesure de compétence (Skill)
- **A** le taux de précision (Accuracy rate)
- **E<sub>a</sub>** Est la précision attendue qui est déterminé en utilisant le nombre de transitions dans le sous-modèle, T et le nombre de classes de persévérance (P), avec l'équation suivante :

$$E_a = \frac{1}{(T + P)}$$

Tableau 19: les résultats des indices de mesure des différentes sous modèles.

Les sous modèles	Taux de précision (Accuracy Rate) en %	Mesure de compétence (Skill)
Zones à l'agriculture	96	0,92
Zones aux sols nus	92	0,84
Zones aux Bâtis	84	0,84
Zones aux Forêts	89	0,79
Agriculture aux Zones humides	81	0,63
Agriculture aux Sols nus	57	0,15
Agriculture aux Bâtis	80	0,82

Agriculture aux Forêts	56	0,12
Sols nus aux Zones humides	74	0,49
Sols nus à l'Agriculture	56	0,14
Sols nus aux Bâtis	81	0,63
Sols nus aux Forêts	55	0,11
Bâtis aux Zones humides	78	0,57
Bâtis à l'Agriculture	86	0,73
Bâtis aux Sols nus	71	0,43
Bâtis aux Forêts	77	0,54
Forêts aux Zones humides	72	0,44
Forêts à l'Agriculture	65	0,30
Forêts aux Sols nus	70	0,40
Forêts aux Bâtis	77	0,55

Les sous modèles avec des taux de précision ne satisfaisant pas le seuil d'acceptabilité s'explique d'une part l'impertinence des variables explicatives à expliquer la transition et d'autre part au non obtention des paramètres d'apprentissages adéquats. Après validation des différentes sous modèles. Ces derniers ont implémenté le module CA-Markov avec les probabilités de transition calculée par les chaînes Markovienne pour la simulation de l'occupation de 2022. Pour la validation de cette simulation l'indice de Kappa a été utilisé comme pour le modèle CA-Markov-LR. Le tableau ci-dessous représente les résultats de l'indice de Kappa pour la carte simulée.

*Tableau 20 : l'indice Kappa des différentes classes d'occupation du sol.*

Classes d'occupation du sol	Indice de cohérence (KIA)
Zones humides	0.9345
Agricultures	0.5441
Sols nus	0.7458
Bâtis	0.726
Forêts	0.8547
Kappa global = 0, 84	

### III.6. Comparaison et choix du modèle de simulation

Après validation des deux modèles de prédiction pour l'année 2022 on fait un choix entre les deux pour faire une simulation de l'occupation du sol de 2037. On a choisi notre modèle de simulation sur la base de deux indices : l'indice de Kappa et le taux d'erreur global. Le résultat de l'indice de kappa calculé pour la validation des deux ont été comparés pour le calcul du taux d'erreur global la classification fournie par les deux modèles et la carte de l'occupation du sol de référence ont été importé sous le logiciel en format ASCII.

Une fois dans le logiciel R, la « *fonction if* » a été utilisée pour affecter la valeur booléenne 1 et 0 respectivement aux changements bien prédit et mal prédit par les deux modèles. Ensuite on a fait le rapport entre la quantité de mal prédit au total des pixels de la zone d'étude avec la formule suivante :



$$\text{Taux d'erreur Global} = \frac{\text{nbre de pixel mal prédit}}{\text{nombre total de pixel}}$$

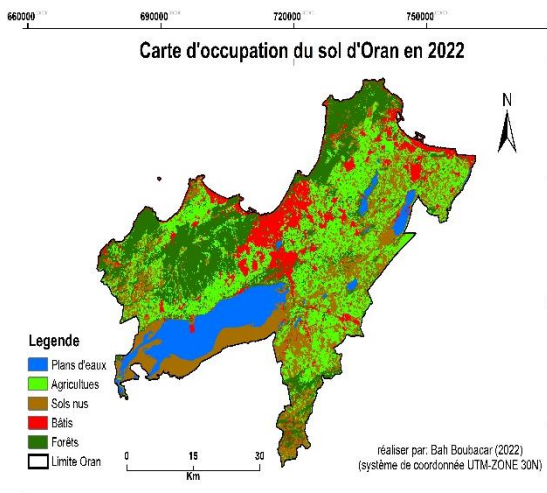
*Tableau 21: Taux d'erreur global des deux modèles.*

Modèle	Bien prédit	Mal Prédit	Taux d'erreur global
CA-Markov-LR	819072	6149068	11,75
CA-Markov-MLP	593382	6374768	8,52

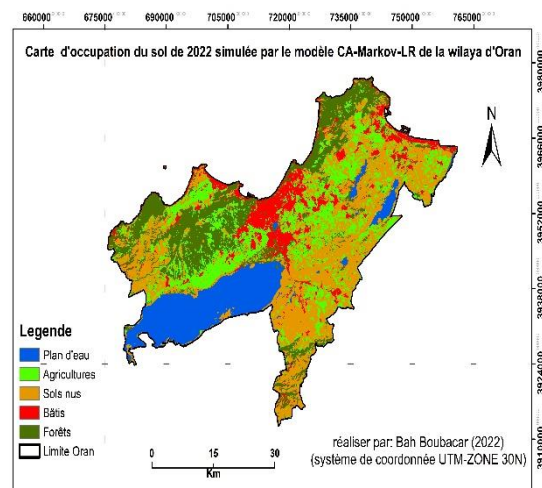
*Tableau 22: Résultat des indices de comparaison des deux modèles en termes de précision.*

Modèle	Indice Kappa global	Taux d'erreur global en %
CA-Markov-LR	0.83	11,75
CA-Markov-MLP	0.84	8.52

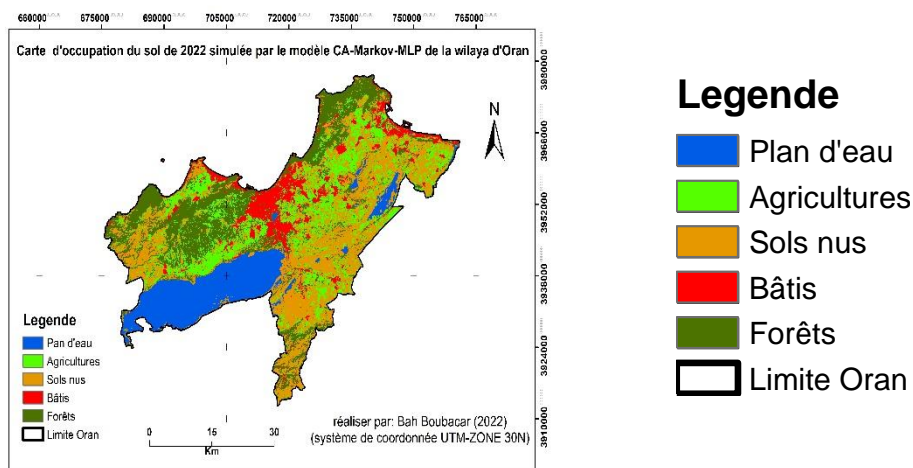
Après comparaison il en ressort que le CA-Markov-MLP donne plus de précision que le modèle CA-Markov-LR, par conséquent la prédiction de l'occupation du sol de l'année 2037 se fera avec le modèle CA-Markov-MLP.



*Figure 34: carte d'occupation du sol de 2022.*



*Figure 35: carte d'occupation du sol de 2022 simulée par le modèle CA-Markov-LR.*



*Figure 36: carte d'occupation du sol de 2022 simulée par le modèle CA-Markov-LR.*

### III.7. Conclusion

Au terme de ce chapitre nous avons pu classer les images en trois temps 1992,2007 et 2022 ; et concevoir ainsi nos deux modèles de simulation. Grâce à la matrice de confusion nous avons pu évaluer la qualité des classifications, qui nous a permis de valider les résultats obtenus à des pourcentages en dessus du seuil 75%. Une comparaison de ces deux dernières a été effectuée pour le choix du modèle de simulation de l'année 2037 avec la confrontation des indices de kappa et du taux d'erreur global des deux modèles, à l'issue de laquelle nous avons choisi le modèle CA-Markov-MLP. L'un des problèmes majeurs de la conception des modèles est celui du choix des variables explicatives. En effet dans la prédiction, le choix des variables affectent la performance du modèle (Gharaibeh et al., 2020). L'impertinence de nos variables explicatives à prédire la transition entre certaines catégories d'occupation du sol (*tels-que la transition entre la classe agriculture et sols nus*) a été l'une des contraintes majeurs pour la perfection maximale de nos modèles en plus de la tendance irrégulière de la dynamiques de la zone d'étude.

**Chapitre IV : Résultats et analyse de la  
dynamique des ZH d'Oran**

## IV. Résultats et analyse de la dynamique des ZH d'Oran

### IV.1. Introduction

Nous exposons dans ce chapitre l'essentiel des résultats obtenus par classification et prédiction de l'occupation du sol et sa dynamique dans la région d'étude qu'est la Wilaya d'Oran. Nous nous focalisons sur l'analyse des changements affectant les zones humides.

### IV.2. Analyse du changement de l'occupation du sol

L'analyse de la modélisation se base sur les transitions des différentes classes entre les deux premières dates. De ce fait une analyse synthétique de la dynamique de l'occupation entre 1992 et 2007 sera propice pour comprendre la dynamique de la zone d'étude.

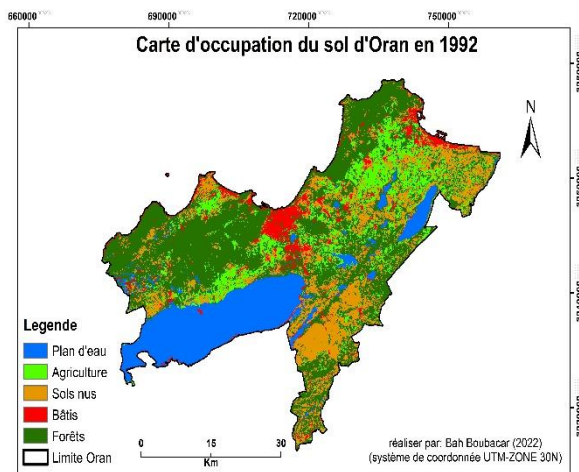


Figure 37: occupation du sol de 1992 de la wilaya d'Oran.

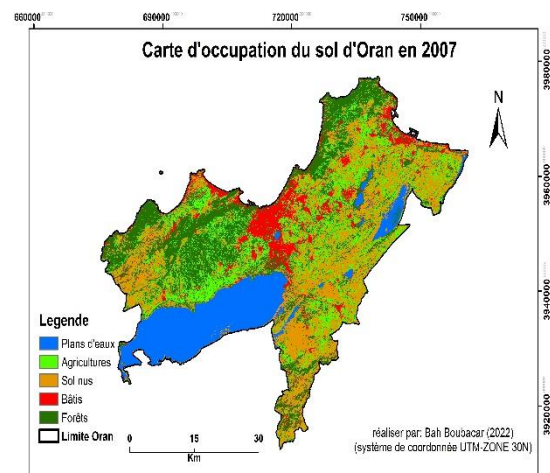


Figure 38: occupation du sol de 2007 de la wilaya d'Oran.

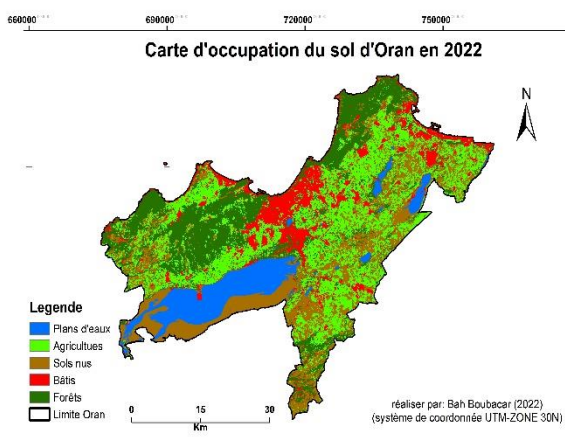


Figure 39: occupation du sol de 2022 de la wilaya d'Oran.

### Legende

- Plan d'eau
- Agricultures
- Sols nus
- Bâti
- Forêts
- Limite Oran

Tableau 23: surfaces (en ha) des différentes classes d'occupation du sol dans les différentes dates

Classe Année	Zones humides	Agricultures	Sols nus	Bâtis	Forêts
1992	38803.23	25463.43	43834.41	12869.01	92568.78
2007	34680.51	40708.53	65806.56	17293.95	55049.31
2022	21655.71	62509.95	53916.84	24372.27	51084.09

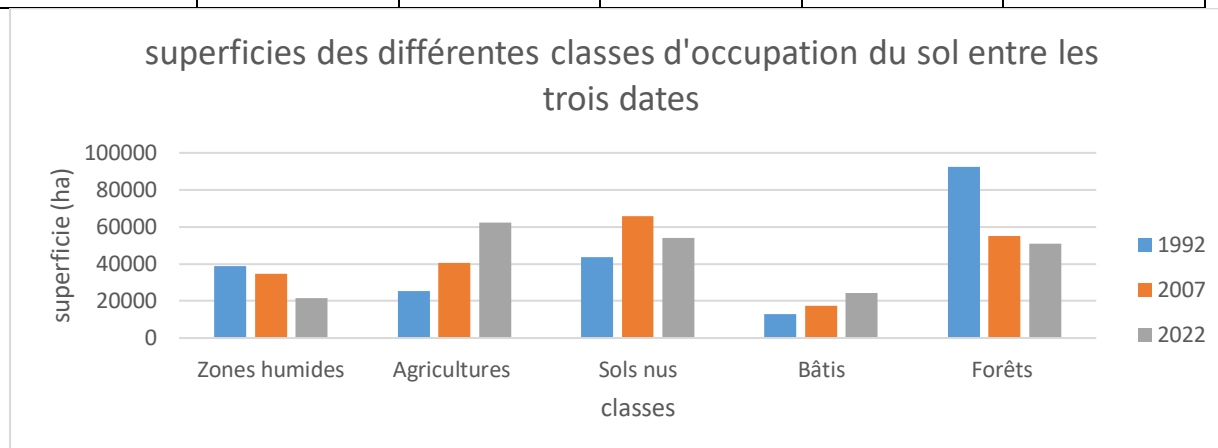


Figure 40: superficie des différentes classes d'occupation du sol entre les trois dates.

La confrontation des trois histogrammes représentant les superficies des différentes classes montre deux changements majeurs dans la dynamique de l'espace entre 1992 et 2007. Premièrement on constate une diminution de la superficie des zones humides et des forêts entre 1992 et 2007. Le deuxième changement est celui d'une augmentation de la superficie des cultures, des bâtis et des sols nus. En effet on remarque une augmentation de la superficie occupée par ces derniers entre les deux dates. La tendance de changement observée entre 1992 et 2007 n'est pas restée constante en terme de superficie durant la période 2007-2022. Mais les différentes catégories d'occupation du sol ont gardé la même tendance d'évolution à l'exception des sols nus. En effet durant cette période les sols nus ont connu une perte de superficie, contrairement à celle qui a été observée à la période précédente. Ceci est dû d'une part à l'utilisation de ces derniers pour des fins agricoles et d'autre part à l'occupation de ce dernier par la couverture végétale. Les matrices de transition ci-dessous donnent une explication détaillée sur les transitions des superficies des différentes classes.

Tableau 24: matrice de transition entre 1992 et 2007 en hectare.

		1992					
Matrice de transition en hectare		Zones humides	Agriculture	Sol nu	Bâtis	Forêts	Total
2007	Zones humides	33044.13	43.2	309.06	532.44	751.68	34680.51
	Agriculture	701.82	10913.67	9486.9	270.45	19335.69	40708.53
	Sol nu	3271.23	10339.56	24552.09	2954.88	24688.8	65806.56
	Bâtis	438.75	738.72	3640.05	8204.58	4271.85	17293.95
	Forêts	1347.3	3428.28	5846.31	906.66	43520.76	55049.31
	Total	38803.23	25463.43	43834.41	12869.01	92568.78	213538.86

*Tableau 25: matrice de transition entre 1992 et 2007 en pourcentage.*

		1992					
2007	Matrice de transition en pourcentage	Zones humides	Agriculture	Sol nu	Bâtis	Forêts	% global en perte & gain
	Zones humides	85.16	0.17	0.71	4.14	0.81	-10.62
	Agriculture	1.81	42.86	21.64	2.10	20.89	59.87
	Sol nu	8.43	40.61	56.01	22.96	26.67	50.13
	Bâtis	1.13	2.90	8.30	63.75	4.61	34.38
	Forêts	3.47	13.46	13.34	7.05	47.01	-40.53
	Total	100	100	100	100	100	

*Tableau 26: matrice de transition entre 2007 et 2022 en hectare.*

		2007					
2022	Matrice de transition en hectare	Zones humides	Agriculture	Sol nu	Bâtis	Forêts	Total
	Zones humides	20897.37	40.14	226.17	56.07	435.96	21655.71
	Agriculture	191.43	23694.75	25728.3	1597.86	11297.61	62509.95
	Sol nu	12177.81	7747.29	28988.91	893.07	4109.76	53916.84
	Bâtis	948.15	1847.52	5282.28	13107.24	3187.08	24372.27
	Forêts	465.75	7378.83	5580.9	1639.71	36018.9	51084.09
	Total	34680.51	40708.53	65806.56	17293.95	55049.31	213538.86

*Tableau 27: matrice de transition entre 2007 et 2022 en pourcentage*

		2007					
2022	Matrice de transition en pourcentage	Zones humides	Agriculture	Sol nu	Bâtis	Forêts	% global en perte & gain
	Zones humides	60.26	0.10	0.34	0.32	0.79	-37.56
	Agriculture	0.55	58.21	39.10	9.24	20.52	53.55
	Sol nu	35.11	19.03	44.05	5.16	7.47	-18.07
	Bâtis	2.73	4.54	8.03	75.79	5.79	40.93
	Forêts	1.34	18.13	8.48	9.48	65.43	-7.20
	Total	100	100	100	100	100	

La matrice de transition montre les superficies transitées d'une classe à une autre. En gros ces matrices sont des illustrations détaillées de l'histogramme précédent puisque qu'elles montrent les classes pour lesquelles une classe donnée a miter. Dans la matrice de transition les colonnes représentent les classes de la première date et les lignes correspondent aux classes de la seconde date. Les superficies diagonales correspondent aux superficies qui n'ont pas transitées entre les deux périodes.

Comme illustrée dans l’histogramme la matrice de transition a aussi révélé une décroissance de la surface des zones humides et des forêts et une croissance des superficies agricoles, des bâtis et des sols nus entre 1992 et 2007 ainsi que pour la période 2007–2022 à l’exception des sols nus qui ont connu des pertes de superficie.

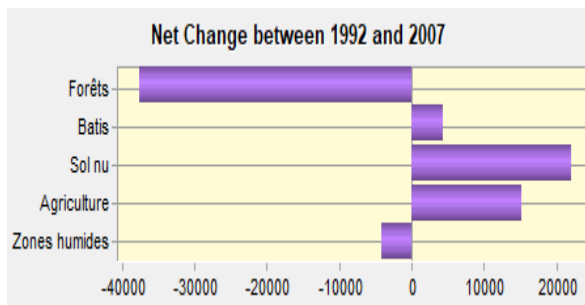


Figure 41: graphes des gains et perte absolue des différentes classes entre 1992-2006.

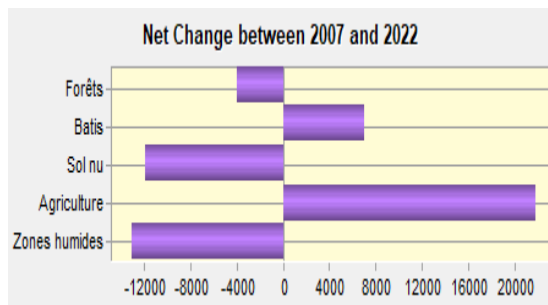


Figure 42: graphes des gains et perte absolue des différentes classes entre 2006-2022.

Les zones humides sont passées d’une superficie de 38803 ha en 1992 à 34680 ha en 2007, soit une perte de 10 % de leur superficie. Ces superficies perdues en zones humides ont surtout transitées vers les sols nus 3271 ha et les forêts 1347 ha. Entre 2007-2022, cette tendance d’évolution est restée la même avec un rythme de perte accéléré de 37 %. Ce croisement des différentes dates témoigne de la variabilité de l’extension zones humides qui est surtout dû au changement climatique.

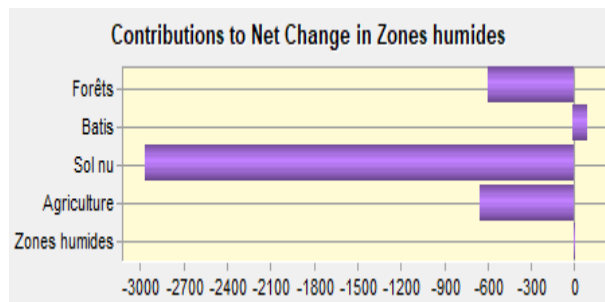


Figure 43: transition de la superficie des zones humides par rapport aux autres classes entre 1992 -2006.

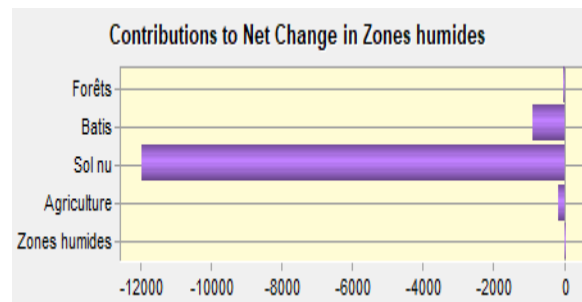


Figure 44: transition de la superficie des zones humides par rapport aux autres classes entre 2006-2022.

Quant aux surfaces forestières. Elles sont passées de 92568 ha en 1996 à 55049 en 2007 soit une régression de 40 % de leurs superficies. Ce défrichement des surfaces forestières était surtout au profit de l’agriculture et les extensions urbaines. Par ailleurs, 24688 ha des forêts ont transitées vers les sols nus à cause du défrichement pour des fins agricoles qui sont ensuite mises en jachère durant une certaine période ; 19335 ha des forêts ont aussi été transformés en surface agricole contre 4271 ha qui se sont transformées en espace urbain. Durant la période 2007 – 2022 cette régression s’est poursuivi mais avec un pourcentage de perte minime ; en effet on constate une perte de 7 % de la surface forestière durant cette période.

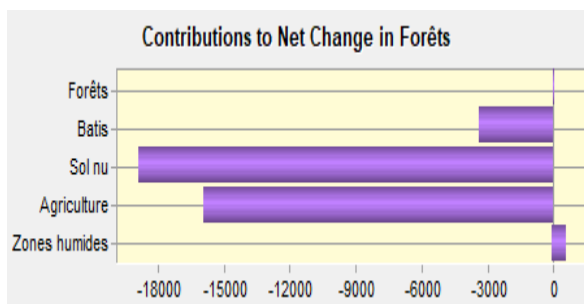


Figure 45: transition de la superficie des forêts par rapport aux autres classes entre 1992 -2006.

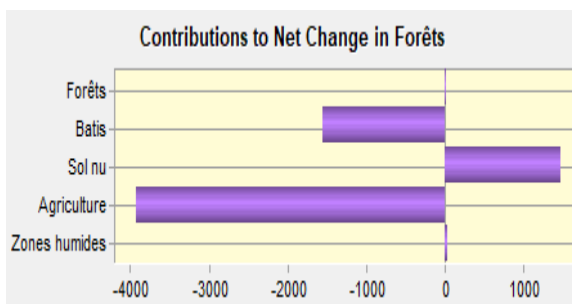


Figure 46: transition de la superficie des forêts par rapport aux autres classes entre 2006-2022.

Le deuxième type de dynamique observée dans la région est celle de l'extension des superficies agricoles, des espaces urbains et des sols nus. Les surfaces agricoles sont passées de 25463 ha en 1992 à 40708 ha en 2007, soit une extension de 59 % de la superficie agricole. L'extension de cette classe s'est fait par le mitage 21% de la superficie des sols nus et de 20 % de la surface forestière. Durant la période 2007 -2022, cette progression des surfaces agricoles vers les sols nus et les forêts s'est maintenue avec un gain de 53% sur leurs superficies.

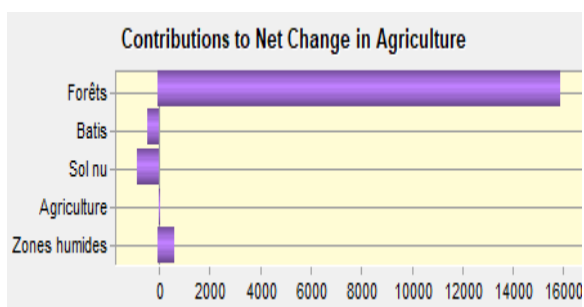


Figure 47: transition de la superficie des zones agricoles par rapport aux autres classes entre 1992 - 2006.

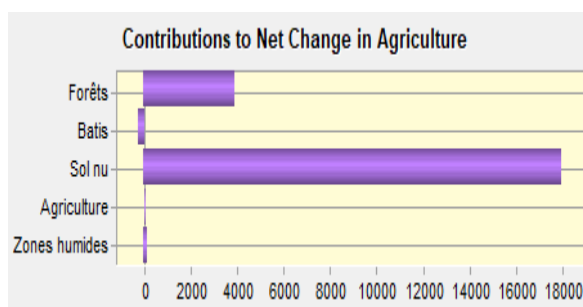


Figure 48: transition de la superficie des zones agricoles par rapport aux autres classes entre 2006 - 2022.

Pour les espaces urbains, leurs superficies sont passées de 12869 ha en 1992 à 17293 ha en 2007, durant cette période la superficie des espaces urbains ont progressés de 34%. L'extension des espaces urbains s'est surtout fait par le mitage des forêts 4271 ha et des sols nus 3640 ha, mais aussi des espaces agricoles 738 ha. Durant la période 2007 – 2022, les espaces ont encore progressés de 40% vers les mêmes catégories d'occupations du sol qui sont les sols nus et les forêts. Après l'analyse on constate que l'extension urbaine se fait progressivement par le mitage des espaces agricoles et des sols nus avec une progression de 37 % sur tous les 15 ans. Cette extension est faite en grande partie vers les zones humides, ce qui constituera une menace de dégradation indirect pour ces zones en raison des pressions apportées par la production urbaine.



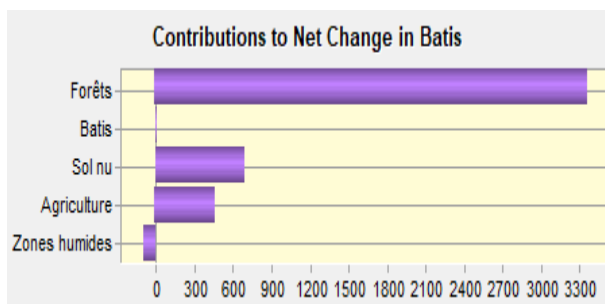


Figure 49: transition de la superficie des espaces urbains par rapport aux autres classes entre 1992 - 2006.

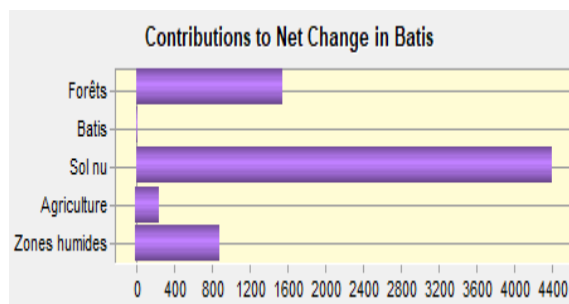


Figure 50: transition de la superficie des espaces urbains par rapport aux autres classes entre 1992 - 2022.

L'extension des sols nus sont surtout dû à la mise en jachère des surfaces agricoles, de la décrue des plans d'eau des zones humides et aussi à la dégradation des espaces naturels soit par le surpâturage ou par la déforestation. Face à ces phénomènes les sols nus ont progressé de 50 % par rapport à leur superficie de 1992 pour couvrir une superficie 65806 ha en 2007. Mais durant la période 2007-2022, cette superficie à régressé de 18%, principalement en raison de l'extension des surfaces agricoles et de l'espace urbain.

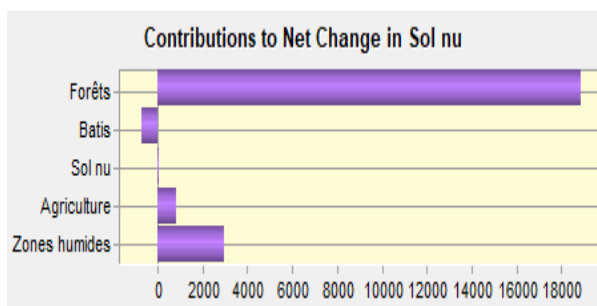


Figure 51: transition de la superficie des sols nus par rapport aux autres classes entre 1992 - 2006.

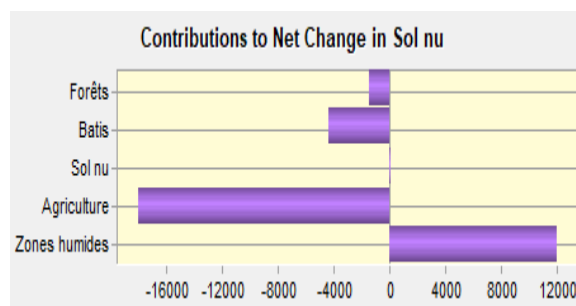


Figure 52: transition de la superficie des sols nus par rapport aux autres classes entre 2006- 2022.

#### IV.2.1. L'analyse du changement autour du lac Telamine et des salines d'Arzew

Après une analyse générale sur l'évolution du changement d'occupation du sol dans la wilaya d'Oran afin de mettre en exergue la tendance de l'évolution des catégories d'occupation vers les zones humides. On s'intéresse maintenant à la dynamique de l'occupation du sol des communes se situant autour du lac Télamine et des salines pour mettre en évidence les formes de pression exercées sur ces zones humides. Afin de pérenniser la diversité faunistique et floristique qu'abritent les zones humides. Une segmentation des zones humides en trois zones a été faite pour monter les formes de pression exercées sur les zones à protéger à savoir : la zone centrale (plan d'eau), la zone tampon et la zone intermédiaire.

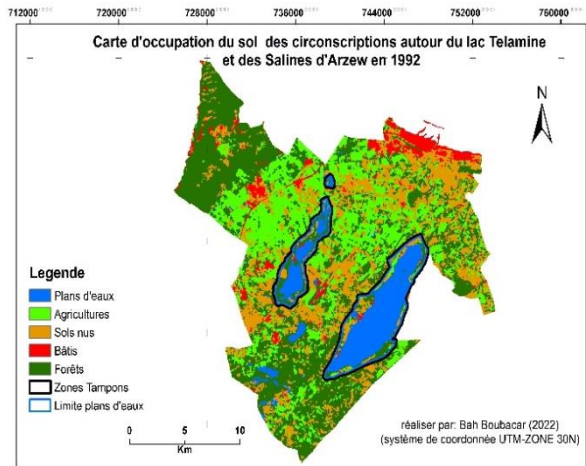


Figure 53: occupation du sol autour du lac Telamine des Salines d'Arzew en 1992.

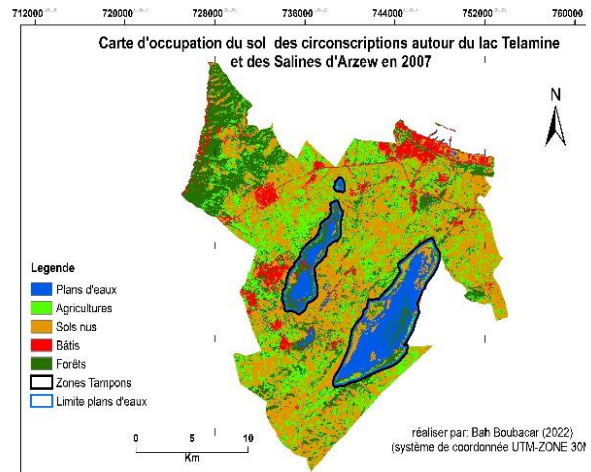


Figure 54: occupation du sol autour du lac Telamine des Salines d'Arzew en 2007.

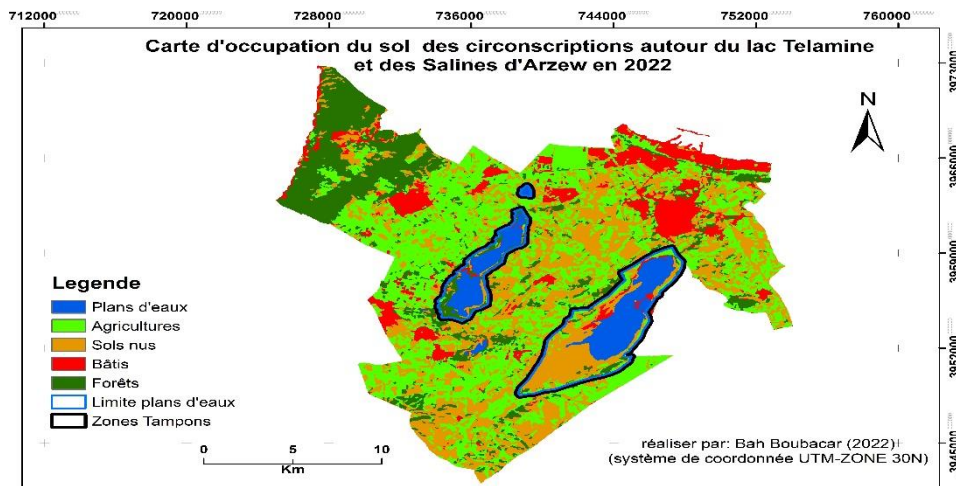


Figure 55: occupation du sol autour du lac Telamine des Salines d'Arzew en 2022.

Tableau 28: dynamique dans les zones centrales des zones humides du lac Telamine, des salines d'Arzew et d'Aqadire Akehal

Surface des classes en ha	Zones humides	Agricultures	Sols nus	Bâti	Forêts	Total
1992	3368,25 <b>(65,77)</b>	239.85 <b>(4,68)</b>	586.89 <b>(11,46)</b>	0	926.64 <b>(18,09)</b>	5121,63 <b>(100)</b>
2007	3028,86 <b>(59,14)</b>	255.87 <b>(5)</b>	915.03 <b>(17,87)</b>	0	921.87 <b>(18)</b>	5121,63 <b>(100)</b>
2022	2434,95 <b>(47,54)</b>	505.62 <b>(9,87)</b>	1696.23 <b>(33,12)</b>	0	484.83 <b>(9,47)</b>	5121,63 <b>(100)</b>
Perte/gain global en %	<b>-27,71</b>	<b>110,81</b>	<b>189,02</b>	<b>0</b>	<b>-47,68</b>	<b>0</b>

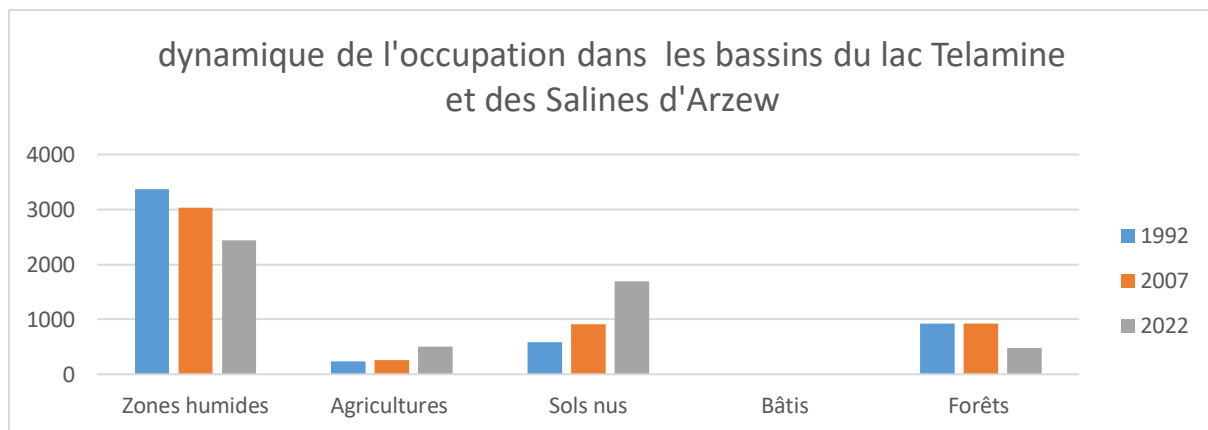
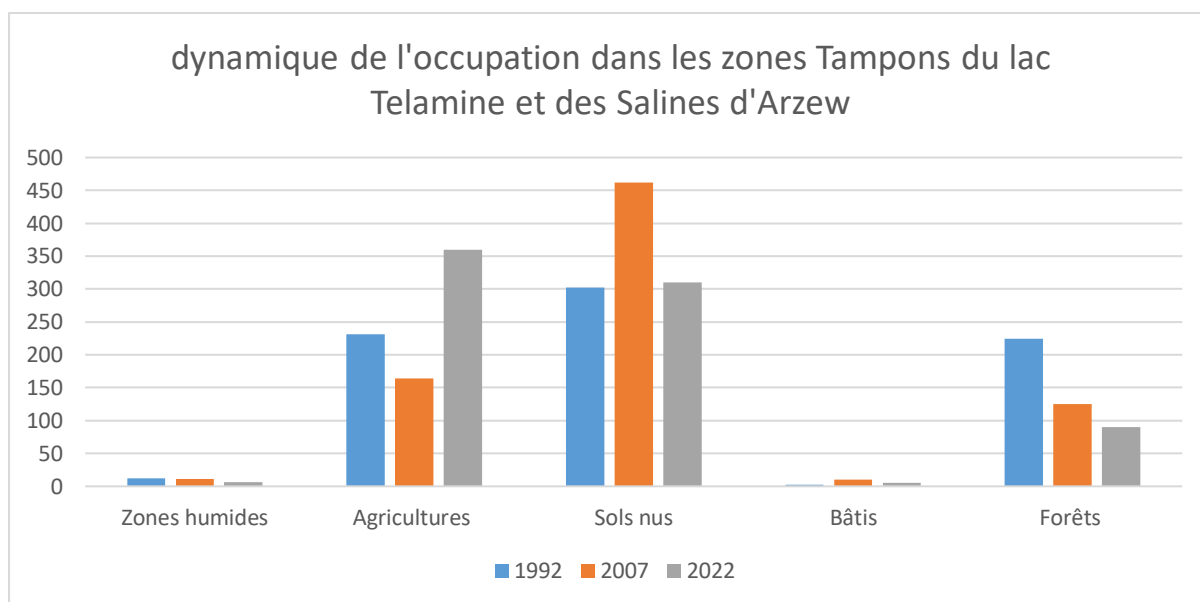


Figure 56: dynamique de l'occupation dans les zones centrales du lac Telamine et des Salines d'Arzew.

La zone centrale comme son nom l'indique est la partie la plus importante de la zone humides, puisque c'est elle qui recèlent venant de l'amont du bassin et permet de maintenir une humidité pour les plantes hydrophytes. De ce fait la protection de cette zone est primordiale pour le maintien du cycle éco systémique d'une zone humide. Mais quand on regarde les dynamiques de l'occupation de ces 30 dernières années on conclut que les zones centrales du lac Télamine et des Salines d'Arzew subissent des pressions anthropiques par l'extension des surfaces agricoles dans ces zones. En effet comme illustrée dans le graphe ci-dessus et détailler dans le tableau ci-dessous les surfaces implantées dans ces zones sont passées de 239 ha à 505 ha entre 1992 et 2022. Cette progression de l'agriculture dans ces zones à un double impact sur la viabilité de la zone humide premièrement il cause un rétrécissement progressif de la superficie du plan d'eau à long terme et deuxièmement la pollution liée à ces surfaces agricoles par les produits phytosanitaires représente une menace de dégradation sur la biodiversité de la zone humide. Les deux autres catégories d'occupation dans ces zones, ne constitue pas par contre une menaces sur viabilité de la zone humides puisque que leur présence est intrinsèquement liées à variabilité du régime pluviométrique des zones humides et surtout indépendant de l'intervention humaines.

Tableau 29: Dynamique de l'occupation dans les zones Tampons des zones humides du lac Telamine, des salines d'Arzew et d'Aqadire Akehal :

Surface des classes en ha	Zones humides (%)	Agricultures (%)	Sols nus (%)	Bâties (%)	Forêts (%)	Total (%)
1992	12.06 <b>(1,56)</b>	231.57 <b>(29.98)</b>	302.22 <b>(39,13)</b>	2.16 <b>(0.28)</b>	224.28 <b>(29.04)</b>	772, 29 <b>(100)</b>
2007	11.07 <b>(1.43)</b>	163.8 <b>(21,21)</b>	461.79 <b>(59.79)</b>	10.26 <b>(1,33)</b>	125.37 <b>(16,23)</b>	772,29 (100)
2022	6.75 <b>(0,87)</b>	360 <b>(46,61)</b>	310.23 <b>(40,17)</b>	4.86 <b>(0,63)</b>	90.45 <b>(11,71)</b>	772,29 <b>(100)</b>
Perte/gain global en %	<b>-44.03</b>	<b>55.46</b>	<b>2.65</b>	<b>125.00</b>	<b>-59.67</b>	<b>0</b>

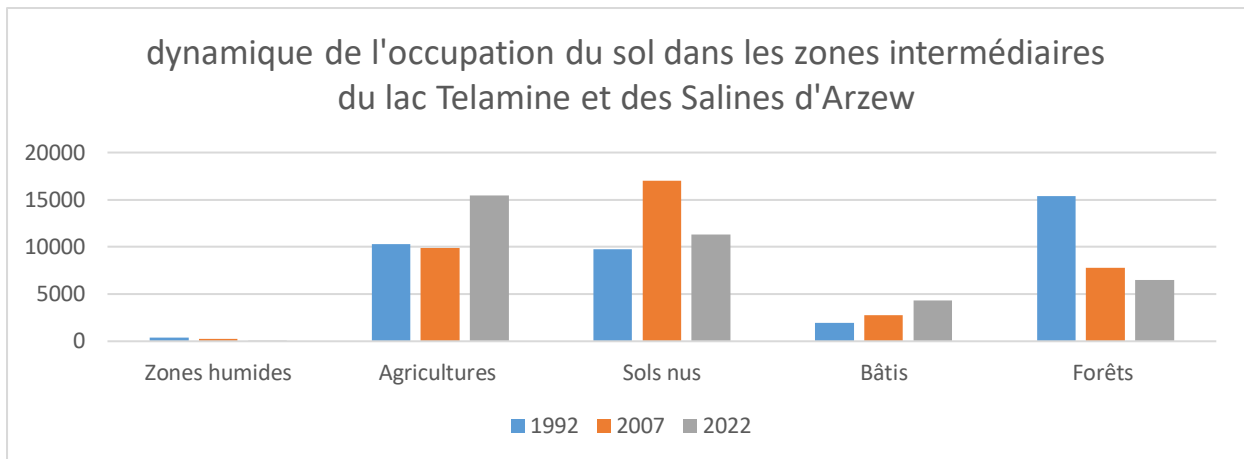


*Figure 57: dynamique de l'occupation du sol dans les zones tampons du lac Telamine des Salines d'Arzew en 2022.*

La zone tampons comme défini dans le chapitre I (section) est la partie de la zone humides réservé à la biodiversité et souvent à d'échantillonnage pour les études scientifiques (exemple : inventaire des espèces). Dans cette étude on a délimité un buffer de 150 m entourant la zone centrale comme zone tampons. La dynamique de l'occupation du sol observée dans cette zone tampons révèle l'énorme dégradation de la biodiversité de ces deux zones humides. En effet en 30 ans les surfaces forestières dans les zones tampons à régresser de 59% en passant de 224 ha en 1992 à 90 ha en 2022 ce qui se traduit par une dégradation fulgurante de la biodiversité floristique des zones humides en général. Durant la même période ces zones tampons ont connu une extension de 55 % des surfaces agricoles et de 2% des surfaces des sols nus. L'extension de ces deux catégories d'occupation dans les zones tampons montre la progression des activités anthropiques dans les zones qui sont censées être protégées de toute activité humaine pouvant perturber les l'écosystème des zones humides. Face à cette extension de l'activité agricole dans les zones tampons, des actions doivent être entreprises pour au mieux contrôler leurs extensions au risque de disparition de certaines espèces floristiques endémiques.

*Tableau 30: dynamique dans les zones intermédiaires des zones humides du lac Telamine, des salines d'Arzew et d'Aqadire Akehal*

Surface des classes en ha	Zones humides (%)	Agricultures (%)	Sols nus (%)	Bâtis (%)	Forêts (%)	Total (%)
1992	366.3 <b>(0,97)</b>	10306.98 <b>(27,34)</b>	9722.16 <b>(25,79)</b>	1936.35 <b>(5,14)</b>	15360.66 <b>(40,75)</b>	37692,45 <b>(100)</b>
2007	231.21 <b>(0,61)</b>	9900.63 <b>(26,27)</b>	16980.48 <b>(45,05)</b>	2795.85 <b>(7,42)</b>	7784.28 <b>(20,65)</b>	37692,45 <b>(100)</b>
2022	33.2 <b>(0,09)</b>	15460.02 <b>(41,02)</b>	11334.32 <b>(30,07)</b>	4356.56 <b>(11,56)</b>	6508.35 <b>(17,27)</b>	37692,45 <b>(100)</b>
Perte/gain global en %	<b>-90,94</b>	<b>50</b>	<b>16,58</b>	<b>124,98</b>	<b>-57,63</b>	<b>0</b>

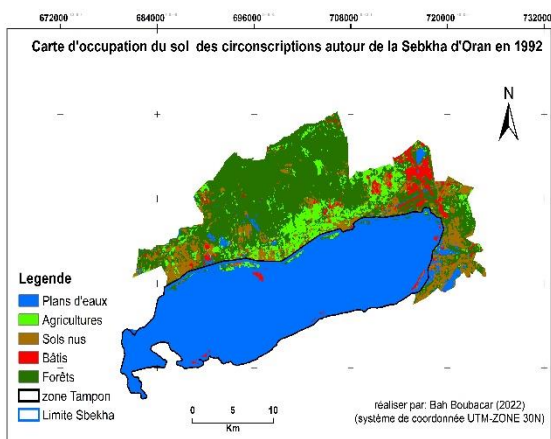


*Figure 58: Dynamique de l'occupation du sol dans les zones intermédiaire du lac Telamine des Salines d'Arzew en 2022.*

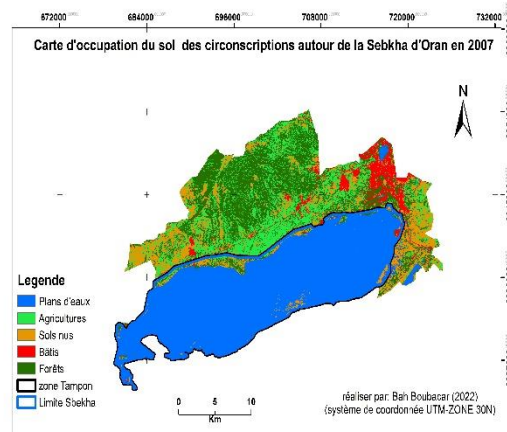
Les zones intermédiaires représentent les zones enveloppant les zones tampons, l'analyse de cette zone est importante afin de voir la direction de l'extension des différentes catégories d'occupation du sol vers les zones à protéger des zones humides (zones centrale, zone tampon). D'après le graphe et le tableau ci-dessus on remarque une extension énorme des espaces urbains 124% entre les 30 dernières années. L'extension des espaces urbains se traduit par une augmentation de la population. L'augmentation de la population ou de l'extension urbaine ne constitue pas une menace directe sur les zones humides dans le cas ou des plans d'action de conservation des zones humides sont mise en place et appliqués sur le terrain. Dans le cas contraire cette extension pourrait avoir des impacts directs sur les zones humides par le déversement des déchets produits par la ville dans ses zones humides comme c'est le cas du lac Telamine. Les actions indirectes de l'extension de la population sur les zones humides est l'extension connexe des surfaces agricoles, puisqu'une augmentation de la population implique une productivité importante pour une sécurité alimentaire, hors les conséquences de l'extension des surfaces agricoles vers les zones sensibles sont déjà connues (voir section précédente). D'ailleurs on remarque une extension parallèle de 50 % de la superficie agricole dans les zones intermédiaires. Cette extension des surfaces agricoles impacte également les surfaces forestières ; En effet une régression de 57 % des surfaces forestières est observée durant les trois dernières décennies. On remarque également une extension de 16 % dans les zones intermédiaires des sols nus, qui est dûe d'une part au surpâturage de certains espaces naturels et d'autres parts à la mise en jachère de certaines parcelles agricoles.

#### **IV.2.2. Analyse du changement autour de la Sebkhia d'Oran**

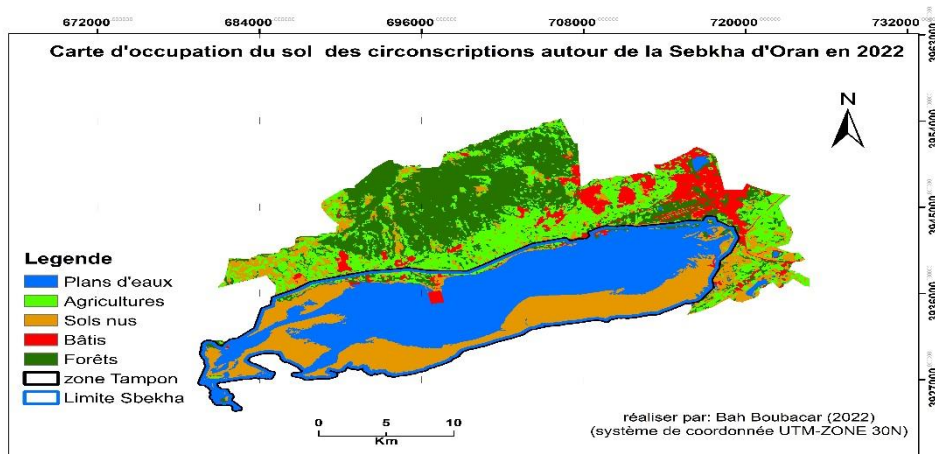
L'analyse précédente faite sur le lac Telamine et les salines d'Arzew sera appliquée dans cette section sur la sebkhia d'Oran en analysant la dynamique de l'occupation du sol dans les différents compartiments de la zone humide en relation avec les communes adjacentes à la zone humide. Afin d'éviter de nous répéter, ici on n'expliquera que la dynamique en s'appuyant sur les données des différents tableaux sans pour autant mentionner les conséquence de la dégradation des différentes zones puisque ces dernières sont similaires aux conséquences mentionnées dans l'analyse des différentes zones du lac Telamine et des Salines d'Arzew.



*Figure 59: occupation du sol autour de la Sebka d'Oran en 1992.*



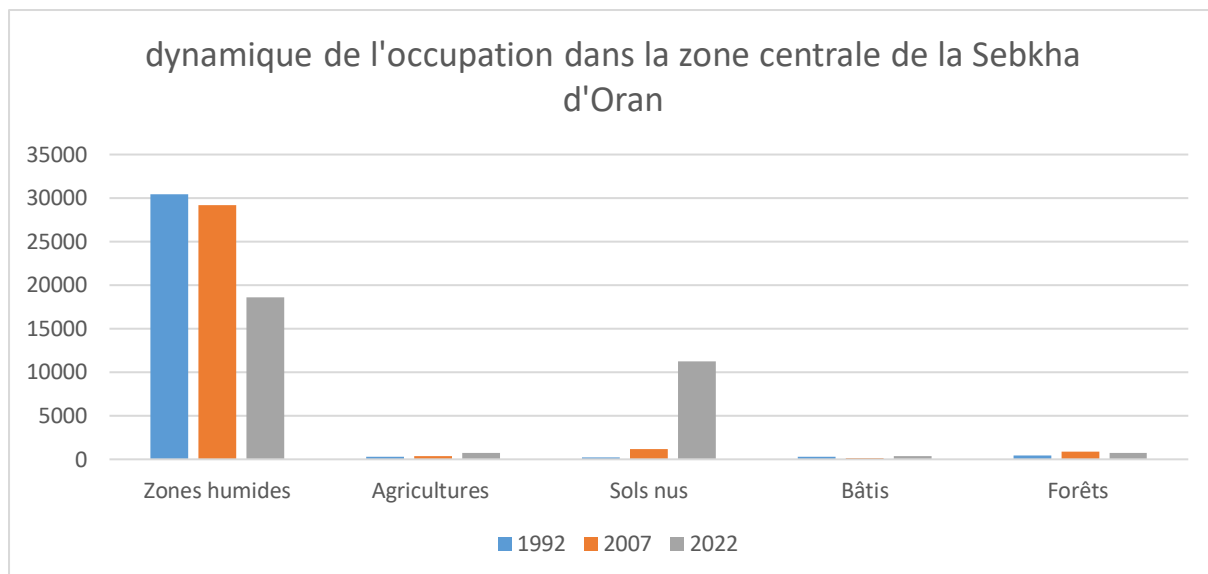
*Figure 60: occupation du sol autour de la Sebka d'Oran en 2007.*



*Figure 61: occupation du sol autour de la Sebka d'Oran en 2022.*

*Tableau 31: Dynamique dans la zone centrale de la Sebka d'Oran :*

Surface des classes en ha	Zones humides (%)	Agricultures (%)	Sols nus (%)	Bâti (%)	Forêts (%)	Total (%)
1992	30455.1 <b>(95.94)</b>	323.82 <b>(1.02)</b>	199.8 <b>(0.63)</b>	315.81 <b>(0.99)</b>	448.29 <b>(1.41)</b>	31742.82 <b>(100)</b>
2007	29157.84 <b>(91.86)</b>	356.31 <b>(1.12)</b>	1194.12 <b>(3.76)</b>	177.48 <b>(0.56)</b>	857.07 <b>(2.70)</b>	31742.82 <b>(100)</b>
2022	18602.28 <b>(58.68)</b>	718.38 <b>(2.26)</b>	11275.74 <b>(35.52)</b>	386.73 <b>(1.22)</b>	759.69 <b>(2.39)</b>	31742.82 <b>(100)</b>
Perte/gain global en %	<b>-38.92</b>	<b>121.85</b>	<b>5543.51</b>	<b>22.46</b>	<b>69.46</b>	<b>0</b>



*Figure 62: dynamique de l'occupation du sol dans la zone centrale de la Sebkhia d'Oran en 2022.*

La dynamique de l'occupation de la zone centrale de la sebkhia illustrée dans le graphe ci-dessus révèle une régression importante de la superficie du plan d'eau de la sebkhia durant les trois dernières décennies avec un pourcentage régressif de 38 %, cette émerger sont restés nus comme illustrée sur le graphe sans être couvert par une couverture végétale importante 69 %. L'inoccupation de cette superficie par une couverture végétale importante est due à l'accumulation importante du sel sur le lit du bassin de la sebkhia. On remarque également une progression des surfaces agricoles dans bassin avec un pourcentage progressif de 120 %. Par contre l'extension des Bâtis dans cette zone est à prendre à la légère puisque celle-ci est due à la confusion créée entre les sols nus et les bâtis lors de la classification des images satellitaires.

*Tableau 32: dynamique dans la zone tampon de la Sebkhia d'Oran :*

Surface des classes en ha	Zones humides (%)	Agricultures (%)	Sols nus (%)	Bâtis (%)	Forêts (%)	Total (%)
1992	219.96 <b>(27.82)</b>	140.94 <b>(17.83)</b>	152.37 <b>(19.27)</b>	31.05 <b>(3.93)</b>	246.24 <b>(31.15)</b>	790.56 <b>(100)</b>
2007	104.76 <b>(13.25)</b>	201.78 <b>(25.52)</b>	208.8 <b>(26.41)</b>	56.7 <b>(7.17)</b>	218.52 <b>(27.64)</b>	790.56 <b>(100)</b>
2022	20.97 <b>(2.65)</b>	348.12 <b>(44.03)</b>	184.23 <b>(23.30)</b>	64.8 <b>(8.20)</b>	172.44 <b>(21.81)</b>	790.56 <b>(100)</b>
Perte/gain global en %	<b>-90.47</b>	<b>147.00</b>	<b>20.91</b>	<b>108.70</b>	<b>-29.97</b>	<b>0</b>



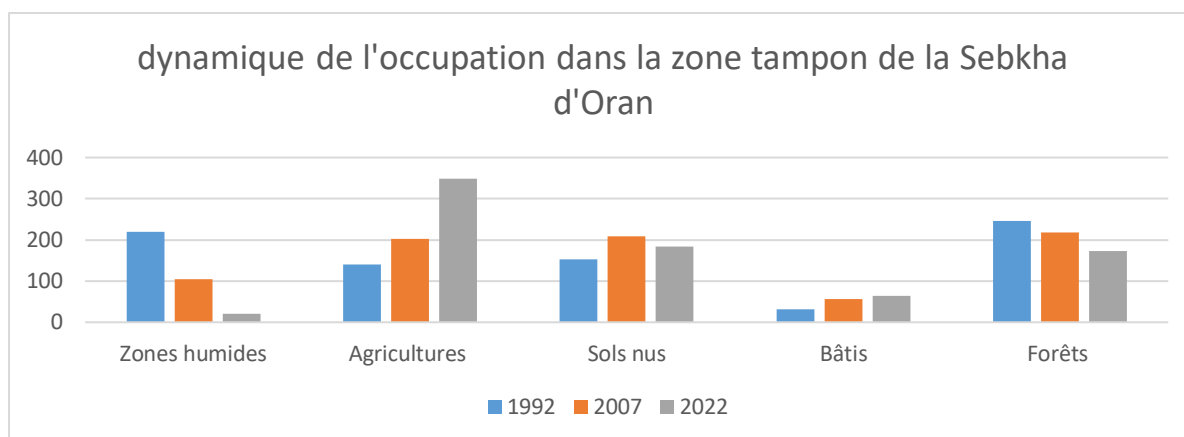


Figure 63: dynamique de l'occupation du sol dans la zone tampon de la Sebkh d'Oran en 2022.

La zone définie comme zone tampon représente une bande de 150 m autour de la zone centrale. La dynamique observée révèle une dégradation de cette dernière par l'extension agricole et de la régression de la couverture végétale. En effet sur le graphe on peut voir une progression fulgurante de la superficie agricole entre 1992 et 2022 avec un pourcentage 147 %, contre un pourcentage régressif de 29 % pour les surfaces forestières. Cette zone tampon a connu également une extension des surfaces bâties en passant de 31 ha en 1992 à 64 ha en 2022 ; ainsi qu'une extension de 20 % des surfaces nues. De manière synthétique ces différentes dynamiques des différentes catégories d'occupation du sol se traduisent par une dégradation importante d'une zone censée être la réserve d'une biodiversité endémique propre à la zone humide.

Tableau 33: dynamique dans la zone intermédiaire de la sebkh d'Oran :

Surface des classes en ha	Zones humides (%)	Agricultures (%)	Sols nus (%)	Bâtis (%)	Forêts (%)	Total (%)
1992	1330.2 <b>(3.68)</b>	4777.11 <b>(13.21)</b>	6310.89 <b>(17.45)</b>	1801.44 <b>(4.98)</b>	21940.02 <b>(60.68)</b>	36159.66 <b>(100)</b>
2007	672.12 <b>(1.86)</b>	9972.72 <b>(27.58)</b>	7834.95 <b>(21.67)</b>	2949.12 <b>(8.16)</b>	14731.11 <b>(40.74)</b>	36159.66 <b>(100)</b>
2022	279.36 <b>(0.77)</b>	12018.69 <b>(33.24)</b>	4489.56 <b>(12.42)</b>	4322.16 <b>(11.95)</b>	15049.89 <b>(41.62)</b>	36159.66 <b>(100)</b>
Perte/gain global en %	<b>-79.00</b>	<b>151.58</b>	<b>-28.86</b>	<b>139.95</b>	<b>-31.40</b>	<b>0</b>



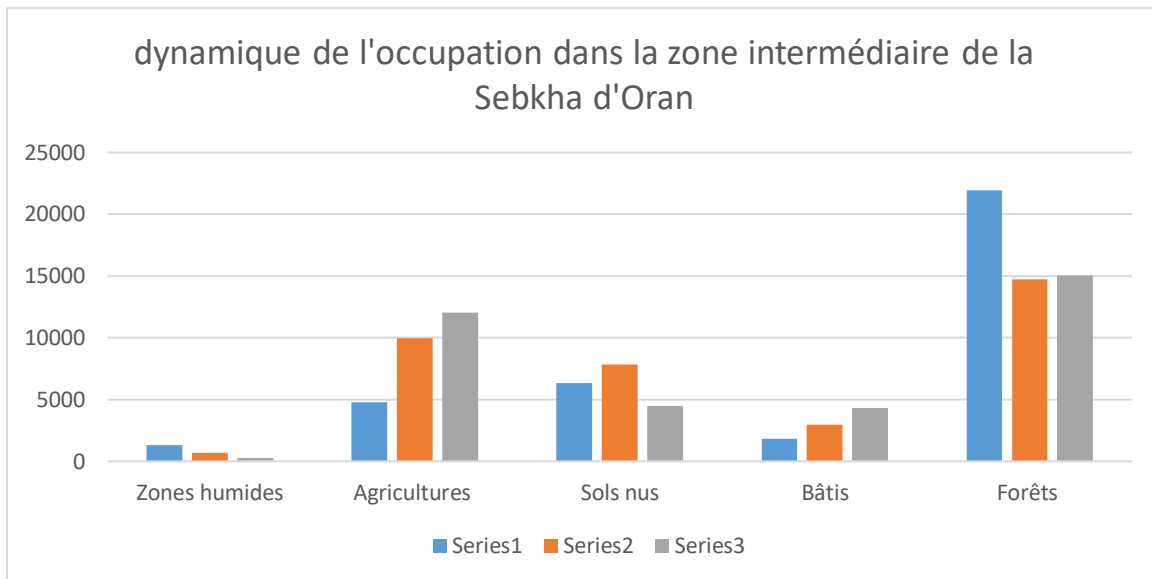


Figure 64: dynamique de l'occupation du sol dans la zone intermédiaire de la Sebka d'Oran en 2022.

La zone intermédiaire de la sebka d'Oran à une dynamique similaire à sa zone tampon, en effet dans cette zone, une progression de 151 % des surfaces agricoles est observée entre 1992 (4777 ha) et 2022 (12018 ha). Les surfaces bâties ont également connu une extension de 139 % par rapport à leurs surfaces de 1992 qui était de 1801 ha. Par contre une régression de 28 % des surfaces nues et de 31 % des surfaces forestières sont à noter dans cette zone. Ces dynamiques ne peuvent pas constituer de menaces pour la viabilité de la sebka dans le cas où leurs direction de tendance n'est pas vers ces zones centrale et tampon.

### IV.3. Analyse de l'occupation du sol prédite pour 2037

La confrontation de l'occupation du sol de 2022 à celle de 2037 prédite, a pour but de donner une explication détaillée de la dynamique et de l'évolution future des différentes catégories d'occupation du sol, comme illustrée dans le tableau ci-dessous.

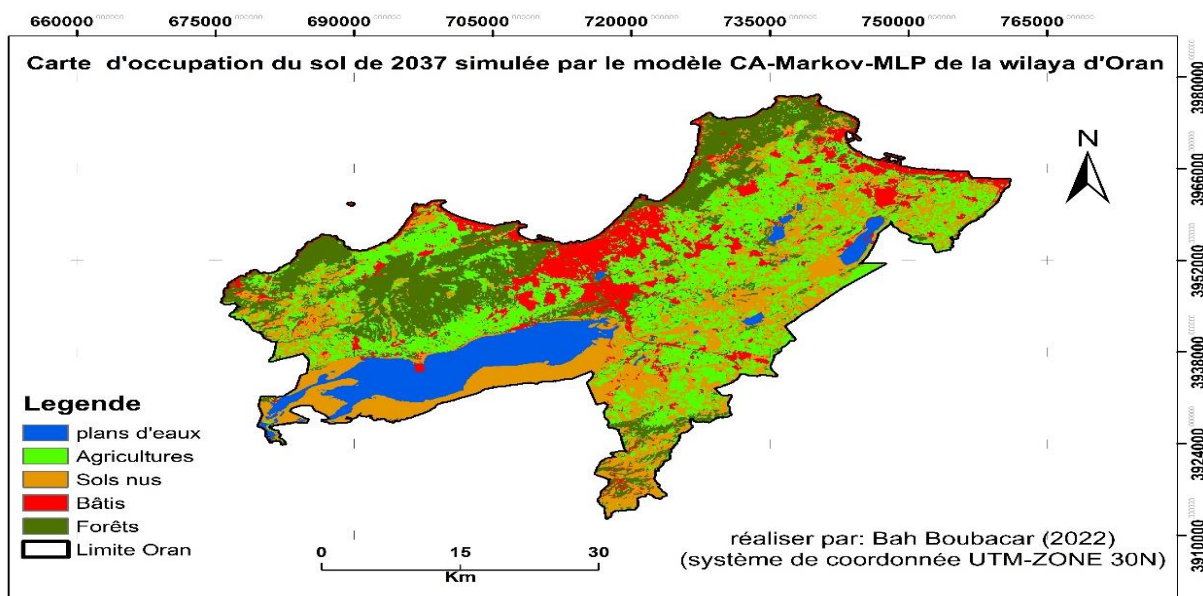


Figure 65: carte d'occupation du sol de 2037 simulée par le modèle CA-Markov-MLP.

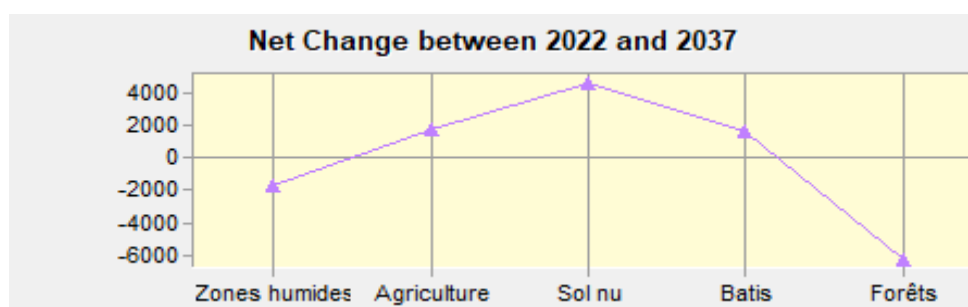


Figure 66: courbe de gain et perte des différentes classes prédites par le modèle.

Tableau 34: Les superficies totales des différentes catégories d'occupation du sol d'Oran en 2022 et 2037.

Surfaces en hectares (%)	Zones humides (%)	Agriculture (%)	Sol nu (%)	Bâti (%)	Forêts (%)	Total (%)
2022	21655.71 <b>(10.14)</b>	62509.95 <b>(29.27)</b>	53916.84 <b>(25.25)</b>	24372.27 <b>(11.41)</b>	51084.09 <b>(23.92)</b>	213538 <b>(100)</b>
2037	19929.42 <b>(9.33)</b>	64248.39 <b>(30.09)</b>	58496.04 <b>(27.39)</b>	26026.02 <b>(12.19)</b>	44838.99 <b>(21)</b>	213538 <b>(100)</b>

Table 35: Matrice de transition de la dynamique future (2037) de l'occupation du sol d'Oran.

		2022					
2037	Matrice de transition en hectare	Zones humides	Agriculture	Sol nu	Bâti	Forêts	Total
	Zones humides	19911.6	0	0	0	17.82	19929.42
	Agriculture	15.75	61037.37	333.45	0	2861.82	64248.39
	Sol nu	1688.58	1458.45	52631.55	0	2717.46	58496.04
	Bâti	6.84	14.13	951.84	24372.27	680.94	26026.02
	Forêts	32.94	0	0	0	44806.05	44838.99
	Total	21655.71	62509.95	53916.84	24372.27	51084.09	213538.86

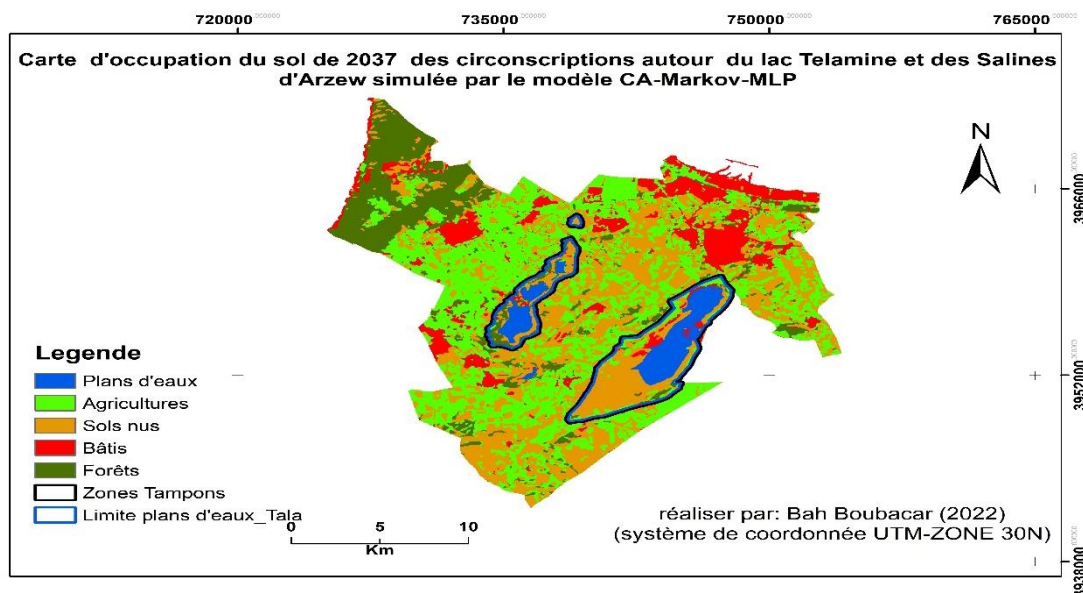
Tableau 36: Matrice de transition de la dynamique future (2037) de l'occupation du sol d'Oran en pourcentage

		2022					
2037	Matrice de transition en pourcentage	Zones humides	Agriculture	Sol nu	Bâti	Forêts	% global en perte & gain
	Zones humides	91.95	0.00	0.00	0.00	0.03	-7.97
	Agriculture	0.07	97.64	0.62	0.00	5.60	2.78
	Sol nu	7.80	2.33	97.62	0.00	5.32	8.49
	Bâti	0.03	0.02	1.77	100.00	1.33	6.79
	Forêts	0.15	0.00	0.00	0.00	87.71	-12.23
	Total	100	100	100	100	100	

En gardant les mêmes tendances observées dans les 30 dernières années, 30 % de la wilaya D’Oran seraient occupés par l’agriculture, 21 % par les sols nus, 21 % par les couvertures végétales naturelles et 12 et 9 % par respectivement les bâtis et les zones humides. Certaines catégories d’occupation ont connus une extension entre 2022 et 2037, telles-que les surfaces agricoles, les sols nus et les bâtis contrairement aux zones humides et les forêts qui ont connues des régressions. En effet les surfaces agricoles vont progresser de 2% par rapport à leurs superficies actuelles d’ici 2037, cette extension est dû en partie par l’extension parallèle de la population de la wilaya. L’extension des surfaces agricoles se fera par le défrichement de 5 % des surfaces forestières, ce qui constitue un facteur de dégradation. Quant à l’extension des sols nus, il sera surtout dû à la régression de 7 % de la superficie des plans d’eau actuels, ce qui est un indicateur de la variabilité du régime pluviométrique future et du changement climatique. 5 % des surfaces forestières seront également dénudées ainsi que 2% des surfaces agricoles. Les surfaces bâtis s’étendront de 6% de leurs superficies actuelles vers les forêts 1% et les sols nus 1 %. Cette extension des sols nus à des impacts minime par rapport aux extensions des bâtis observées durant les 30 dernières, puisse que cette dernières se fera en grande parties sur les espaces inoccupés contrairement aux extensions antérieures qui se faisaient par les transitions des espaces forestières et agricoles considérable. Quant aux surfaces forestières, elles régresseront de 12 % tout comme les plans d’eau qui le feront de 7%.

### IV.3.1. Analyse de la dynamique future autour du lac Telamine et des Salines d’Arzew

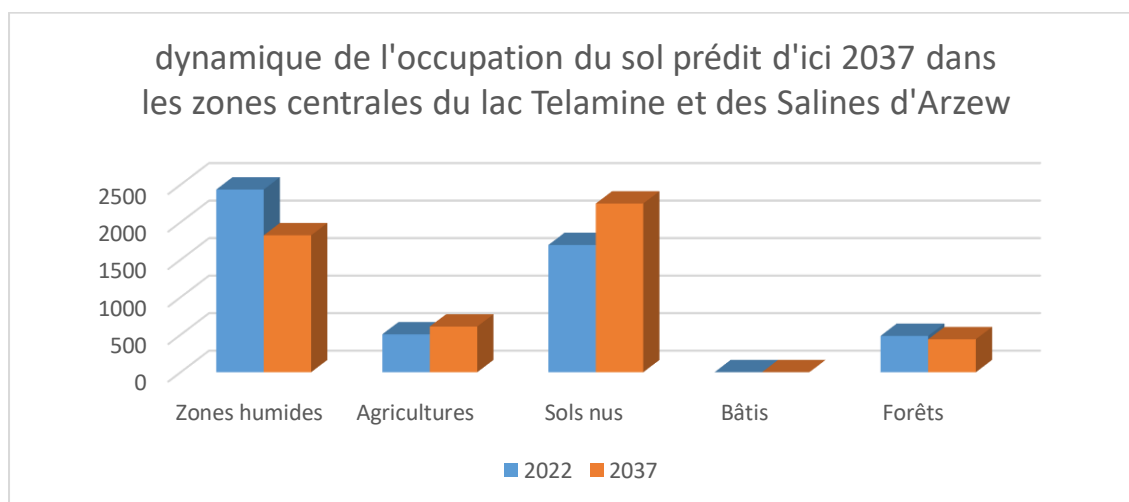
Dans cette section nous ferons une analyse sur la base de la carte simulée de 2037, afin de mettre en évidence le devenir des zones humides du lac Telamine et des Salines d’Arzew ainsi que les dégradations et les pressions qu’elles subiront d’ici 2037. Pour notre analyse une confrontation des superficies totales de chaque catégorie d’occupation a été confrontée dans les trois types de zone définissant une zone humide.



*Figure 67: Occupation du sol de 2037 autour du lac Telamine et des Salines d’Arzew.*

*Tableau 37: Dynamique future prédit dans la zone centrale du lac Telamine et salines d'Arzew :*

Surface des classes en ha	Zones humides (%)	Agricultures (%)	Sols nus (%)	Bâtis (%)	Forêts (%)	Total (%)
2022	2434.95 <b>(47.54)</b>	505.62 <b>(9.87)</b>	1696.23 <b>(33.12)</b>	0	484.83 <b>(9.47)</b>	5121.63 <b>(100)</b>
2037	1824.89 <b>(35.63)</b>	608.61 <b>(11.88)</b>	2248.79 <b>(43.91)</b>	0	439.34 <b>(8.58)</b>	5121.63 <b>(100)</b>
<b>Perte/gain global en %</b>	<b>-25.05</b>	<b>20.37</b>	<b>32.58</b>	<b>0</b>	<b>-9.38</b>	<b>0</b>

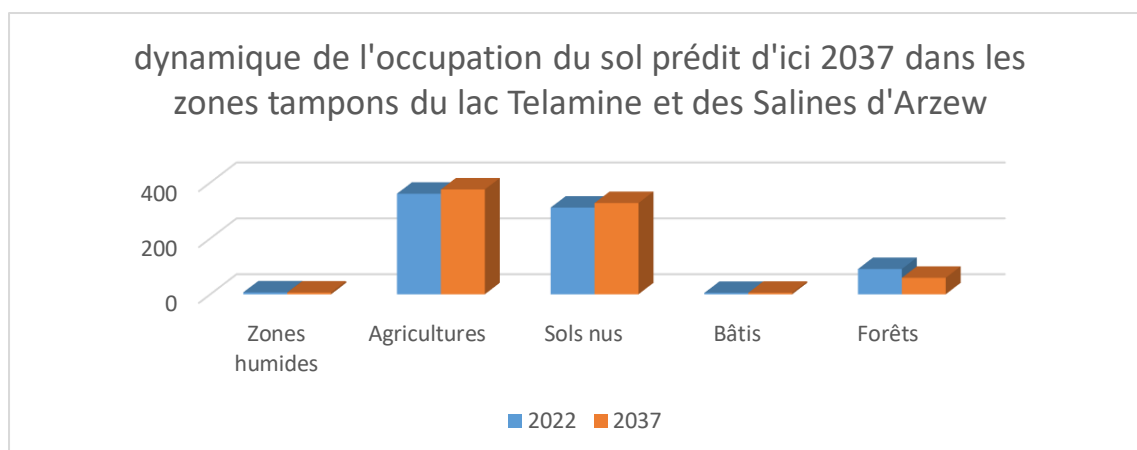


*Figure 68: Dynamique de l'occupation du sol prédit d'ici 2037 dans les zones centrales du lac Télamine et des Saline d'Arzew.*

Dans les zones centrales du lac Telamine et des Salines d'Arzew un rétrécissement de 25 % des plans d'eau est prévu d'ici 2037, par contre les surfaces agricoles de ces zones vont progresser de 20 % ce qui constitue une accentuation de la pression anthropique sur ces zones fragiles et constitue en conséquence une source de dégradation. Les sols nus vont également progresser de 32 % par rapport à leurs superficies actuelles. Par contre les surfaces forestières vont régresser de 9% dans cette zone, ce qui pourrait conduire à une dégradation de la biodiversité de la zone humide.

*Tableau 38: Dynamique future prédit dans les zones tampons du lac Telamine et des salines d'Arzew :*

Surface des classes en ha	Zones humides (%)	Agricultures (%)	Sols nus (%)	Bâtis (%)	Forêts (%)	Total (%)
2022	6.75 <b>(0.87)</b>	360 <b>(46.61)</b>	310.23 <b>(40.17)</b>	4.86 <b>(0.63)</b>	90.45 <b>(11.71)</b>	772.29 <b>(100)</b>
2037	6.21 <b>(0.80)</b>	375.12 <b>(48.57)</b>	326.7 <b>(42.30)</b>	5.22 <b>(0.68)</b>	59.04 <b>(7.64)</b>	772.29 <b>(100)</b>
<b>Perte/gain global en %</b>	<b>-8.00</b>	<b>4.20</b>	<b>5.31</b>	<b>7.41</b>	<b>-34.73</b>	<b>0.00</b>

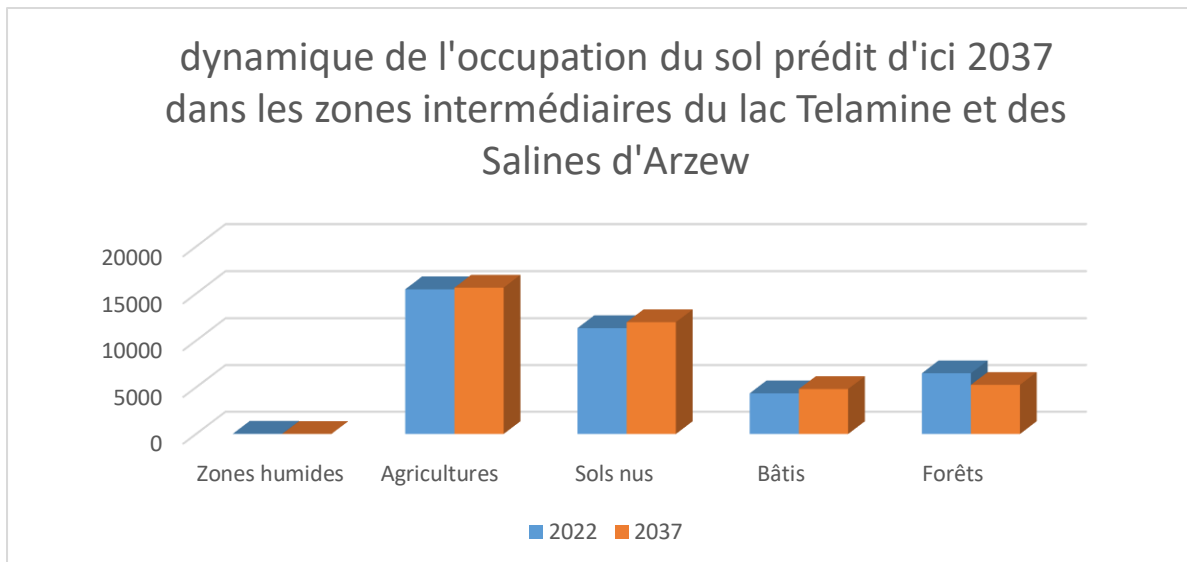


*Figure 69: Dynamique de l'occupation du sol prédit d'ici 2037 dans les zones tampons du lac Telamine et des Salines d'Arzew.*

Dans les zones tampons de ces deux zones humides une extension de 4 % des surfaces agricoles est prédit d'ici 2037, ainsi qu'une extension de 5 % des sols nus et de 7% des bâtis. Par contre une régression de 8% et de 34% des plans d'eau et des surfaces forestières sont prédits. A partir de cette analyse, on peut conclure les pressions anthropiques exercées sur les zones tampons s'accroîtront dans le futur avec la dégradation de leurs couvertures végétales, qui sont l'un des principaux composants des habitats naturels pour les écosystèmes locaux et celui de la rétention de l'eau et du maintien de l'humidité au sein de la zone tampon.

*Tableau 39: Dynamique future prédit dans la zone intermédiaire du lac Telamine et saline d'Arzew :*

Surface des classes en ha	Zones humides (%)	Agricultures (%)	Sols nus (%)	Bâtis (%)	Forêts (%)	Total (%)
2022	33.2 <b>(0.09)</b>	15460.02 <b>(41.02)</b>	11334.32 <b>(30.07)</b>	4356.56 <b>(11.56)</b>	6508.35 <b>(17.27)</b>	37692.45 <b>(100)</b>
2037	10 <b>(0.03)</b>	15634.77 <b>(41.48)</b>	11962.15 <b>(31.74)</b>	4820.04 <b>(12.79)</b>	5265.49 <b>(13.97)</b>	37692.45 <b>(100)</b>
<b>Perte/gain global en %</b>	<b>-69.88</b>	<b>1.13</b>	<b>5.54</b>	<b>10.64</b>	<b>-19.10</b>	<b>0</b>

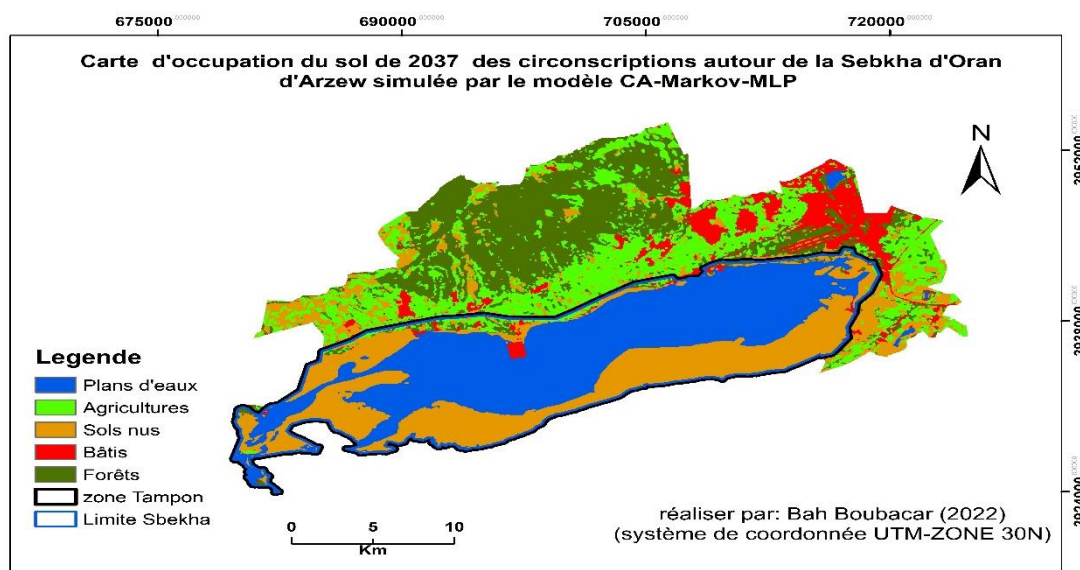


*Figure 70: Dynamique de l'occupation du sol prédit d'ici 2037 dans les zones intermédiaires du lac Telamine et des Salines d'Arzew.*

La prédiction fait dans la zone tampon est similaire à celle de la zone centrale, en effet une extension de 10% des espaces bâtis et de 5 % des surfaces nues est prévue. Quant aux surfaces agricoles, elles connaîtront une extension peu significative par rapport à leurs superficies actuelles. L'extension de ces trois catégories d'occupations du sol se fera par le mitage des surfaces forestières, raison pour laquelle, les couvertures végétales régresseront de 19 %.

### IV.3.2. Analyse de la dynamique future autour de la sebkha d'Oran

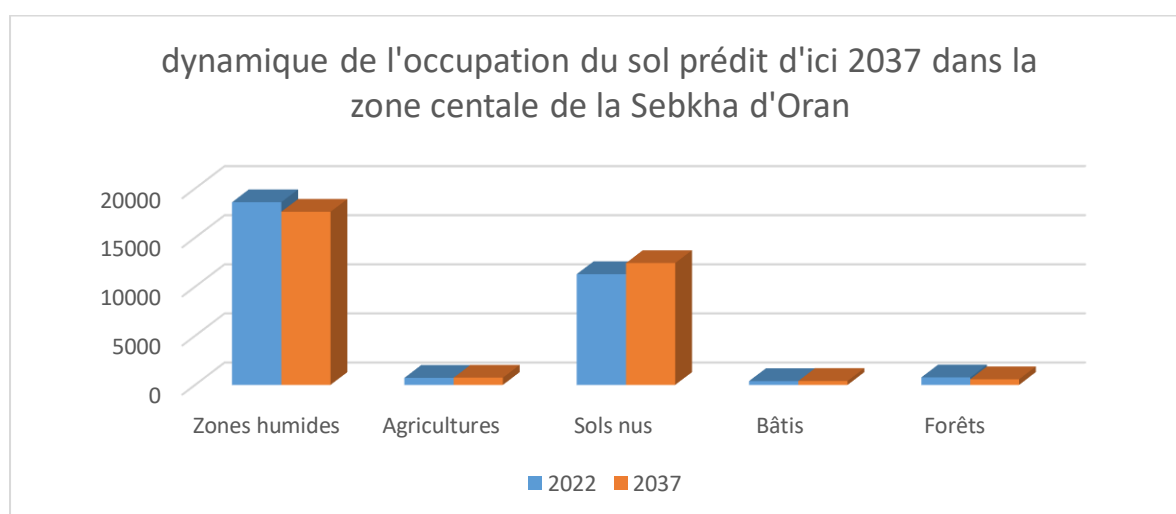
La dynamique future de la sebkha prévoit une dégradation considérable des zones à protéger avec l'extension des activités anthropiques dans ces zones. Une explication détaillée de la dynamique des différentes zones feront l'objet de cette section.



*Figure 71: dynamique de l'occupation du sol de 2037 autour de la Sebkha d'Oran.*

*Tableau 40: Dynamique future prédit dans la zone centrale de la Sebkhha d'Oran :*

Surface des classes en ha	Zones humides (%)	Agricultures (%)	Sols nus (%)	Bâtis (%)	Forêts (%)	Total (%)
2022	18602.28 <b>(58.60)</b>	718.38 <b>(2.26)</b>	11275.74 <b>(35.52)</b>	386.73 <b>(1.22)</b>	759.69 <b>(2.39)</b>	31742.82 <b>(100)</b>
2037	17629.65 <b>(55.54)</b>	734.85 <b>(2.32)</b>	12409.29 <b>(39.09)</b>	398.34 <b>(1.25)</b>	570.69 <b>(1.80)</b>	31742.82 <b>(100)</b>
<b>Perte/gain global en %</b>	<b>-5.23</b>	<b>2.29</b>	<b>10.05</b>	<b>3.00</b>	<b>-24.88</b>	<b>0.00</b>



*Figure 72: dynamique de l'occupation prédit d'ici 2037 dans la zone centrale de la Sebkhha d'Oran.*

D'ici 2037 le plan d'eau de la Sebkhha d'Oran connaîtra une régression de 5 % de sa superficie actuelle ainsi que les couvertures végétales qui régresseront de 24 %, cette surface perdue des couvertures végétales et plan d'eau seront occupées par les sols nus, les cultures et les bâtis, puisque durant cette même période les sols nus progresseront de 10 %, les surfaces agricoles de 2 % et les bâtis de 3%.

*Tableau 41: Dynamique future prédit dans la zone tampon de la Sebkhha d'Oran :*

Surface des classes en ha	Zones humides (%)	Agricultures (%)	Sols nus (%)	Bâtis (%)	Forêts (%)	Total (%)
2022	20.97 <b>(2.65)</b>	348.12 <b>(44.03)</b>	184.23 <b>(23.30)</b>	64.8 <b>(8.20)</b>	172.44 <b>(21.81)</b>	790.56 <b>(100)</b>
2037	5.49 <b>(0.69)</b>	353.61 <b>(44.73)</b>	226.8 <b>(28.69)</b>	69.03 <b>(8.73)</b>	135.63 <b>(17.76)</b>	790.56 <b>(100)</b>
<b>Perte/gain global en %</b>	<b>-73.82</b>	<b>1.58</b>	<b>23.11</b>	<b>6.53</b>	<b>-21.35</b>	<b>0.00</b>

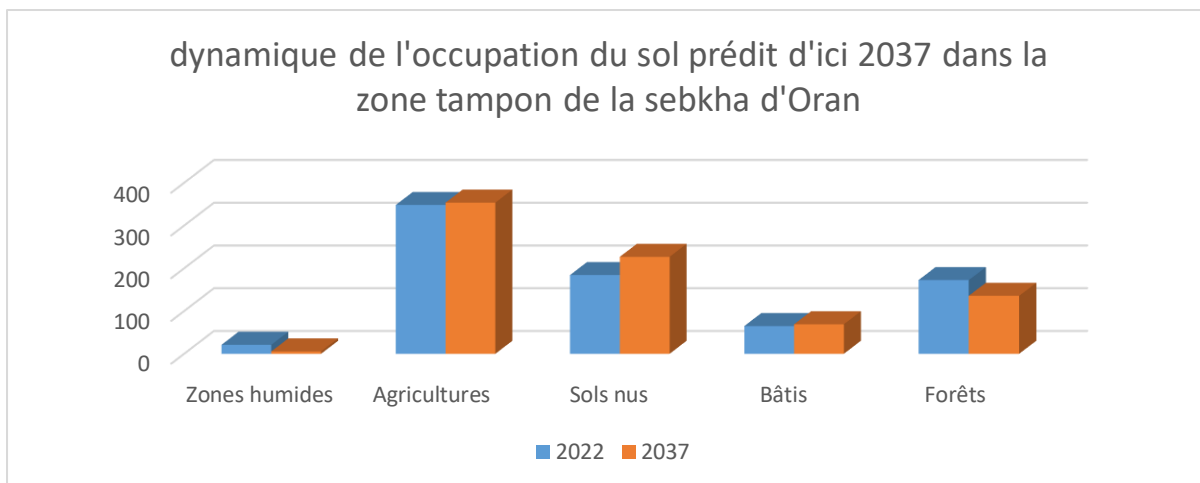


Figure 73: Dynamique de l'occupation du sol prédit d'ici 2037 dans la zone tampon de la Sebkhah d'Oran.

D'après la prédiction la zone tampon de la sebkha connaîtra une régression de 21 % de sa surface forestière ces surfaces vont transiter en zones agricoles et en surfaces bâties puisque ces derniers régresseront de respectivement de 1 % et de 6 %. Une extension de 23 % est aussi à prévoir dans cette zone, cette extension des sols dénudés sera surtout due à une dégradation de la couverture végétale.

Tableau 42: Dynamique future prédit dans la zone intermédiaire de la Sebkhah d'Oran

Surface des classes en ha	Zones humides (%)	Agricultures (%)	Sols nus (%)	Bâtis (%)	Forêts (%)	Total (%)
2022	279.36 <b>(0.77)</b>	12018.33 <b>(33.24)</b>	4489.56 <b>(12.42)</b>	4322.16 <b>(11.95)</b>	15049.89 <b>(41.62)</b>	36159.66 <b>(100)</b>
2037	259.6 <b>(0.72)</b>	12389.48 <b>(34.26)</b>	5802.38 <b>(16.05)</b>	4282.64 <b>(11.84)</b>	13425.56 <b>(37.13)</b>	36159.66 <b>(100)</b>
Perte/gain global en %	<b>-7.07</b>	<b>3.09</b>	<b>29.24</b>	<b>-0.91</b>	<b>-10.79</b>	<b>0.00</b>

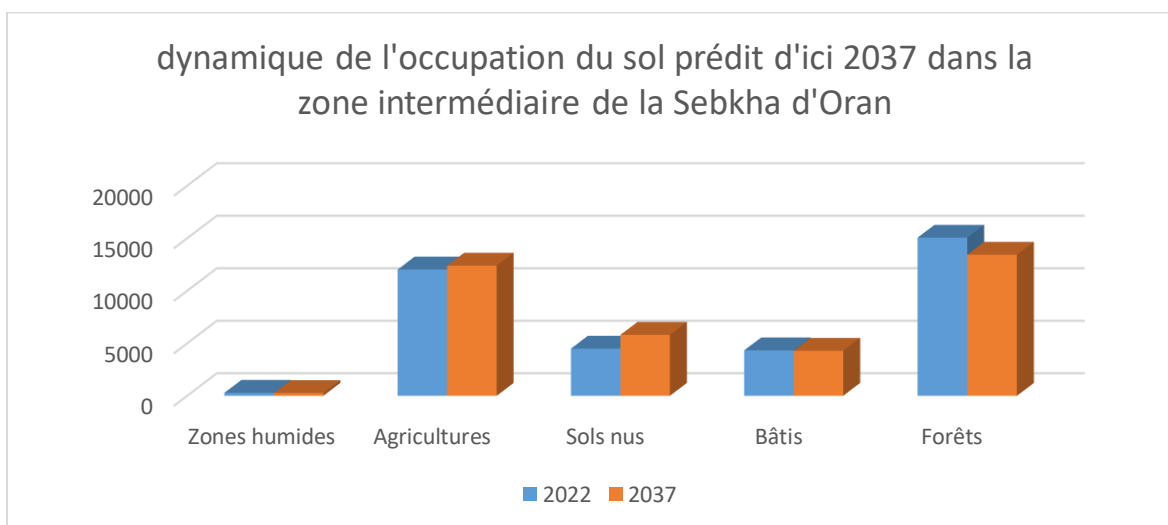


Figure 74: dynamique de l'occupation du sol prédit d'ici 2037 dans la zone intermédiaire de la Sebkhah d'Oran.

33 % de la zone intermédiaire de la sebkha d'Oran est occupée par les cultures, 41 % par les surfaces forestières et 11 % par les sols nus. D'ici 2037 les cultures s'étendront de 3% par



rapport à leurs superficies actuelles, quant aux sols nus ils progresseront de 29 %. Par contre les surfaces forestières régresseront de 10 % par rapport à leurs superficies actuelles. Cette dynamique de la dégradation de la couverture végétale de cette zone humide dans un avenir proche si les tendances d'évolutions observées dans les 30 dernières années restent constantes, d'ici 2037.

#### **IV.4. Conclusion**

La dynamique observée dans ces 30 dernières années montre l'extension considérable des surfaces agricoles, des bâtis et des sols nus au détriment des zones humides et des surfaces forestières. Une telle dynamique est synonyme de dégradation environnemental. En effet la réduction des surfaces forestières conduit d'une part à l'augmentation des gaz à effet de serre, contribuant directement au changement climatique. L'extension urbaine observée dans ses trente dernières années se faisait d'une part aussi par le mitage des surfaces agricoles. Quant à l'extension des sols nus elle se fait par la mise en jachère des surfaces agricoles et la régression des plans d'eau due à la variabilité pluviométrique.

L'analyse faite sur la carte simulée, montre que cette dégradation des surfaces forestières garderait la même tendance avec une régression de 21 % prévues pour les surfaces forestières et de 9 % pour les plans d'eau.

## Conclusion Générale

La présente étude consistait à analyser par modélisation prédictive la dynamique des zones humides dans la Wilaya d'Oran. Pour ce faire, une classification de l'occupation du sol a été réalisée sur des données satellitaires prises sur trois temps à intervalle de 15 années (1992, 2007 et 2022).

L'objectif étant de concevoir des modèles de prédiction de l'occupation future du sol de la Wilaya d'Oran (2037), deux variantes de modèles hybrides CA-Markov ont été construites par apprentissage automatique : le premier par Régression Logistique et le deuxième par Perceptron Multicouche.

De ce fait la comparaison des deux modèles a révélé que le modèle conçu avec les Perceptrons Multicouches donne plus de précision que le modèle conçu avec la Régression Logistique, ceci est dû d'une part à l'impertinence des variables explicatives de prédire correctement les dynamique et d'autre part du fait que les perceptrons offre la possibilité de faire varier leurs paramètres d'apprentissages afin d'optimiser le modèle de façon maximale. Contrairement aux régressions logistiques qui ne prennent en entrée que les variables explicatives pour générer le modèle en interne.

L'autre difficulté rencontrée lors de la construction de ces modèles est dû à la dynamique irrégulière de l'occupation du sol observée pour les deux périodes (1992-2007 ; 2007-2022). Puisque les modèles géo-spatiaux de la prédiction se basent principalement sur les pourcentages de transitions observées entre deux périodes pour prédire les scénarios futurs d'occupation du sol.

L'étude a montré que les variables explicatives pertinentes pour cette modélisation étaient bien l'altitude, la pente, l'hydromorphie, les distances aux routes, le potentiel agricole et les distances aux zones urbaines. D'autres variables absentes dans notre simulation, pourraient apporter une optimisation meilleure, telles que le coût des transports et la densité de la population.

La dynamique de l'occupation observée et prédite (2037) pour les zones humides de la wilaya d'Oran révèle une variabilité considérable du plan d'eau ; enregistrant des régressions de 10% entre 1992 et 2007, puis de 37% entre 2007 et 2022. Cette dynamique des plans d'eaux est un indicateur important de la dégradation des zones humides, causée d'une part par la variabilité du régime pluviométrique et d'autre part par le drainage des eaux pour l'irrigation.

Cette variabilité pluviométrique est l'un des conséquences du changement climatique dont la cause principale est la réduction des surfaces forestières qui sont parmi les réserves importantes du carbone. Ce rôle de stockage du carbone est fonction de la gestion des forêts au niveau local, national et mondial, mettant en évidence une réduction considérable de la couverture végétale durant ces trente dernières années. En effet, la couverture végétale a été réduite de 40% durant la période 1992-2007 de 7% durant 2007-2022 ; cette régression resterait constante d'ici 2037. Il en ressort de cette analyse que la réduction de la couverture végétale et des surfaces forestières ont une corrélation avec la régression des plans d'eaux des zones humides.

Par ailleurs, l'analyse rétrospective et prospective effectuée sur la zone d'étude montre une extension importante des surfaces agricoles, bâties et des sols nus. La prédiction de la dynamique faite sur ces trois catégories d'occupations prévoit une extension de 2% pour les surfaces agricoles, 8% pour les sols nus et de 6% pour les surfaces bâties.

Donc des plans d'aménagements et de protection doivent être mis en place pour prévenir les dégradations futures prédites par notre modèle, telles que la mise en valeur des sols nus pour l'agriculture avant que ces dernières s'étendent dans les surfaces forestières ; l'orientation de l'extension urbaine vers les zones à faible capacité agricole et moins vulnérable. Des opérations de conservation et de régénération des surfaces forestières doivent aussi être mises en place puisque ces dernières décennies ont connu une régression fulgurante qui pourrait causer leur disparition dans un avenir lointain si aucune action ne soit entreprise pour les conserver de l'invasion agricole.

Enfin, notre étude porte un caractère didactique en vue d'initier un axe d'étude des milieux naturels par les modèles d'analyse et de prédiction avancées en vue de préserver leur biodiversité et d'améliorer leur écosystème. La maîtrise théorique et pratique de ces modèles permettrait de mieux comprendre la dynamique des milieux naturels dans la région et aiderait à apporter des solutions intelligentes pour atteindre les objectifs mondiaux de développement durable.

## Référence Bibliographique

1. Abdelmalek S. M. (1986), contribution à l'étude écologique des terrains salés de l'Oranie ; étude de quelques stations des bassins fermés. Mémoire D.E.S. Univ. Senia, Oran, 70p.
2. Abdou M., Hamill L. et Gilbert N. (2012), Designing and Building an Agent-Based Model. In A. J. Heppenstall, A. T. Crooks, L. M. See, & M. Batty (Eds.), Agent-Based Models of Geographical Systems (1st ed., p. 760). Springer Netherlands.  
<http://doi.org/10.1007/978-90-481-8927-4>.
3. Adamus P.R., Stockwell L. T. ( 1983), *A method for wetland functional assessment, vol. 1 : Critical review and evaluation concepts, vol. 2 : FHWA assessment method*, U.S., Center for Natural Areas United States, Department of Transportation, Federal Highway Administration Reports FHWA-IP-82-23 and FHWA-IP-82-24, Washington, DC., 176 p. et 134 p.
4. AECOM Tecslult Inc. (2010), intitulé Caractérisation environnementale des zones humides retenues (Composante 3) et Actions prioritaires et scénarios tendanciels et alternatifs (Composante 4) - Dayet Morsli, AECOM Tecslult Inc., Rapport d'étude.
5. Ahmad A. (2012), Analysis of Maximum Likelihood Classification on Multispectral Data, *Applied Mathematical Sciences*, Vol. 6, pp. 6425 – 6436.
6. Ahmed B. (2013), Le système aquifère de la Grande Sebkhah d'Oran : considérations géologiques et hydrogéologiques, Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Terre, N° 35, Vol. 77 – 92.
7. AKOSO T. (2013), REMOTELY SENSED IMAGE CLASSIFICATION: SUPERVISED CLASSIFICATION ALGORITHM USING ENVI 5.0 SOFTWARE, *Academia*.
8. ALEXANDRIDIS T.K., LAZARIDOU E., TSIRIKA A. et ZALIDIS G.C. (2009), Using Earth Observation to update a Natura 2000 habitat map for a wetland in Greece. *Journal of Environmental Management*, Vol. 90(7), pp. 2243–2251.
9. ANDERSON R. R. et WOBBER R. J. (1973), Wetlands mapping in New Jersey. *Photogrammetric Engineering*, Vol. 39, pp. 353–358.
10. Arsanjani J. J., Helbich M., Kainz W. et Boloorani A. D. (2012), Integration of logistic regression, Markov chain and cellular automata models to simulate urban expansion, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 21(1), pp. 265–275, <http://doi.org/10.1016/j.jag>.
11. Azari M., Tayyebi A., Helbich M. et Reveshty M. A. (2016), Integrating cellular automata, artificial neural network, and fuzzy set theory to simulate threatened orchards: application to Maragheh, Iran, *GIScience & Remote Sensing*, Vol. 1603(January), pp.1–23. <http://doi.org/10.1080/15481603.2015.1137111>.
12. BAHI K. (2012), Contribution à l'Etude Phytoécologique des Zones Humides de la Wilaya d'Oran, Université d'Oran 1 (Faculté Des Sciences, Département de la Biologie), Mémoire Magister.
13. BAHI K., Mohamed Djamel MIARA, Seghir HADJADJ-AOUL (2020), Approche diachronique de la flore des bassins fermés halomorphes de la région d'Oran (N-O Algérie), Bulletin de la Société Royale des Sciences, Vol. 89, Articles, p. 147 – 163

14. BAILLY J. S., LAGACHERIE P., MILLIER C., PUECH C. et KOSUTH P. (2006), Comparison of artificial drainage network detection rates in cultivated landscapes with LiDAR and high resolution IRC images. EGU Hydrological Sciences, Vienne, Autriche, 1 p.
15. BAILLY J. S., PUECH C. et MASSE J. (2003) Applications de l'imagerie à très haute résolution spatiale pour le suivi de l'hydromorphie du marais atlantique de Bourgneuf. *Photo Interpretation*, Vol. 39(1), pp. 22–32.
16. BAKER C., LAWRENCE R., MONTAGNE C. et PATTEN D. (2006), Mapping wetlands and riparian areas using landsat etm1 imagery and decision-tree-based models. *Wetlands*, Vol. 26(2), pp. 465–474.
17. BARDUCCI A., GUZZI D., MARCOIONNI P., et PIPPI I. (2009), Aerospace wetland monitoring by hyperspectral imaging sensors: A case study in the coastal zone of San Rossore Natural Park. *Journal of Environmental Management*, Vol. 90(7), pp. 2278–2286.
18. BARNAUD G. (1998), *Conservation des zones humides : concepts et méthodes appliqués à leur caractérisation*, Muséum national d'Histoire naturelle, Paris, 451p. (Patrimoines naturels ; 34).
19. Bensaâd A. (1994), Climat et potentialités agricoles en Algérie, *Persee*, Vol. 85-86, pp. 5-14.
20. BORK E. W. et SU J. G. (2007), Integrating LiDAR data and multispectral imagery for enhanced classification of rangeland vegetation: A meta analysis. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 111(1), pp. 11–24.
21. Boualaine J. (1993), Notice explicative de la carte de reconnaissance des sols d'Algérie aux 1/200 000 feuilles de Mostaganem, N°21.IMP. La TYPO-LITHO et j. carbonel réunis , d'Alger, 19p.
22. Brinson M. M., Hauer F. R., Lee L. C. Nutter W. L., Rheinhardt R. D., Smith R. D., and Whigham, D. (1995), "A guidebook for application of hydrogeomorphic assessments to riverine wetlands," Technical Report WRP-DE-11, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS. NTIS No. AD A308 365.
23. BRUN B. (2000), Impact de l'homme sur les milieux naturels, perceptions et mesures. Modifier. BERGIER, Paris, 199 p.
24. Campbell J.B. and Wynne R. H. (2011), Introduction to Remote Sensing Fifth Edition. The Guilford Press, New York.
25. Centre canadien de télédétection, *Notions fondamentales de télédétection*, Canada, Un cours tutoriel du Centre canadien de télédétection.
26. César E. S., Valente M. S. et Dias P. V. (2012), Modelação Espacial de Incêndios Florestais: autómatos celulares, 1–6.
27. Chen S. H., Jakeman A. J. and Norton, J. P. (2008), Artificial Intelligence techniques: An introduction to their use for modelling environmental systems, *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 78, pp. 379–400.  
<http://doi.org/10.1016/j.matcom.2008.01.028>.
28. CIVCO D., HURD J., PRISLOE S. et GILMORE M. (2006), Characterization of Coastal Wetland Systems using Multiple Remote Sensing Data Types and Analytical Techniques. *In Geoscience and Remote Sensing Symposium*, IEE, 31 juillet-4 août, Denver, pp. 3442–3446.
29. CLÉMENT B., HUBERT-MOY L. et RAPINEL S., (2008), Évaluation des fonctions des zones humides à partir de données à très haute résolution spatiale. Application expérimentale à la basse vallée de la Dordogne., Rapport final, EPIDOR, 92 p.

30. Cohen W. B., Fiorella M. (1998), Comparison of methods for detecting conifer forest change with Thematic Mapper imagery, *Remote sensing change detection: Environmental monitoring methods and applications*, pp. 89-102.
31. Coppin P., Jonckheere I., Nackaerts K., Muys B., Lambin E. (2004), Change detection methods in ecosystem monitoring, *A review, International Journal of Remote Sensing* [En ligne], vol. 25, pp. 1565-1596. DOI: <https://doi.org/10.1080/0143116031000101675>, DOI : 10.1080/0143116031000101675.
32. COWARDIN L.M. et MYERS V.I. (1974), Remote sensing for identification and classification of wetland vegetation. *The Journal of Wildlife Management*, Vol. 38(2), pp. 308–314.
33. Crooks A. T., et Castle C. J. E. (2012), The Integration of Agent-Based Modelling and Geographical Information for Geospatial Simulation. In A. J. Heppenstall (Ed.), *AgentBased Models of Geographical Systems* (pp. 8–10). Springer Science, <http://doi.org/10.1007/978-90-481-8927-4>.
34. DABROWSKA-ZIELINSKA K., GRUSZCZYNSKA M., LEWINSKI S., HOSCILO A. et BOJANOWSKI J. (2009), Application of remote and in situ information to the management of wetlands in Poland, *Journal of Environmental Management*, 90(7), pp,2261–2269.
35. Damien R. (2008), Sur les automates cellulaires probabilistes: comportements asynchrones, Ecole Normale Supérieure de Lyon, Thèse de doctorat.
36. DAVRANCHE A., (2008), Suivi de la gestion des zones humides camarguaises par télédétection en référence à leur intérêt avifaunistique. Thèse de doctorat, Université de Provence – Aix-Marseille 1, 235p.
37. Deep S. Saklani A. (2014), Modélisation de l'étalement urbain à l'aide d'automates cellulaires, *Revue égyptienne de télédétection et de sciences spatiales*, vol.17, pp. 179-187.
38. Degenne P. (2012), Une approche générique de la modélisation spatiale et temporelle : application à la modélisation des paysages, Université de Marne-la-vallée, Thèse de Doctorat.
39. DENNETT D. C. (1991). *Consciousness explained*, Little, Brown and Company: 528 p.
40. Diédhiou I., Mering C., Sy O. et Sané T. (2016), « Cartographier par télédétection l'occupation du sol et ses changements », *EchoGéo* [En ligne], 54 | 2020, mis en ligne le 31 décembre 2020, consulté le 05 mai 2022. URL : <http://journals.openedition.org/echogeo/20510> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/echogeo.20510>.
41. Direction Générale des Forêts (2016), *Stratégie Nationale de Gestion Ecosystémique des Zones Humides d'Algérie*.
42. Direction Générale des Forêts (2016), *Stratégie Nationale De Gestion Ecosystémique Des Zones Humides d'Algérie*, Direction Générale des Forêts.
43. DISSANSKA M., BERNIER M., PAYETTE S. et OTHERS (2009), Object-based classification of very high resolution panchromatic images for evaluating recent change in the structure of patterned peatlands. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 35(2), pp. 189–215.
44. DOGAN O.K., AKYUREK Z. et BEKLIOGLU M. (2009), Identification and mapping of submerged plants in a shallow lake using quickbird satellite data. *Journal of Environmental Management*, Vol. 90(7), pp. 2138–2143.
45. DROGOUL A., VANBERGUE D. et MEURISSE T. (2003). Multi-agent Based Simulation : Where Are the Agents ? Multi-Agent-Based Simulation II. Berlin/ Heidelberg, *Springer*, 2581/2003 : 43-49.

46. Dubuis A., Simmonneau P. (1960), contribution à l'étude de la végétation halophile des bassins fermés du plateau d'Oran. Direction de l'Hydraulique et de l'équipement rural. Clairbois-Birmondreix. Alger. 114 p.
47. Dugan P.J., Dir. (1992), La conservation des zones humides. Problèmes actuels et mesures à prendre, UINC, Gland (Suisse), 100 p.
48. Durand, Barbut, MM, MJ-H. (1952), Carte des Sols d'Algérie. Oran. Feuille NI 30-NE Webographie, Alger, Service Géographique de l'Armée.
49. Durant et Barbut (1952), *Carte des Sols d'Algérie. Oran. Feuille NI 30-NE*, Alger, service Géographique de l'Armée.
50. EASTMAN J. (2015), TerrSet: Geospatial Monitoring and Modeling Software, Clark Labs, Clark University.
51. EASTMAN J. R. (2015), TerrSet manual, *Accessed in TerrSet version*, vol.18, pp. 1 -390.
52. Egan J. P. (1975), Signal Detection Theory and ROC analysis. Academic Press, New York.
53. Faouzi B. (2019), *Contribution à la réalisation d'Un Atlas numérique des zones humides : cas de la wilaya d'Oran*, université d'Oran2 (Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers, Département de la Géographie), Mémoire de Master.
54. Fatiha L., Belbachir A. H., Benabadji N., Zanoun A. (2011), *Une nouvelle méthode de cartographie de la région d'Oran (Algérie) à l'aide de la télédétection multispectrale*, Compte Rendus Géoscience, vol. 343, pp. 653-663.
55. Feng Y., Yang Q., Hong Z. et Cui L. (2016), Modelling coastal land use change by incorporating spatial autocorrelation into cellular automata model, *Geocarto International*, Vol. 6049(November), pp. 1–19, <http://doi.org/10.1080/10106049.2016.1265597>.
56. Ferber J., Gutknecht O., Fabien M. (2003), From Agents to Organizations: An Organizational View of Multi-Agent Systems, Conference: Agent-Oriented Software Engineering IV, 4th International Workshop, AOSE 2003, Melbourne, Australia, July 15, 2003, Revised Papers.
57. Ferren W. R. Jr., Peggy L. F., and Robert A. L. (1995), WETLANDS OF THE CENTRAL AND SOUTHERN CALIFORNIA COAST AND COASTAL WATERSHEDS : A METHODOLOGY FOR THEIR CLASSIFICATION AND DESCRIPTION, FINAL REPORT PREPARED FOR UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY Region IX San Francisco, CA.
58. Filatova T., Verburg P. H., Parker D. C. et Stannard C. A. (2013), Spatial agent-based models for socio-ecological systems: Challenges and prospects. *Environmental Modelling & Software*, Vol. 45, pp. 1–7, <http://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.03.017>.
59. Frontier B. et Pichod-Viale D. (1993), écosystème : structure, fonctionnement, évolution, Masson, coll. d'Ecologie 21, Paris, 447 p.
60. Fustec E., Lefeuvre J-C., Coll (2000), *Fonction et Valeurs des Zones Humides*, Paris : DUNOD.
61. Gaucher G., Burdin S. (1974), *Géologie, géomorphologie et hydrologie des terrains salés*, Paris, Presse Universitaire de France, 230 p.
62. Gaudreau J., Perez L. et Drapeau P. (2016), BorealFireSim: A GIS-based Cellular Automata Model of Wildfires for the Boreal Forest of Quebec in a Climate Change Paradigm, *Ecological Informatics*, Vol. 32, pp. 12–27, <http://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2015.12.006>.
63. Gehu J.M. et Gehu-Franck J. (1982), La végétation du littoral Nord-Pas de Calais. Essai de synthèse. Région Nord-Pas de Calais/CREPIS. 1 volume, 361 p.
64. Gentil, L. (1868 – 1925), carte géologique du bassin de la Tafna (Oran), Alger, service géologique de l'Algérie.



65. GESSLER P. E., MOORE I. D. (deceased), MCKENZIE N. J. and RYAN P. J. (1995), Soil-landscape modelling and spatial prediction of soil attributes, *International Journal of Geographical Information Systems*, vol. 9, pp. 421-432, DOI: 10.1080/02693799508902047.
66. Gharaibeh A., Shaamala A., Obeidat R., Al-Kofahi S. (2020), Improving land-use change modeling by integrating ANN with cellular automata-markov chain model, *Heliyon*, vol. 6, e05092, doi:10.1016/J.HELIYON.2020.E05092.
67. Ghezlaoui S. M. (2001), Contribution A L'étude Phytoécologique Des Peuplements Halophytes Dans Le Nord De l'Oranie (Algérie Occidentale), Université Abou Bakr Belkaid De Tlemcen (Faculté Des Sciences, Département De Biologie), Mémoire de Magister.
68. Ghodbani T. et Amokrane k. (2013), La zone humide de la Macta : un espace à protéger sur le littoral ouest de l'Algérie, OpenEdition, Vol. 1, pp. 139 – 155.
69. Ghosh P., Mukhopadhyay A., Chanda A., Mondal P., Akhand A., Mukherjee S., Hazra S. (2017). Application of Cellular automata and Markov-chain model in geospatial environmental modeling- A review, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, Vol. 5(January), pp. 64–77. <http://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.01.005>.
70. GILBERT N. et TROITZSCH K. G. (2005). Simulation for the Social Scientist, 2<sup>nd</sup> edition Maidenhead : Open University Press : 312 p.
71. GINESTE P., PUECH C. et MÉROT P. (1998), Radar remote sensing of the source areas from the Coët-Dan catchment , *Hydrological processes*, 12(2), pp,267–284.
72. GLENNAN S. (2005), Modeling Mechanisms. Studies in the History and Philosophy of the Biological and Biomedical Sciences Vol. 2(36), pp. 375-388.
73. GRIMENE C. (2018), Classification de l'occupation des terres agricoles par télédétection satellitaire, université Paul Valéry Montpellier 3, Mémoire de de Master 2.
74. GRIMM V. et RAILSBACK S. (2005). Individual-based Modeling and Ecology, *Princeton University Press*, 480 p.
75. Hadjadji M. (2018), Suivi des indicateurs de pollution dans une zone aride à semi-aride : Diagnostic des environs de Gdyl suite aux dépôts des déchets ménagers et rejet d'eau usée au niveau du lac Télamine, Université d'Oran2 (Faculté des Science de la Terre et de l'Univers), Mémoire Magister.
76. Halmy M. W. A., Gessler P. E., Hicke J. A. and Salem B. B. (2015), Land Use/Land Cover Change Detection and Prediction in the North-Western Coastal Desert of Egypt Using Markov-CA, *Applied Geography*, vol. 63, pp. 101-112, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.06.015>.
77. HARDING D., LEFSKY M., PARKER G. et BLAIR J. (2001), Laser altimeter canopy height profiles: methods and validation for closed-canopy, broadleaf forests. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 76(3), pp. 283–297.
78. HARRIS A. et BRYANT R.G. (2009), A multi-scale remote sensing approach for monitoring northern peatland hydrology: Present possibilities and future challenges. *Journal of Environmental Management*, 90(7), pp,2178–2188.
79. HASSANI M. I. (1987), Hydrogéologie d'un bassin endoréique semi -aride, le bassin versant de la grande Sebkh d'Oran (Algérie)., Univ de Grenoble, Thèse. 3ème cycle 304 p.
80. Hattermann F. F., Krysanova V., Hesse C. (2008), Modelling wetland processes in regional applications, *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 53(5), pp. 1001–1012. <http://doi.org/10.1623/hysj.53.5.1001>.



81. Hayes D. J., Sader S. A. (2001), Comparison of change-detection techniques for monitoring tropical forest clearing and vegetation regrowth in a time series, *Photogrammetric engineering and remote sensing*, vol. 6, pp. 1067-1075.
82. Helmi Z. M. S., Suhaili A. and Mansor S. (2007), The Performance of Maximum Likelihood, Spectral Angle Mapper, Neural Network and Decision Tree Classifiers in Hyperspectral Image Analysis, *Journal of Computer Science* vol. 3 (6), pp. 419-423.
83. HERRERO J. et CASTANEDA C. (2009), Delineation and functional status monitoring in small saline wetlands of NE Spain. *Journal of Environmental Management*, Vol. 90(7), pp. 2212–2218.
84. HESS L.L., MELACK J.M, FILOSO S. et WANG Y. (1995), Delineation of inundated area and vegetation along the Amazon floodplain with the SIR-C synthetic aperture radar, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 33(4), pp,896–904.
85. HUAGUO Z., DONGLING L., LIHONG L. et AIQIN S. (2011), Wetland landscape pattern analysis with remote sensing images in Ximen Island special marine protected area. *In Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications II*. SPIE 8181, 18–21 avril, Prague.
86. HUBERT-MOY L., MICHEL K., CORPETTI T. et CLÉMENT B. (2006), Object-oriented mapping and analysis of wetlands using SPOT 5 data. In *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IGARSS Conference, 31 juillet – 4 août, Denver, pp. 3347–3350.
87. HUBERT-MOY L., MICHEL K., CORPETTI T. et CLÉMENT B., (2006) Object-oriented mapping and analysis of wetlands using SPOT 5 data. In *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IGARSS Conference, 31 juillet – 4 août, Denver, pp. 3347–3350.
88. HURD, J., CIVCO D., GILMORE M. S., PRISLOE S. et WILSON E. H. (2006), Tidal wetland classification from landsat imagery using an integrated pixel-based and object-based classification approach. In *ASPRS 2006 Annual Conference*, 1-5 mai, Reno.
89. Hyandy C., et Martz L. W. (2017), A Markovian and cellular automata land-use change predictive model of the Usangu Catchment, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 38, pp. 64–81, <http://doi.org/10.1080/01431161.2016.1259675>.
90. JACKSON R. D. (1982), Soil Moisture Inferences from Thermal-Infrared Measurements of Vegetation Temperatures. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 20(3), pp,282–286.
91. JENSEN J., HODGSON M., CHRISTENSEN E., MACKAY JR. H., TINNEY L. et SHARITZ R. (1986), Remote sensing inland wetlands: a multispectral approach. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, Vol. 52(1), pp. 87–100.
92. Kacem M. (2006), Etude d'une Sebkhia : la Sebkhia d'Oran (Ouest algérien), Université d'Oran2 (Faculté des sciences de la Terre et de L'Univers département de la Géologie), Thèse de Doctorat.
93. Kafy A. A., Naim M. D. N. H., Subramanyam G., Faisal A. A., Ahmed N. U., Al Rakib A., Kona M. A., Sattar G. S. (2021), Cellular Automata approach in dynamic modelling of land cover changes using RapidEye images in Dhaka, Bangladesh, *Environmental Challenges*, vol. 4, pp. 100084, doi:10.1016/J.ENVC.2021.100084.
94. Kamusoko C. et Gamba J. (2015), Simulating Urban Growth Using a Random Forest-Cellular Automata (RF-CA) Model. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, Vol. 4(2), pp. 447– 470. <http://doi.org/10.3390/ijgi4020447>.

95. KASISCHKE E.S., MELACK J.M. ET CRAIG D. M. (1997), The use of imaging radars for ecological applications—a review. *Remote Sensing of Environment*, 59(2), pp. 141–156.
96. KASISCHKE E. S., SMITH K., BOURGEOU-CHAVEZ L.L., ROMANOWICZ E.A., BRUNZELL S. et RICHARDSON C.J. (2003), Effects of seasonal hydrologic patterns in south Florida wetlands on radar backscatter measured from ERS-2 SAR imagery, *Remote Sensing of Environment*, 88(4), pp. 423–441.
97. KASISCHKE E. S., SMITH K., BOURGEOU-CHAVEZ L.L., ROMANOWICZ E.A., BRUNZELL S. et RICHARDSON C.J. (2003), Effects of seasonal hydrologic patterns in south Florida wetlands on radar backscatter measured from ERS-2 SAR imagery. *Remote Sensing of Environment*, 88(4), pp. 423–441.
98. KASISCHKE E.S. et BOURGEOU-CHAVEZ, L. L. (1997), Monitoring South Florida Wetlands using ERS-1 SAR imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63(3), pp. 281–291.
99. Kaufman Y. J., Wald A. E., Remer L. A., Gao B. C., Li R. R. et Flynn L. (1997), La corrélation de canal MODIS 2,1 mm avec la réflectance visible pour une utilisation dans la télédétection des aérosols . *Transactions IEEE sur les géosciences et la télédétection*. Vol. 35, p. 1286-1298.
100. Kergomard C., (2000), « Pratique des corrections atmosphériques en télédétection : utilisation du logiciel 5S-PC », *Cybergeo: European Journal of Geography* [En ligne], Dossiers, document 181, mis en ligne le 27 avril 2000, consulté le 14 mai 2022. URL : <http://journals.openedition.org/cybergeo/1679> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/cybergeo.1679> .
101. Kergomard C., « Pratique des corrections atmosphériques en télédétection : utilisation du logiciel 5S-PC », *Cybergeo: European Journal of Geography* [En ligne], Dossiers, document 181, mis en ligne le 27 avril 2000, consulté le 07 mai 2022. URL : <http://journals.openedition.org/cybergeo/1679> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/cybergeo.1679>
102. KLEMAS V., FIELD R. et WEATHERBEE O. (2005), NOAA/NERRS Remote Sensing Applications Project: Using Biomass to Monitor Changes in Wetland Habitat. *In Proc. 8th Int. Conf. On Remote Sensing of Marine and Coastal Environment*, Halifax, pp. 17-19 may.
103. KOESTLER A. (1967). *The ghost in the machine*. London, Arkana : 400 p.
104. LABA M., DOWNS R., SMITH S., WELSH S., NEIDER C., WHITE S., RICHMOND M., PHILPOT W. et BAVEYE P. (2008), Mapping invasive wetland plants in the Hudson River National Estuarine Research Reserve using quickbird satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 112(1), pp. 286 –300.
105. LANGANKE T., BURNETT C. et LANG S. (2007), Assessing the mire conservation status of a raised bog site in Salzburg using object-based monitoring and structural analysis. *Landscape and Urban Planning*, Vol. 79(2), pp. 160–169.
106. Langlois P. (2008), Cellular automata for modeling spatial systems. *The Modeling Process in Geography: From Determinism to Complexity*, 278–306. Retrieved from <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9780470611722.ch12/summary>.
107. Lawrence P. J., Chase T. N. (2010), Investigating the climate impacts of global land cover change in the community climate system model. *International Journal of Climatology*, vol. 30, n° 13, p. 2066-2087. DOI : 10.1002/joc.2061

108. Le Hégarat-Masclé S. (2003), Classification methods of agronomic cultures (microwave and visible / infrared electromagnetic wave lengths) *Nature Sciences Sociétés*. vol. 11, n° 1, p. 83-86.
109. LEJOT J., PIÉGAY H., HUNTER P.D., MOULIN B. et GAGNAGE M. (2011), Utilisation de la télédétection pour la caractérisation des corridors fluviaux : exemples d'applications et enjeux actuels. *Geomorphologie-Relief Processus Environnement*, Vol. 2, pp. 157–172.
110. Lin H., Hopmans J. W., Richter D. deB (2011), Interdisciplinary Sciences in a Global Network of Critical Zone Observatories. *Vadose Zone Journal*, vol. 10, pp. 781-785. DOI: 10.2136/vzj2011.0084.
111. Lin, Y.-P., Chu, H.-J., Wu, C.-F., & Verburg, P. H. (2011). Predictive ability of logistic regression, auto-logistic regression and neural network models in empirical land-use change modeling – a case study, *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 25(1), pp. 65–87, <http://doi.org/10.1080/13658811003752332>.
112. Liu Y., Dai L. et Xiong H. (2015), Simulation of urban expansion patterns by integrating auto-logistic regression, Markov chain and cellular automata models. *Journal of Environmental Planning and Management*, Vol. 58(6), pp. 1113–1136. <http://doi.org/10.1080/09640568.2014.916612>.
113. Lu D., Mausel P., Brondízio E., Moran E., (2004), Change detection techniques, *International Journal of Remote Sensing* [En ligne], vol. 25, pp. 2365-2401. DOI: <https://doi.org/10.1080/0143116031000139863>, DOI : 10.1080/0143116031000139863.
114. Lupo F., Reginster I., Lambin E. F. (2001), Monitoring land-cover changes in West Africa with SPOT Vegetation: impact of natural disasters in 1998-1999, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 22, pp. 2633-2639, DOI : 10.1080/01431160117700.
115. MACALISTER C. et MAHAXAY M. (2009), Mapping wetlands in the Lower Mekong Basin for wetland resource and conservation management using Landsat ETM images and field survey data. *Journal of Environmental Management*, Vol. 90(7), pp. 2130–2137.
116. Maltby E., Barker T., Linstead C., (2009), Development of a European Methodology for the Functional Assessment of Wetlands 513-544 in: *The Wetlands Handbook*. Oxford, Edward Maltby & Tom Barker.
117. Maltby E., Hogan D.V., Immirzi C.P., Tellam J.H. and van der Peijl, M.J. (1994), Building a new approach to the investigation and assessment of wetland ecosystem functioning. In: *Global Wetlands: Old World and New*. Ed. W.J. Mitsch. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
118. Mandrekar J. N. (2010), Receiver Operating Characteristic Curve in Diagnostic Test Assessment, *J. Thorac. Oncol*, Vol. 5, pp. 1315–1316, doi:10.1097/JTO.0B013E3181EC173D.
119. MARILLEAU N. (2006), Méthodologie, formalismes et outils de modélisation simulation pour l'étude des systèmes complexes : application à la mobilité géographique, université de Franche-Comté (Besançon), Thèse de doctorat.
120. Mas J. F., Kolb M., Paegelow M., Camacho O. M. T., and Houet T., (2014). Inductive pattern-based land use/cover change models: A comparison of four software packages, *Environmental Modelling & Software*, vol. 51, pp. 94–111, <http://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.09.010>.
121. Mas J.F., Soares-Filho B. S., Pontius Jr. R. G., Gutiérrez M. F., Rodrigues. H. O. (2013), A Suite of Tools for ROC Analysis of Spatial Models, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, Vol. 2(3), pp. 869-887.

122. Matthew, MW, SM Adler-Golden, Berk A., Richtsmeier SC., Levine RY, Bernstein LS, Acharya PK, Anderson GP, Felde GW, Hoke MP, Ratkowski A., Burke H. H., Kaiser RD. et Miller DP., (2000), État de la correction atmosphérique à l'aide d'un algorithme basé sur MODTRAN4 . Actes SPIE, Algorithmes pour l'imagerie multispectrale, hyperspectrale et ultraspectrale VI. Vol. 4049, p. 199-207.
123. Megan K., Peyre M. L., Reams A. and Mendelsohn I. A. (2001), Linking actions to outcomes in wetland management: an overview of U.S. state wetland management. *Wetlands*, vol. 21, pp. 66-74.
124. Megharbi A. (2017), Approche Synécologique et dynamique des groupements des halophytes des Marais de la Macta, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène (Faculte des Sciences Biologiques), Thèse de Doctorat.
125. METZMACHER M. (1979), Les oiseaux de la Macta et de sa région (Algérie) : non passereaux . *Avès* , n° 34, p. 89-123.
126. Mitsch William J., Gosselink J. G. (1993), *Wetlands (2th Edition)*, Van Nostrand Reinhold Compagny, New York, 722 p.
127. MOORE D., GRAYSON R. B., and LADSON, A. R. (1991), Digital terrain modelling: review of hydrological, geomorphological, and biological applications, *Hydrological Processes*, Vol. 5, pp. 3-30.
128. Moulay I. H. (1987), Hydrogéologie d'un bassin endoréique semi-aride : le bassin versant de la grande Sebkhha d'Oran (Algérie), Université Scientifique et Médicale de Grenoble, Thèse de Doctorat.
129. MOUSSA K. (2006), Carte géomorphologique de la grande sebkhha d'Oran ; description et interprétation dynamique. Bulletin de l'ORGM, Alger, 1er janvier 2006, Vol. 17, n°1. pp. 47- 62, 5 fig., 2006.
130. Munshi T., Zuidgeest M., Brussel M. et Maarseveen, V. M. (2014), Logistic regression and cellular automata-based modelling of retail, commercial and residential development in the city of Ahmedabad, India, *Cities*, Vol. 39, pp. 68–86. <http://doi.org/10.1016/j.cities.2014.02.007>.
131. NRC (1995), *Wetlands : Characteristic and boundaries*, National Research Council, Commission on Geosciences, Environment and Ressources, Washington, 268 p.
132. Off Ypur Map (2020), Zones humides côtières et crise climatique : Pourquoi la Méditerranée a besoin des solutions fondées sur la nature, Off Your Map.
133. Ouellet A. M. H. (2010), Modélisation de l'habitat de la sauvagine en nidification dans le Québec forestier. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.
134. Ozah A. P., Adesina F. A. et Dami A. (2010), A Deterministic Cellular Automata Model for Simulating Rural Land Use Dynamics: A Case Study of Lake Chad Basin. *ISPRS Archive*, XXXVIII, pp. 75–81.
135. OZESMI S. L. et BAUER M.E. (2002), Satellite remote sensing of wetlands. *Wetlands Ecology and Management*, Vol. 10(5), pp. 381–402.
136. Ozturk D. (2015), Urban Growth Simulation of Atakum (Samsun, Turkey) Using Cellular Automata-Markov Chain and Multi-Layer Perceptron-Markov Chain Models, *Remote Sensing*, Vol. 7(5), pp. 5918–5950, <http://doi.org/10.3390/rs70505918>.
137. Parsa V. A. , Salehi E. (2016), Analyse spatio-temporelle et modèle de simulation des changements d'utilisation/de couverture des terres, étude de cas : Naghadeh, Iran, *Journal of Urban Management*, vol. 5, pp. 43-51.

138. PARUNAK H. V. O., SAVIT R et RIOLO R. L. (1998). Agent-Based Modeling vs. Equation-Based Modeling: a Case Study and Users 'Guide. Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation. J. S. Sichman, R. Conte and N. Gilbert, SpringerVerlag : 16 p.
139. Péquignot A. (1890), Essai sur la constitution de la saline d'Arzew. Ed imprimerie typographique et lithographique Victor collet, Oran 21p.
140. Petit C. C., Lambin E. F. (2001), Integration of multi-source remote sensing data for land cover change detection, *International Journal of Geographical Information Science*, [En ligne] vol. 15, pp. 785–803. DOI: <https://doi.org/10.1080/13658810110074483>, DOI : 10.1080/13658810110074483.
141. Pierre A. (1995), AUTOMATES CELLULAIRES ET DYNAMIQUE SPATIALE. MODELISATION DE LA DYNAMIQUE FORESTIERE , *Revue ecologie*, vol. 50 pp. 261 – 272.
142. Pontius R. G. Jr. and Schneider L. (2001), Land-use change model validation by a ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Vol. 85, pp. 239-248.
143. Pontius R. G. Jr., Emily S., Menzie M. (2004), Detecting important categorical land changes while accounting for persistence, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, V. 101, pp. 251-268.
144. POPE K.O., REJMANKOVA E., PARIS J.F. et WOODRUFF R. (1997), Detecting seasonal flooding cycles in marshes of the Yucatan Peninsula with SIR-C polarimetric radar imagery. *Remote Sensing of Environment*, 59(2), pp,157–166.
145. PRIGENT C., MATTHEWS E., AIRES F. et ROSSOW W. (2001), Remote sensing of global wetland dynamics with multiple satellite data sets, *Geophysical Research Letters*, 28(24), pp. 4631–4634.
146. Quillet A., Frolking S., Garneau M., Talbot J. et Peng C. (2013), Assessing the role of parameter interactions in the sensitivity analysis of a model of peatland dynamics. *Ecological Modelling*, Vol. 248, pp. 30–40. <http://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.08.023>.
147. Rapinel s. (2012), Contribution de la télédétection à l'évaluation des fonctions des zones humides : de l'observation à la modélisation prospective, Université Rennes 2, Thèse de Doctorat.
148. RAVONJIMALALA H. R. (2019), modelisation spatiale des changements d'occupation du sol et de la fragmentation de la foret dense seche du sud ouest de madagascar : cas de la commune analamisampy, université d'antananarivo (école doctorale physique et applications), Thèse de Doctorat.
149. Reddy M. A. (2008), Remote Sensing and Geographic Information System. Third Edition BS Publication
150. ROVER J., WRIGHT C., EULISS N., MUSHET D. et WYLIE B. (2011), Classifying the Hydrologic Function of Prairie Potholes with Remote Sensing and GIS. *Wetlands*, Vol. 31(2), pp. 319–327.
151. RUNDQUIST D.C., NARUMALANI S. et NARAYANAN R. M. (2001), A review of wetlands remote sensing and defining new considerations. *Remote Sensing Reviews*, 20(3), pp,207–226.
152. Saaty T.L. (1980), The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill, New York.
153. SCHWEITZER F. (1997), Active Brownian particles : Artificial Agents in Physics. Stochastic Dynamics. L. Schimansky-Geier and T. Poschel. Berlin, *Springer*, Vol. 484, pp. 358-371.



154. Secrétariat de la Convention de Ramsar (2013), Le Manuel de la Convention de Ramsar: Guide de la Convention sur les zones humides (Ramsar, Iran, 1971), Secrétariat de la Convention de Ramsar, rapport 6e édition.
155. Shafizadeh Moghadam H. et Helbich, M. (2013), Spatiotemporal urbanization processes in the megacity of Mumbai, India: A Markov chains-cellular automata urban growth model. *Applied Geography*, Vol. 40, pp. 140–149.  
<http://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.01.009>.
156. Shalaby A. and Tateishi R. (2007), Remote Sensing and GIS for Mapping and Monitoring LC and Land-Use Changes in the Northwestern Coastal Zone of Egypt, *Applied Geography*, vol. 27, pp. 28-41.
157. SHI J., WANG J., HSU A. Y., O'NEILL P. E. et ENGMAN E. T. (1997), Estimation of bare surface soil moisture and surface roughness parameter using L-band SAR image data. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, Vol. 35(5), pp. 1254–1266.
158. SHUMAN C. S. et AMBROSE R. F. (2003), A Comparison of Remote Sensing and GroundBased Methods for Monitoring Wetland Restoration Success, *Restoration Ecology*, Vol. 11(3), pp. 325–333.
159. Sidhoum EP.B. W. (2019), ETUDE DE LA DIVERSITE DES CHMAPIGNONS MYCORHIZIENS ARBUSCULAIRES DANS LES SOLS POLLUES DU NORD-OUEST ALGERIEN, université d'Oran1 (Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie), Thèse de Doctorat.
160. SIMONEAU P. et QUÉZEL P. (1960), Quelques aspects de la végétation des terrains salés des plaines sub-littorales de l'Oranie Orientale, *Bulletin de l'Institut National d'Agriculture, d'Alger*, n° 6, p. 15-30.
161. SIMPSON J. (2006). Simulations are not models. Models and simulations conference, Paris, Center for philosophy of Natural and Social Science, London School of Economics.
162. SITAYEB T. et BENABDELI K. (2008), Contribution à l'étude de l'occupation des sols de la plaine de la Macta (Algérie) à l'aide de la télédétection et des systèmes d'information géographique. *Comptes rendus biologie*, vol. 331, n° 6, p. 466-476.
163. SOBOCINSKI K. L., BORDE A.B., MILLER L.M. , THOM R.M. et TEAR L.M. (2006), *Columbia River Estuary Habitat Monitoring Pilot Field Study and Remote Sensing Analysis*, Lower Columbia River Estuary Partnership, 51 p.
164. Sohl T., Reker R., Bouchard M., Saylor K., Dornbierer J., Wika S., Friesz A. (2016), Modeled historical land use and land cover for the conterminous United States, *Journal of Land Use Science*, Vol. 11(4), pp. 476–499.  
<http://doi.org/10.1080/1747423X.2016.1147619>.
165. SOLETANCHE (1950), Grande sebkha d'Oran : géologie et hydrogéologie. Entreprise de Fondation et Travaux Hydrauliques, Paris et Alger (document interne).
166. SUGUMARAN R., HARKEN J. et GERJEVIC J. (2004), *Using Remote Sensing Data to Study Wetland Dynamics in Iowa*, Rapport technique, Université d'Iowa, 17 p.
167. TANDJIR L. (2011), *les zones Humides : Unités Environnementales Fondamentales*, Constantine : O.P.U (Office des Publications Universitaires).
168. Tang Y., Atkinson P. M., Wardrop N. A., Zhang J. (2013), Multiple-point geostatistical simulation for post-processing a remotely sensed land cover classification Spatial Statistics, vol. 5, p. 69-84
169. Thintoin R. (1949), justification de la carte phyto géologique de l'Algérie occidentale. Bulletin tome 72. Ed L. Fouque, Oran.

170. Tian Yuan, Xia Yiping, Zhou Lei et Li Danqing (2015), Land Use and Cover Change Simulation and Prediction in Hangzhou City Based on CA-Markov Model, *International Proceedings of Chemical, Biological and Environmental Engineering*, Vol. 90, pp. 108-113
171. Tiné M. O. (2018), Modélisation spatiale des changements dans les milieux humides ouverts par automate cellulaire : étude de cas sur la région administrative de l'Abitibi-Témiscamingue, au Québec, Canada, université de Montréal (Département de géographie, Faculté des arts et des sciences), mémoire de Maitrise.
172. Tiné M., Perez L., Molowny-Horas R., Darveau M. (2019), Hybrid spatiotemporal simulation of future changes in open wetlands: a study of the Abitibi-Témiscamingue region, Québec, Canada., *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol.74, pp. 302-313.
173. TINTHOIN R. (1948), *Les aspects du Tell oranais, essai de morphologie de pays semiaride*, Thèse de Doctorat d'État, Université d'Alger, 452 p.
174. Torrens P. M. et Benenson I. (2005), Geographic Automata Systems, *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 19(4), pp. 385–412.  
<http://doi.org/10.1080/13658810512331325139>.
175. Tou J. T., Gonzalez R. C. (1974), *Pattern Recognition Principles*, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts .
176. TOWNSEND P.A. et WALSH S. J. (1998), Modeling floodplain inundation using an integrated GIS with radar and optical remote sensing, *Geomorphology*, 21(3), pp, 295–312.
177. TÖYRÄ J. et PIETRONIRO A. (2005), Towards operational monitoring of a northern wetland using geomatics-based techniques. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 97(2), pp. 174–191.
178. Treuil J-P., Drogoul A, Zucke J-D. (2008), *MODELISATION ET SIMULATION A BASE D'AGENTS*, Paris, DUNOD.
179. TRICK M. (1996). An Introduction to Simulation. from <http://mat.gsia.cmu.edu/simul/>.
180. Turner R.K (1992), « défaillance des politiques dans la gestion des humides » in *défaillance du marché et des gouvernements dans la gestion de l'environnement. Les zones humides et les forêts*, Paris, OCDE, pp. 9-47.
181. UHRMACHER A. M. (1997). Concepts of object- and agent-oriented simulation. *Trans. Soc. Comput. Simul. Int.* 14(2), pp : 59-67.
182. Wade C. T. (2016), *ARIDITÉ ET SEMI-ARIDITÉ : ACCEPTIONS, CONTENUS ET ÉVOLUTIONS*, Innovation environnementale et développement Afrique.
183. Wang S.W., Munkhnasan L., Lee W. K. (2021), Land use and land cover change detection and prediction in Bhutan's high altitude city of Thimphu, using cellular automata and Markov chain, *Environ. Challenges*, vol. 2, pp. 100017, doi:10.1016/J.ENVC.2020.100017.
184. WADOWINSKI S., KIM S. W., AMELUNG F., DIXON T.H., MIRALLES-WILHELM F. et SONENSHEIN R. (2008), Space-based detection of wetlands' surface water level changes from L-band SAR interferometry. *Remote Sensing of Environment*, 112(3), pp. 681– 696.
185. Wei Zheng H, Qiping Shen, Wang H et Hong J. (2015), Simuler le changement d'affectation des terres dans les zones de renouvellement urbain : une étude de cas à Hong Kong . *Habitat International*, vol. 46, pp. 23-34.  
<https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2014.10.008> .

186. Wenfeng Gong, Li Yuan Éventail Wenyi, Philippe George Stott (2015), Analysis and simulation of land use spatial pattern in Harbin prefecture based on trajectories and cellular automata—Markov modelling, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 34, pp. 207-2016.
187. WOOLDRIDGE M., JENNINGS N. R. et KINNY D. (2004), The Gaia Methodology for Agent-Oriented Analysis and Design, *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* Vol. 3(3), pp. 285-312.
188. Wu F. (2002), Calibration of stochastic cellular automata: The application to rural-urban land conversions. *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 16(8), pp. 795–818, <http://doi.org/10.1080/13658810210157769>.
189. Wu H. I., Wang X. L., Ning L. M., Lu Y. F. (2006), Effects of land use change on ecosystem services value: A case study in Wuhan City, *Resources and Environment in the Yangtze Basin* vol.15, pp. 186-190.
190. Yu Huan Zhengwei He, Casserole Xin, Shuqing Zhang (2010), Wetlands spatial-temporal évolution simulation using Multi-Agent System: A case study in China, *3rd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics*, 2010, pp. 2438-2441, doi: 10.1109/BMEI.2010.5639916.
191. Yu H., He Z. et Pan X. (2010), Wetlands shrink simulation using Cellular Automata: A case study in Sanjiang Plain, China. *Procedia Environmental Sciences*, Vol. 2(5), pp. 225–233, <http://doi.org/10.1016/j.proenv.2010.10.027>.
192. Yu H., He Z., et Pan X. (2010), Wetlands shrink simulation using Cellular Automata: A case study in Sanjiang Plain, China, *Procedia Environmental Sciences*, Vol. 2(5), pp. 225–233, <http://doi.org/10.1016/j.proenv.2010.10.027>.
193. Yu J., Chen Y., Wu J. et Khan S. (2011), Cellular automata-based spatial multi-criteria land suitability simulation for irrigated agriculture, *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 25(1), pp. 131–148, <http://doi.org/10.1080/13658811003785571>.
194. Yu-Pin Lin; Hone-Jay Chu; Chen-Fa Wu; Peter H. Verburg (2011), Predictive ability of logistic regression, auto-logistic regression and neural network models in empirical land-use change modeling - a case study, *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 25: 1, pp. 65 — 87
195. Zalidis G., Mantzavelas A., Gourvelou E (1997), Environmental impacts on greek wetlands. *Wetlands*, vol. 17, pp. 339–345.
196. Zemaili N. M., Benbadji N., Hasinni A., Belbachir A. H. (2009), Méthode d'étalonnage radiométrique des images satellitaires NOAA-HRPT, *Journées d'Animation Scientifique (JAS09) de l'AUF, Alger Novembre 2009*.

## Webographie :

<https://rsis.ramsar.org/fr/ris/1055> consulté le 25 – 03 – 2022

<https://www.aps.dz/societe/57352-oran-des-bassins-de-decantation-pour-depolluer-le-lac-telamine> consulté le 31/03/2022.

<https://medwet.org/fr/medwet> consulté le 06/04/2022



<https://www.pole-tourbieres.org/a-la-decouverte-des-tourbieres/article/qu-est-ce-qu-une-tourbiere> consulté le 15 avril 2022

<https://africa.wetlands.org/zones-humides/quels-sont-les-zones-humides/#:~:text=Elles%20comprennent%20les%20mangroves%2C%20les,des%20r%C3%A9gions%20polaires%20aux%20tropiques>. Consulté le 15/04/2022.

<https://www.iedafrique.org/Aridite-et-semi-aridite-acceptations-contenus-et-evolutions.html> consulté le 16/04/2022

<https://council.science/fr/current/blog/climate-explained-why-is-the-arctic-warming-faster-than-other-parts-of-the-world/> consulté le 17/04/2022.

<http://fr.scienceaq.com/Nature/1001046545.html> consulté le 18/04/2022.

<https://www.rncan.gc.ca/cartes-outils-et-publications/imagerie-satellitaire-et-photos-aeriennes/tutoriel-notions-fondamentales-teledetection/teledetection-par-hyperfrequences/proprietes-des-images-radars/9300> consulté le 20/04/2022.

<https://wikispaces.psu.edu/display/AnthSpace/Compound+Topographic+Index> consulté le 30/04/2022

<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8> consulté le 05/05/2022

<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-7> consulté le 05/05/2022

<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-5> consulté le 05/05/2022

<https://www.l3harrisgeospatial.com/docs/backgroundflaash.html> consulté le 09/05/2022  
consulté le 09/05/2022

[https://www.earthstartsbeating.com/2017/04/27/top-of-atmosphere-reflectance-on-sentinel-3/#:~:text=Top%20of%20Atmosphere%20\(TOA\)%20Reflectance,and%20the%20solar%20zenith%20angle](https://www.earthstartsbeating.com/2017/04/27/top-of-atmosphere-reflectance-on-sentinel-3/#:~:text=Top%20of%20Atmosphere%20(TOA)%20Reflectance,and%20the%20solar%20zenith%20angle). Consulté le 10/05/2022

<https://www.l3harrisgeospatial.com/docs/isodataclassification.html>. Consulté le 13/05/2022

<https://www.l3harrisgeospatial.com/docs/calculatingconfusionmatrices.html>. Consulté le 17/05/2022.

<https://popups.uliege.be/1780-4507/index.php?id=7734&lang=es>. Consulté le 17/05/2022