

الجمهورية الجزائرية الشعبية الديمقراطية

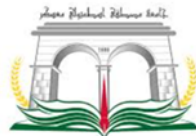
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE**

جامعة مصطفى اسطمبولي معسكر

UNIVERSITÉ MUSTAPHA STAMBOULI DE MASCARA



Faculté des Sciences et de la Technologie Département d'Hydraulique

Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau

THESE

Présentée pour l'obtention du grade de DOCTORAT 3ème Cycle En : Hydraulique

Spécialité : Ressources Hydrauliques

*Par : **CHERIGUI Akila***

Sujet

**Impact des scénarios d'occupation du sol sur la gestion
intégrée des ressources en eau à l'échelle du bassin
hydrologique**

Soutenue publiquement, le **14/09/2025**, devant le jury composé de :

BEKKOUSSA Belkacem	Pr	Président	Université de Mascara
BOUANANI Abderrazak	Pr	Examineur	Université de Tlemcen
Baba Hamed Kamilia	Pr	Examinatrice	Université de Tlemcen
TALIA Amel	MCA	Directrice de thèse	Université de Mascara
BENSTAALI Imene	MCA	Co- directrice de thèse	Université de Mascara

Année Universitaire : 2024-2025

Remerciements

Je rends d'abord grâce à Allah, pour nous avoir permis d'accéder au savoir, et pour nous avoir accordé la force, la santé et la détermination indispensables à l'accomplissement de ce travail

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde reconnaissance à ma directrice de thèse, le Dr Talia Amel, Maître de Conférences A la Faculté des Sciences et Technologies de l'Université de Mascara, pour avoir accepté de diriger ce travail avec une grande attention et une patience remarquable. Je la remercie chaleureusement pour la confiance qu'elle m'a accordée, sa disponibilité constante, ainsi que son soutien précieux tout au long de la réalisation de cette recherche.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à ma co-directrice, Madame Benstaali Imène, Maître de Conférences A la Faculté des Sciences et Technologies de l'Université de Mascara, pour sa générosité, la pertinence de ses conseils, ses remarques constructives, ainsi que pour son accompagnement constant et sa rigueur scientifique.

Je la remercie sincèrement de m'avoir offert l'opportunité de mener à bien ce travail. Je tiens également à remercier Monsieur Mahi Habib, Directeur du Centre des Techniques Spatiales (CTS) d'Arzew, ainsi que Monsieur Karoui Sofiane, Chef de département du laboratoire de télédétection, Monsieur Blissag Bilel et Monsieur Cherif Kessar, spécialistes en télédétection des ressources en eau au sein du Département Observation de la Terre. Leur disponibilité, leur patience et la richesse de leurs conseils ont constitué un apport précieux qui m'a grandement aidé dans la réalisation de ce travail. Leurs orientations m'ont permis de mener à bien ce projet.

Je souhaite également exprimer ma sincère gratitude à toutes les personnes ayant contribué à la réussite de ce travail, en particulier au Professeur Zerouali Bilel, de la Faculté de Génie Civil et d'Architecture de l'Université de Chlef, pour sa collaboration précieuse et fructueuse, qui a été une source d'informations et de conseils particulièrement utiles.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur Abdelkader ELOUISSI, Professeur à la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie de l'Université de Mascara, pour ses remarques pertinentes et ses suggestions constructives qui ont grandement enrichi ce manuscrit.

J'adresse mes sincères remerciements au Professeur Meddi Mohamed, de l'École Nationale Supérieure de l'Hydraulique (ENSH) – Laboratoire du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Blida, pour l'intérêt qu'il a porté à mes travaux, son aide précieuse et sa contribution à la réussite de cette thèse.

Mes sincères remerciements s'adressent aux membres du jury qui ont bien voulu assister et juger cette thèse. Le Pr Bekkoussa Belkacem Samir de l'université de Mascara, qui a bien voulu m'honorer en présidant ce jury, de même que le Pr Bouanani Abdelrazak et Pr Baba Hamed Kamilia de l'université de Telemcen.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à l'ensemble de mes collègues et enseignants de l'Université de Mascara pour leur soutien moral, leur bienveillance et la richesse de nos échanges, qui ont grandement contribué à l'avancement de ce travail. J'adresse également mes plus sincères remerciements à tout le personnel du Département d'Hydraulique de l'Université de Mascara pour leur disponibilité et leur appui constant.

Dédicace :

À ma mère bien-aimée, Khadra Benadjila, dont l'amour, la présence et les encouragements ont été pour moi une source d'inspiration inépuisable.

À mon cher père, Mohamed, pour son soutien et sa bienveillance tout au long de mon parcours.

À mes frères Said, Omar et Ramy, à ma sœur Aïcha et à son époux Mohamed, pour leur affection et leur soutien constants.

Aux bourgeons de notre famille : Farouk, Fadia, Farah, Inès, Ihsen, Hamoudi et Imène, dont la tendresse et la joie de vivre m'ont portée dans les moments les plus exigeants.

À mes amis fidèles, dont le soutien indéfectible a été un véritable réconfort et une source précieuse d'encouragement.

Enfin, je dédie également cette réalisation à toutes les personnes qui ont partagé mes espoirs et qui ont, avec bienveillance et patience, accompagné l'attente de l'aboutissement de ce travail

Résumé

L'étude sur l'évolution de l'Utilisation et de l'Occupation des Sols (LULC) dans le bassin versant de l'Oued Fekan, situé dans le nord-ouest de l'Algérie, met en évidence les impacts significatifs du développement socio-économique et de l'expansion urbaine sur l'environnement. À l'aide d'images satellites Landsat et de modèles combinant Réseaux de Neurones Artificiels (RNA) et Automate Cellulaire-Chaîne de Markov (CA-MC), l'analyse de l'évolution entre 2001 et 2021 révèle une augmentation spectaculaire des zones urbaines, avec une diminution des forêts et des terres agricoles. Les projections pour 2051 prévoient une poursuite de l'urbanisation, accompagnée d'une réduction des couvertures forestières et des prairies, menaçant ainsi la stabilité écologique et hydrologique du bassin.

L'analyse du bilan hydrologique, basée sur des outils géospatiaux et des modèles hydrologiques comme SCS-CN, Penman-Monteith, montre que l'urbanisation a exacerbé le ruissellement, réduit l'infiltration et augmenté l'évapotranspiration potentielle (ETP). Ces changements ont des conséquences directes sur la gestion de l'eau, notamment la recharge des nappes phréatiques et la disponibilité en eau. L'urbanisation a diminué la capacité de rétention des sols, augmentant ainsi le risque d'inondations locales et la demande en eau en raison de l'effet d'îlot de chaleur urbain.

En parallèle, l'utilisation du modèle WEAP (Water Evaluation and Planning) pour simuler les projections futures d'approvisionnement et de demande en eau jusqu'en 2054, mettant en lumière les tensions croissantes entre l'offre et la demande en eau, en particulier dans les secteurs domestiques, agricoles et industriels. La forte croissance démographique, si elle n'est pas rigoureusement contrôlée, pourrait entraîner une pression accrue sur les ressources hydriques et conduire à leur surexploitation.

Cette étude souligne la nécessité de mettre en œuvre une gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) et de promouvoir des stratégies d'aménagement durable des terres pour atténuer les effets néfastes de l'urbanisation et du changement climatique sur les ressources en eau. Les résultats fournis par cette recherche constituent un outil précieux pour les décideurs afin de prendre des mesures éclairées pour une gestion durable du bassin de l'Oued Fekan.

Mots-clés : Utilisation et l'Occupation des Sols, Landsat, Automates cellulaires, Modèle de chaîne de Markov, Développement durable, Urbanisation, Bilan hydrique, WEAP

الملخص:

تسلط الدراسة حول تطور استخدام الأراضي وتغيراتها في حوض وادي فكان، الواقع شمال غرب الجزائر، والتأثيراتها الكبيرة على التنمية الاجتماعية والاقتصادية والتوسع الحضري على البيئة. باستخدام صور الأقمار الصناعية Landsat ونماذج تجمع بين الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) وسلسلة ماركوف الخلوية (CA-MC)، يكشف تحليل تطور استخدام الأراضي بين عامي 2001 و 2021 عن زيادة كبيرة في المناطق الحضرية، مع انخفاض في الغابات والأراضي الزراعية. وتشير التوقعات لعام 2051 إلى استمرار التوسع الحضري، مصحوبًا بانخفاض في غطاء الغابات والأراضي العشبية، مما يهدد الاستقرار البيئي والهيدرولوجي للحوض.

ويُظهر تحليل توازن المياه، الذي يعتمد على أدوات جغرافية مكانية ونماذج هيدرولوجية مثل SCS-CN وصيغة Penman-Monteith، أن التوسع الحضري أدى إلى تفاقم الجريان السطحي وتقليل التسلسل وزيادة التبخر المحتمل (ETP). مما ترتب على هذه التغيرات عواقب مباشرة على إدارة المياه، بما في ذلك إعادة شحن المياه الجوفية. كما أدى التوسع الحضري إلى انخفاض قدرة التربة على الاحتفاظ بالمياه، مما أدى إلى زيادة خطر الفيضانات المحلية والطلب على المياه.

وبالتوازي مع ذلك، أتاح استخدام نموذج WEAP (تقييم وتخطيط المياه) لمحاكاة التوقعات المستقبلية لإمدادات المياه والطلب عليها حتى عام 2054، مما يسلط الضوء على التوترات المتزايدة بين العرض والطلب على المياه، وخاصة في القطاعات المنزلية والزراعية والصناعية. مع تطور النمو السكاني السريع، إذا لم يتم السيطرة عليه، قد يؤدي الإفراط في استغلال موارد المياه.

الهدف من هذه الدراسة تنفيذ الإدارة المتكاملة للموارد المائية وتعزيز استراتيجيات استخدام الأراضي المستدامة للتخفيف من الآثار السلبية للتوسع الحضري وتغير المناخ على موارد المياه. تشكل النتائج التي قدمتها هذه الأبحاث أداة قيمة لصناع القرار لاتخاذ تدابير مستنيرة للإدارة المستدامة لحوض وادي فكان.

الكلمات المفتاحية: تغير استخدام الأراضي، لاندسات، الأتمتة الخلوية، نموذج سلسلة ماركوف، التنمية المستدامة، التحضر، توازن المياه، تقييم المياه العالمي.

Abstract

The study on the evolution of land use and land cover (LULC) in the Oued Fekan watershed, located in northwestern Algeria, highlights the significant impacts of socioeconomic development and urban expansion on the environment. Using Landsat satellite images and models combining Artificial Neural Networks (ANN) and Cellular Automaton-Markov Chain (CA-MC), the analysis of LULC evolution between 2001 and 2021 reveals a dramatic increase in urban areas, with a decrease in forests and agricultural land. Projections for 2051 predict continued urbanization, accompanied by a reduction in forest and grassland cover, thereby threatening the ecological and hydrological stability of the basin.

Water balance analysis, based on geospatial tools and hydrological models such as SCS-CN, Penman-Monteith, shows that urbanization has exacerbated runoff, reduced infiltration, and increased potential evapotranspiration (PET). These changes have direct consequences for water management, including groundwater recharge and water availability. Urbanization has reduced soil retention capacity, thereby increasing the risk of local flooding and water demand due to the urban heat island effect.

In parallel, the use of the Water Evaluation and Planning (WEAP) model to simulate future water supply and demand projections up to 2054, highlighting the growing tensions between water supply and demand, particularly in the domestic, agricultural, and industrial sectors. High population growth, if left unchecked, could lead to the overexploitation of water resources.

This study emphasizes the need to implement integrated water resources management (IWRM) and promote sustainable land use strategies to mitigate the adverse effects of urbanization and climate change on water resources. The results provided by this research constitute a valuable tool for decision-makers to take informed measures for the sustainable management of the Oued Fekan basin.

Keywords: Land use change, Landsat, Cellular automata, Markov chain model, Sustainable development, Urbanization, Water balance, WEAP

Table des matières :

Remerciements

Dédicace

Résumé

Introduction : 1

Chapitre I : Revue de littérature

I.1. Introduction au cadre théorique : la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE).. 6

I.2. La gouvernance mondiale de l'eau et l'émergence d'une vision intégrée..... 6

I.3.1 Émergence d'un cadre éthique pour une gestion durable et intégrée de l'eau..... 7

I.3.2. La gestion intégrée par bassin versant : une approche territoriale de la ressource en eau 9

I.4. La Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) 10

I.4.1. Objectifs de la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) 11

I.4.2. L'approche à deux voies de la GIRE 13

I.4.3. La collaboration horizontale..... 15

I.4.4. La collaboration verticale 15

I.4.5. La politique nationale de l'eau en Algérie 16

I.4.6. Évolution des administrations de l'eau 17

I.4.7 Le Ministère des ressources en eau 19

I.4.8 Les agences de bassins hydrographiques en Algérie : missions et organisation..... 19

I.5 Le cycle hydrologique de l'eau : 21

I.5.1 Composition du cycle de l'eau : 22

I.6 Notion d'un bassin versant : 22

I.7 Bilan hydrologique : 23

I.7.1. Évolution de la modélisation hydrologique et essor de l'hydrologie numérique. 24

I.7.2 Types de modèles hydrologiques 25

I.7.2.1. Modèles conceptuels 26

I.7.2.2. Modèles physiques ou mécanistes (ou distribués physiquement) 26

I.7.2.3. Modèles empiriques ou statistiques..... 26

I.8 Types de modèles hydrologiques en fonction de l'approche adoptée 26

I.9. La télédétection : fondements et apports pour l'observation environnementale 27

1.9.1. Principe de la télédétection 28

I.4 Les bases physiques de la télédétection : 29

I.4.1 Le rayonnement électromagnétique : 29

I.4.2 Le spectre électromagnétique..... 30

I.4.3 Signatures spectrales des principales surfaces naturelles.....	31
I.1.5 Les vecteurs :	32
I.6 Les satellites LANDSAT (land satellite) :.....	34
I.7 Les images satellitaires :.....	35
I.8 Résolution :	36
I.8.1 Résolution spectrale :.....	36
I.8.2 Résolution Spatiale :	36
I.8.3 Résolution radiométrique :.....	36
I.8.4 Résolution temporelle :	37
I.9.Conclusion :	37
 Chapitre II : Contexte général et présentation de la zone d'étude	
Introduction :	39
II.1 Situation géographique de la zone d'étude :	40
II.2 Étude morphométrique.....	41
II.2.1 Caractéristiques géométriques du bassin versant :	41
II.2.1.1 Indice de compacité de Gravellius Kc :	41
II.2.1.2 Rectangle équivalent :	41
II.2.1.3 Coefficient d'allongement :	42
II.2.2 Etude de relief :	43
II.2.2.1 Courbe hypsométrique.....	43
II.2.2.2 Courbe hypsométrique et diagramme des fréquences altimétriques	45
II.2.2.3 Altitudes caractéristiques.....	46
II.2.2.4 Altitudes caractéristiques issues de la courbe hypsométrique.....	47
II.2.2.5 Indices de pente :	48
II.2.2.5.1 Pente moyenne du cours d'eau principal :	53
II.2.2.5.2 Densité de drainage (Dd) :	54
II.2.2.5.3 Constante de stabilité du cours d'eau	55
II.3 Occupation du sol.....	61
II.4 Contexte géologique et structural	62
II.4.1 Configuration générale du bassin	62
II.4.2 Nature des formations superficielles (ANBT, 2004)	62
II.4.2.1 Dépôts meubles à texture moyenne (Quaternaire) :	62
II.4.2.2 Brèches et conglomérats (Pliocène continental) :	62
II.4.2.4 Calcaires (Jurassique supérieur) :	63
II.4.2.5 Marnes (Crétacé inférieur) :	63
II.4.3.2 Le Tertiaire	64

II.4.3.3 Le Quaternaire.....	65
II.4.3.4 Tectonique.....	65
II.6.4.1.4. Tests de détection de ruptures :	74
II.6.4.1.5 Etude des statistiques descriptives des pluies moyennes annuelles.....	78
II.6.4.1.8. La méthode des isohyètes	80
II.6.4.1.8 L'étude de la variabilité à l'échelle du temps	82
II.6.4.1.91La moyenne mobile :	83
I.6.4.1.10 L'étude des débits	83
II.7 Conclusion :	85
<i>Chapitre III : Évolution de l'occupation du sol et impacts sur les ressources en eau</i>	
III.1 Introduction.....	87
III.2. Matériels et méthodes	88
III.2.1 Prétraitement et corrections des images satellitaires	90
III.3-Classification du maximum de vraisemblance	91
III.4-Le modèle de chaîne de Markov des automates cellulaires :.....	93
III.5. Architecture du perceptron multicouche (MLP) des réseaux de neurones artificiels (ANN)	96
III.6 Évolution spatio-temporelle de l'occupation du sol dans le bassin versant étudié.....	99
III.7 Changement des classes d'occupation du sol dans le bassin versant entre 2001 et 2021	104
III.8 Corrélations spatiales entre variables environnementales et anthropiques dans la dynamique territoriale	107
III.9 Évaluation de la Précision du Modèle MLP-MOLUSCE pour la Simulation de l'occupation du Sol en 2021	109
III.10 Validation et analyse des performances du modèle CA-ANN dans la simulation spatio-temporelle des changements d'occupation du sol	113
III.11 Les dynamiques de transition des classes d'occupation du sol entre 2001 et 2021..	115
III.11.1 La matrice de transition pour la période 2001–2006 (Fig. III.11.a)	115
III.11.2 La matrice de transition relative à la période 2006–2011 (Fig. III.11.b)	116
III.11.3La matrice de transition correspondant à la période 2011–2016 (Fig. III.11.c)	116
III.11.4La matrice de transition entre 2016 et 2021 (Fig. III.11.d).....	117
III.12 Évolution projetée de l'occupation du sol aux horizons 2031, 2041 et 2051	118
III.13 Analyse prospective de la dynamique de transition de l'occupation du sol à l'horizon 2051	121
III.13.1 La matrice de transition pour la période 2001–2021	121
III.13.2 La matrice de transition simulée pour la période 2021–2031	122
III.13.3 La matrice de transition simulée pour la période 2021–2041	123

III.13.4 La matrice de transition projetée pour la période 2021–2051	124
III.14 Analyse spatio-temporelle multi-décennale des dynamiques d'occupation du sol dans le bassin versant de l'Oued Fekan (2001–2051)	125
III.15 Enjeux socio-économiques et environnementaux des dynamiques d'occupation du sol dans le bassin versant de l'Oued Fekan.....	128
III.16 Conclusion.....	129
<i>Chapitre IV : Analyse des interactions entre l'occupation du sol et les paramètres du bilan hydrique</i>	
<i>Introduction générale : Impact des transformations de l'occupation du sol sur les composantes du bilan hydrologique :</i>	<i>132</i>
IV.1. Modélisation du ruissellement de surface par intégration d'un SIG et de la méthode SCS-CN	134
IV.1.1 la méthode de NRCS-SCS-CN.....	135
IV.1.2. Conditions d'humidité antérieures (CAU)	137
IV.1.3. Détermination des valeurs CN	139
IV.1.4 Données géologiques	141
IV.1.5 Méthode de la courbe pondérée par la surface	143
IV.2 Résultats de la modélisation du ruissellement de surface par intégration d'un SIG et de la méthode SCS-CN.....	146
IV.3 Interprétation des résultats.....	147
IV.3.1. Évolution des surfaces de ruissellement selon les classes LULC	149
IV.3.2 Évolution spatiale du ruissellement dans le bassin versant de l'Oued Fekan (2001–2021).....	152
IV.4. Conclusion de la méthode NRCS-SCS-CN.....	154
IV.1 Introduction L'évapotranspiration potentielle.....	156
IV.2 Principe de l'équation de Penman-Monteith FAO-56 pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle	156
IV.3. Étapes pratiques du calcul de l'évapotranspiration de référence (PET_0) selon la méthode de Penman-Monteith (FAO-56)	159
IV.3.1. Collecte des données météorologiques nécessaires (pas de temps mensuel)	159
IV.3.2. Calcul des variables intermédiaires	159
IV. 4 Évapotranspiration potentielle mensuelle (PET) selon l'occupation du sol (LULC) 160	
IV.4.1 Variation de l'évapotranspiration potentielle (PET) selon les types d'occupation du sol (LULC).....	163
IV.4.1.1 Comparaison interannuelle	163
IV.4.1.2. Analyse mensuelle.....	163
IV.5. Conclusion sur l'application de la méthode de Penman-Monteith pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP).....	165

<i>Conclusion générale du chapitre IV : Impact des transformations de l'occupation du sol sur les composantes du bilan hydrologique.....</i>	<i>166</i>
<i>Chapitre V : Analyse de la gestion intégrée de la demande et de l'offre en eau à l'aide du modèle WEAP dans le bassin versant d'Oued Fekan</i>	
<i>V.1 L'allocation des ressources en eau : enjeux et perspectives</i>	<i>170</i>
V.1.1 Description de la région d'étude	170
<i>V.2 Optimisation de la gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin versant de l'Oued Fekan</i>	<i>172</i>
<i>V.3. Collecte de données et outils d'analyse.....</i>	<i>173</i>
<i>V.4 Description des ressources</i>	<i>173</i>
<i>V.4.1. Alimentation en eau.....</i>	<i>173</i>
V.4.1.2 Sources d'approvisionnement en eau (AGIRE.2023).....	173
V.4.1.3 Infrastructures hydrauliques existantes (A.D.E Mascara 2025).....	174
V.4.1.4 Cas particulier du bassin versant de l'Oued Fekan (AGIRE. 2023)	174
V.4.1.5 Pression sur la ressource et besoins en eau	175
<i>V.4.2 Agriculture dans la zone d'étude</i>	<i>176</i>
V.4.2.1 Méthodes d'irrigation (D.R.E Mascara 2025)	176
V.4.3 Consommation d'eau industrielle dans le bassin versant de l'Oued Fekan	177
V.4.4 Stations d'épuration	178
V.4.5 Hydrogéologie de la Plaine de Ghriss : Ressources souterraines disponibles....	179
<i>V.5. Description de WEAP.....</i>	<i>180</i>
<i>V.5.1. Etapes de modélisation par WEAP.....</i>	<i>183</i>
V.5.1.1 Définition du compte courant (année de base – 2023)	183
V.5.1.2 Élaboration du scénario de référence (tendance actuelle).....	183
V.5.1.3 Développement de scénarios alternatifs	184
<i>V.5.2. Analyse comparative et interprétation des résultats.....</i>	<i>184</i>
<i>V.6 Présentation des scénarios de gestion et de planification des ressources en eau dans la zone d'étude</i>	<i>185</i>
V.6.1 Scénario de Référence	185
V.6.1.1 Analyse sectorielle	185
<i>V.7.2 Développement de scénarios alternatifs</i>	<i>191</i>
V.7.2.1 Scénario de faible croissance démographique (1,5 %) au cas minimum entre 2023 et 2054	191
V.7.2.2 Scénario de forte croissance démographique (+2,5 %/an) – Cas maximal projeté entre 2023 et 2054	194
V.7.2.3 Croissance démographique projetée (2023–2054) dans le bassin de l'Oued Fekan.....	197

V.7.2.4 Évolution annuelle de l'activité des sites de demande agricole selon un taux de croissance de +3 % dans le scénario projeté (2023–2054).....	197
V.7.2.5 Scénario d'augmentation de la demande industrielle avec un taux de croissance de +1 % par an entre 2023 et 2054.....	198
<i>V.8 Analyse de la demande globale</i>	<i>199</i>
<i>V.9 Demande non satisfaite</i>	<i>202</i>
<i>V.10. Conclusion</i>	<i>205</i>
<i>Références bibliographiques</i>	
<i>Annexes</i>	

Liste des tables :

<i>Chapitre I : Revue de littérature</i>	
Tableau I.1 : Évolution temporelle et missions des administrations nationales de l'eau en Algérie	18
Tableau I.2 : Les bassins hydrographiques de l'Algérie.	20
<i>Chapitre II : Contexte général et présentation de la zone d'étude</i>	
Tableau II. 1 : Caractéristiques géométriques du bassin versant d'Oued Fekan.	42
Tableau II. 2 : Répartition des tranches de surface en fonction de l'altitude du bassin versant d'Oued Fekan.	44
Tableau II.3 : Calcul de l'altitude moyenne du bassin versant d'Oued Fekan	47
Tableau II.4 : Altitudes caractéristiques du bassin versant d'Oued Fekan	47
Tableau II.5 : Répartition des pentes du bassin versant d'Oued Fekan	49
Tableau II. 6 : Données de calcul pour l'indice de Roche	51
Tableau II. 7 : Classification du relief selon Ds par l'O.R.S.T.O.M	51
Tableau II. 8 : Indices de pente et type de relief du bassin d'Oued Fekan.	52
Tableau II.9 : Classification des talwegs du bassin versant d'Oued Fekan	53
Tableau II. 10 : Pente moyenne, densité de drainage et constante de stabilité	55
Tableau II. 11 : Rapport de confluence et rapport de longueur	56
Tableau II.12 : Tableau récapitulatif des principales caractéristiques morphométriques et hydrographiques du bassin versant de l'Oued Fekan	60
Tableau II.13 Résultats du test de normalité des séries pluviométriques (1969–2015)	72
Tableau II .14 Résultats du test d'homogénéité SNHT appliqué aux données pluviométriques annuelles (1969–2015)	74
Tableau II.15 : résultats des tests de détection de rupture appliqués aux séries pluviométriques annuelles (1972-2012).	78
Tableau II.16 Caractéristiques statistiques des précipitations (p) aux stations retenues pour la période 1969-2015	79
Tableau II.17 stations hydrométriques retenues dans l'étude	83
<i>Chapitre III : Évolution de l'occupation du sol et impacts sur les ressources en eau</i>	
Tableau III.1. Bases de données Landsat utilisées dans l'étude.	89
Tableau III.2. Coefficients de corrélation de Pearson entre les variables spatiales du bassin versant d'étude.	108

Tableau III.3. Indicateurs de performance du modèle MLP pour la simulation de l'occupation du sol	113
--	-----

Tableau III.4. Paramètres du modèle et indicateurs de performance pour la prévision des changements d'occupation et d'utilisation des sols par l'approche CA-ANN sur la période 2021–2051.	
---	--

Chapitre IV : Analyse des interactions entre l'occupation du sol et les paramètres du bilan hydrique

Tableau IV. 1 : Classification des conditions d'humidité antérieures (CAU)	139
Tableau IV.2: Groupes hydrologiques des sols selon les différentes textures de sol (USDA-SCS).	142
Tableau IV.3 : Numéros de courbe (CN) selon les types d'occupation et d'utilisation des terres (USDA-SCS).	144
Tableau IV.4 : Numéros de courbe (CN) pour la condition d'humidité moyenne (AMC II) en fonction de la classification de l'occupation du sol et des groupes hydrologiques de sols dans le bassin versant de l'Oued Fekan (période 2001-2021).	144
Tableau IV.5. Profondeur de ruissellement Q (en mm) selon les conditions d'humidité antérieures (sèches, moyennes, humides) pour les années 2001, 2006, 2011, 2016 et 2021.	147
Tableau IV.6. Superficie de ruissellement de surface par classe LULC de 2001 à 2021 (en km ² et en pourcentage).	150
Tableau IV.7. Évolution des différentes classes LULC du ruissellement de surface dans la zone d'étude, en km ² et en pourcentage (%).	151
Tableau IV.8 : Évolution de l'évapotranspiration potentielle (PET) moyenne mensuelle selon les types d'occupation du sol (2001–2021)	161

Chapitre V : Analyse de la gestion intégrée de la demande et de l'offre en eau à l'aide du modèle WEAP dans le bassin versant d'Oued Fekan

Tableau V.1: Approvisionnement en eau potable par les barrages et la station de dessalement de Magtaa dans la zone d'étude (AGIRE, 2023)	175
Tableau.V.2 : Les pourcentages de chaque type d'irrigation dans le bassin versant de l'Oued Fekan.	177
Tableau V.3 : Stations de traitement des eaux usées dans le bassin versant de l'Oued Fekan	179
Tableau V.4 : Description générale des caractéristiques hydrogéologiques de la plaine de Ghriss	180

Tableau V .5 : Niveaux d’activité annuels pour 2023 pour secteur agricole et industrie	186
Tableau V .6 : Taux annuel de consommation d'eau pour 2023 pour secteur domestique	187
Tableau V.7 Évolution projetée du taux de consommation annuelle d’eau (m ³ /personne) dans les communes de la wilaya de Mascara (2023–2053) avec un pas de 10 ans avec taux d’accroissement 1.5%	193
Tableau V.8 Évolution projetée du taux de consommation annuelle d’eau (m ³ /personne) dans les communes de la wilaya de Mascara (2023–2053) avec un pas de 10 ans avec taux d’accroissement 2.5%	196

Liste des Figures :

<i>Chapitre I : Revue de littérature</i>	
Figure I.1 : Vision thématique de la gestion intégrée des ressources en eau (Pouget et al. ,2003). A : Aménagement – G : Gestion – M : Milieu – U : Usages.	13
Figure I.2 : l’approche à deux voies de la GIRE (Philip et al.2008)	14
Figure I.3 : Organigramme des différentes directions du ministère des ressources en eau	19
Figure I.4 : Schématisation du cycle d’eau (Musy, 2005)	22
Figure I.5 : Classification des modèles hydrologiques selon Beckers and Degré (2011)	25
Figure I.6 : Les étapes couvrent le processus de la télédétection.	29
Figure I.7 : L’onde électromagnétique monochromatique.	30
Figure I.8 : Le spectre électromagnétique (http://e-cours.univ-paris1.fr).	30
Figure I.9 : Le spectre visible.	31
Figure I.10 : Satellites géostationnaires (Essahlaoui A, 2019)	32
Figure I.11 : Les satellites à défilements (Essahlaoui A, 2019)	33
Figure I.12 : Télédétection active et télédétection passive (https://ressources-naturelles.canada.ca/)	34
Figure I.13 : les différents types de Landsat	35
Figure I.14 : Image numérique satellite (https://ressources-naturelles.canada)	36
<i>Chapitre II : Contexte général et présentation de la zone d’étude</i>	
Figure II. 1 : localisation du bassin versant d’Oued Fekan	40
Figure II. 2 : Carte de la répartition altimétrique du bassin versant d’Oued Fekan	44
Figure II. 3 : Rectangle équivalent du bassin versant d’Oued Fekan	45
Figure II. 4 : La courbe hypsométrique et le diagramme des fréquences altimétriques	46
Figure II.5: Carte des pentes du bassin versant d’Oued Fekan	48
Figure II. 6 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant d’Oued Fekan.	53
Figure II.7 : Carte du couvert végétal et occupation du sol dans le bassin versant d’Oued Fekan (ANBT.2004)	61
Figure II.8 : La carte géologique du Bassin Versant d’Oued Fekan (ANBT 2004).	63
Figure II. 9 : Litho stratigraphie des formations du bassin d'Oued Fekan (Sourisseau B.1972)	66
Figure II. 10 : Coupe Hydrogéologique du bassin d'Oued Fekan (Bekkoussa S. 2020).	69

Figure II.11 : Répartition spatiale des précipitations annuelles moyennes dans le bassin d'Oued Fekan (période 1970–2015). 82

Figure II.12 : Variabilité des précipitations annuelles dans la région d'étude (1969-2015). 83

Figure II.13 évolution de débit au cours de période (1969-2015) 84

Chapitre III : Évolution de l'occupation du sol et impacts sur les ressources en eau

Figure III.1. Schéma conceptuel représentant la méthodologie adoptée pour la prévision des changements d'occupation du sol. 89

Figure III.2. Cartes de classification supervisée de l'occupation et de l'utilisation des terres dans la zone d'étude pour les années : (a) 2001, (b) 2006, (c) 2011, (d) 2016 et (e) 2021. 100

Figure III.3. Évaluation de la précision des classifications de l'occupation et de la couverture du sol pour les années 2001, 2006, 2011, 2016 et 2021, obtenues par la méthode de classification supervisée par maximum de vraisemblance (Maximum Likelihood Classification – MLC). 101

Figure III.4. Superficie des différentes classes d'occupation et de couverture du sol pour les années 2001, 2006, 2011, 2016 et 2021, exprimée en (a) kilomètres carrés (km²) et en (b) pourcentage de la superficie totale de la zone d'étude. 103

Figure III.5. Évolution spatio-temporelle de la surface bâtie entre 2001 et 2021 du bassin versant étudié. 105

Figure III.6. Évolution spatio-temporelle des différentes classes d'occupation du sol dans la zone d'étude entre 2001 et 2021, exprimée en (a) superficie (km²) et (b) pourcentage (%) de la superficie totale. 106

Figure III.7. Représentations spatiales des facteurs explicatifs : (a) Modèle Numérique de Terrain (MNT), (b) Pente, (c) Exposition, (d) Distance aux Cours d'Eau, (e) Densité de Population et (f) Distance aux Routes. 109

Figure III.8. Représentation cartographique de l'occupation du sol : (a) classification réelle et (b) projection simulée des différentes classes d'occupation et d'utilisation des terres au sein de la zone d'étude. 111

Figure III.9. Comparaison entre l'occupation du sol observée et simulée pour l'année 2021, exprimée en (a) superficie (km²) et (b) proportion relative (%) par rapport à la superficie totale de la zone d'étude. 112

Figure III.10. Cartes de probabilité de validation du modèle de transition spatiale pour les années : (a) 2021, (b) 2031, (c) 2041 et (d) 2051, à l'échelle du bassin versant étudié 114

Figure III.11. Matrices de transition de l'occupation du sol pour les périodes 2001–2006, 2006–2011, 2011–2016 et 2016–2021 du bassin versant d'Oued Fekan.	118
Figure III.12. Cartographie des dynamiques spatio-temporelles de l'occupation et de la couverture du sol dans le bassin versant d'Oued Fekan pour les années de référence et de projection : (a) 2021 (état actuel), (b) 2031, (c) 2041 et (d) 2051.	120
Figure III.13. Évolution prospective des classes d'occupation du sol à l'horizon 2031, 2041 et 2051, exprimée en : (a) superficie absolue (km ²) ; (b) proportion relative à la surface totale du bassin versant (%).	121
Figure III.14. Matrices de transition de l'occupation du sol pour les périodes : a) 2001–2021, b) 2021–2031, c) 2021–2041 et d) 2021–2051.	125
Figure III.15. Cartographie des conversions d'occupation du sol dans la zone d'étude entre (a) 2001–2021 et (b) 2021–2051.	127
Figure III.16. Évolution temporelle des classes d'occupation du sol pour les périodes 2021–2031, 2021–2041 et 2021–2051, exprimée en (a) superficie (km ²) et (b) pourcentage (%).	128

Chapitre IV : Analyse des interactions entre l'occupation du sol et les paramètres du bilan hydrique

Figure IV.1 Relation entre le ruissellement et les précipitations ((Source USDA-SCS).	137
Figure IV.2. Organigramme du modèle SCS-CN	140
Figure IV.3 : (a) carte pédologique (b) Cartographie des groupes hydrologiques de sols (A, B, C, D) dans le bassin versant de l'Oued Fekan, selon la typologie pédologique de l'USDA-SCS.	142
Figure IV.4 : Évolution des surfaces par type d'occupation du sol dans le bassin versant de l'Oued Fekan (2001-2021).	146
Figure IV.5. Profondeur de ruissellement Q (mm) et coefficient de ruissellement (CR) selon les conditions d'occupation des sols pour les années 2001, 2006, 2011, 2016 et 2021.	148
Figure IV.6 : Ruissellement de surface selon les différents types d'occupation du sol de 2001 à 2021.	152
Figure IV.7. Profondeur du ruissellement dans le bassin versant de l'Oued Fekan entre 2001 et 2021	153
Figure IV.8. Évolution de l'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne (PET) selon le type d'occupation du sol	164

Chapitre V : Analyse de la gestion intégrée de la demande et de l'offre en eau à l'aide du modèle WEAP dans le bassin versant d'Oued Fekan

Figure V.1 : Localisation et présentation administrative de la zone d'étude – communes, villes et réseau hydrographique	172
Figure V.2 : Cadre méthodologique d'évaluation et de planification des ressources en eau dans WEAP : Processus de modélisation et élaboration des scénarios prospectifs (Bouznadet al.,2019)	181
Figure V.3 : Représentation de la zone d'étude dans le modèle WEAP.	182
Figure V.4 : Organigramme de la modélisation dans WEAP	184
Figure V.5 consommation annuelle d'eau domestique (m ³ /hab) dans la zone d'étude en 2023	189
Figure V.6 consommation annuelle d'eau Agricole (m ³ /hab/année) dans la zone d'étude en 2023	190
Figure V.7 consommation annuelle d'eau industrielle (m ³ /année) dans la zone d'étude en 2023	190
Figure V.8 la répartition relative de la consommation d'eau par secteur en 2023 dans la zone d'étude	191
Figure V.9 : Niveau d'activité annuel des sites de demande domestique avec un taux de croissance de 1,5 % dans le scénario de référence (2023–2054)	192
Figure V.10 : Niveau d'activité annuel des sites de demande domestique avec un taux de croissance de 2,5 % dans le scénario de référence (2023–2054)	195
Figure V.11 : Évolution annuelle de l'activité des sites de demande agricole selon un taux de croissance de +3 % dans le scénario projeté (2023–2054)	198
Figure V.12 : Évolution des unités de production dans le scénario de référence de 2023 à 2054	199
Figure V.13 : Évolution annuelle de la demande totale en eau selon le scénario de référence (2023–2054)	200
Figure V.14 : Demande mensuelle moyenne en eau en 2054 selon le scénario de référence.	201
Figure V.15 : Évolution de la demande totale en eau selon le scénario de référence (2023–2054)	202
Figure V.16 : Demande non satisfaite dans la zone d'étude Scénario de référence (2023-2054).	203
Figure V.17 : Demande non satisfaite annuelle totale (2023–2054) pour tous les sites de demande – Scénario de référence	207

Introduction générale

La gestion des ressources naturelles est aujourd'hui l'un des défis majeurs pour l'humanité. L'eau, ressource vitale et transverse, est particulièrement affectée par les mutations globales en cours. L'intensification des pressions anthropiques — urbanisation rapide, extension des surfaces agricoles, industrialisation et croissance démographique — conjuguée aux effets du changement climatique, entraîne une instabilité accrue de la disponibilité et de la qualité de l'eau à l'échelle mondiale. Ces perturbations impactent les écosystèmes aquatiques, les systèmes de production et la sécurité hydrique des populations. Dans ce contexte, une gestion durable, intégrée et anticipative des ressources en eau est indispensable.

Les régions arides et semi-arides, comme l'ouest de l'Algérie, sont particulièrement vulnérables. Caractérisées par une faible pluviométrie irrégulière, une forte évapotranspiration et des ressources hydriques limitées, elles subissent intensément les effets des dynamiques socio-économiques et climatiques. La raréfaction de l'eau y devient une contrainte structurelle, freinant le développement local et menaçant les équilibres environnementaux. La durabilité de la gestion de l'eau repose alors sur une connaissance fine des interactions entre occupation du sol, usages humains et processus hydrologiques.

Le bassin versant de l'Oued Fekan, dans la région semi-aride de l'Ouest algérien, constitue un cadre pertinent pour étudier ces interactions. Depuis deux décennies, ce bassin connaît des mutations majeures liées à une urbanisation non maîtrisée, une intensification agricole et une dégradation du couvert végétal. Ces transformations affectent directement le cycle de l'eau : elles modifient les régimes de ruissellement, réduisent les capacités d'infiltration, altèrent l'évapotranspiration et influencent la recharge des nappes phréatiques.

L'artificialisation croissante des sols et la perte des zones végétalisées favorisent l'érosion, augmentent le risque d'inondations en période de crue et aggravent la sécheresse lors des périodes d'étiage. Par ailleurs, la pression sur les ressources souterraines, principale source d'approvisionnement du bassin, conduit à une surexploitation chronique, menaçant leur pérennité. Cette situation traduit un déséquilibre croissant entre demande et offre en eau, nécessitant une révision profonde des modes d'occupation du sol et de gestion de la ressource.

La problématique centrale est la suivante : **Comment les transformations de l'occupation du sol influencent-elles le fonctionnement hydrologique du bassin de l'Oued Fekan, et comment anticiper ces évolutions pour élaborer des scénarios de gestion intégrée et durable de l'eau ?**

Cette question engage une réflexion sur les liens entre dynamiques territoriales et processus hydrologiques, ainsi que sur les leviers permettant de réconcilier besoins humains et capacités naturelles. Pour cela, il est essentiel de disposer d'outils capables d'évaluer l'impact des

politiques d'aménagement et des tendances démographiques sur les ressources hydriques, et d'anticiper leurs conséquences à moyen et long terme.

L'objectif principal de cette recherche est de proposer une démarche intégrée de modélisation spatiale et hydrologique pour évaluer l'impact des changements d'occupation du sol sur la ressource en eau et élaborer des stratégies adaptées au bassin.

Les objectifs spécifiques sont :

- Analyser les dynamiques d'occupation du sol entre 2001 et 2021 à partir d'images satellitaires et d'outils SIG ;
- Évaluer l'impact de ces dynamiques sur les paramètres hydrologiques clés du bassin ;
- Modéliser les évolutions futures de l'occupation du sol à l'horizon 2051 avec le modèle CA-ANN, selon plusieurs scénarios de croissance urbaine, politique agricole et démographie ;
- Simuler la gestion de la ressource en eau via le modèle WEAP selon quatre scénarios (tendanciel, économie d'eau, diversification des ressources, allocation optimisée) ;
- Formuler des recommandations pour une gestion intégrée et durable de l'eau dans le bassin.

Pour cela, une approche interdisciplinaire et multi-outils est adoptée :

- Télédétection et SIG pour observer et cartographier les changements d'occupation du sol sur 20 ans ;
- Modèle CA-ANN, combinant Automates Cellulaires et Réseaux de Neurones, pour projeter les dynamiques futures ;
- Modèle WEAP pour simuler les flux hydriques, la satisfaction des besoins et évaluer différentes stratégies selon des scénarios prospectifs.

La démarche s'appuie sur la collecte de données hydrologiques, climatiques, socio-économiques et territoriales, ainsi que sur des consultations avec les acteurs locaux pour construire des scénarios réalistes et contextualisés.

Cette recherche se situe à l'interface entre géomatique, hydrologie et aménagement du territoire. D'un point de vue scientifique, elle vise à enrichir la compréhension des interactions entre occupation du sol et fonctionnement hydrologique dans un contexte semi-aride, et à démontrer la pertinence des approches prospectives pour la gestion de l'eau.

D'un point de vue opérationnel, la thèse propose des outils concrets d'aide à la décision pour orienter les politiques vers des choix durables. En combinant modélisation territorialisée et participation locale, elle contribue à la mise en œuvre des principes de Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) adaptés aux réalités locales. Les résultats pourront aussi servir de référence pour d'autres bassins similaires.

La thèse est structurée en cinq chapitres :

- **Chapitre I : Revue de littérature** - Présentation des concepts clés de la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE), des modèles de bilan hydrique, ainsi que des méthodes de modélisation hydrologique adaptées à l'échelle du bassin versant.
- **Chapitre II : Contexte général et présentation de la zone d'étude**-Description du bassin versant de l'Oued Fekan, en insistant sur son climat semi-aride, sa géologie, son hydro-géologie et son occupation du sol.
- **Chapitre III : Évolution spatio-temporelle de l'occupation du sol et de ses impacts sur la gestion des ressources en eau dans le bassin versant d'Oued Fekan : Analyse historique, projections futures et perspectives de gestion durable**- Analyse des changements d'occupation du sol entre 2001 et 2021 à partir de données satellitaires et SIG, ainsi que leurs effets sur le fonctionnement hydrologique du bassin.
- **Chapitre IV : Analyse des interactions entre l'occupation du sol et les paramètres du bilan hydrique**- Simulation du ruissellement et de l'imperméabilisation à l'aide de la méthode SCS-CN, accompagnée d'une analyse de l'évapotranspiration potentielle (ETP) liée aux changements climatiques et à l'urbanisation.
- **Chapitre V : Analyse de la gestion intégrée de la demande et de l'offre en eau à l'aide du modèle WEAP dans le bassin versant d'Oued Fekan**- Utilisation du modèle WEAP pour simuler des scénarios futurs, évaluer les pressions sur la ressource en eau et proposer des stratégies intégrées et durables de gestion dans le bassin.

Chapitre I :
Revue de littérature

Introduction :

Dans un contexte de pressions accrues sur les ressources hydriques, exacerbées par le changement climatique et la croissance démographique, l'analyse des interactions entre l'occupation du sol et le fonctionnement hydrologique des écosystèmes constitue un champ de recherche stratégique, notamment dans les régions à climat semi-aride. Le bassin versant de l'Oued Fekan, situé dans l'ouest de l'Algérie, illustre de manière exemplaire les dynamiques complexes à l'œuvre, où les mutations paysagères induites par l'urbanisation, l'intensification agricole ou encore la déforestation influencent profondément les flux hydriques à l'échelle du bassin.

Les modifications de l'occupation du sol agissent directement sur les composantes majeures du cycle hydrologique, telles que les précipitations, l'évapotranspiration, le ruissellement de surface, l'infiltration ou encore la recharge des nappes phréatiques. Ces changements perturbent les équilibres hydrologiques locaux, entraînant des conséquences notables sur la disponibilité en eau, les phénomènes d'érosion, la fréquence et l'intensité des crues, ainsi que sur la durabilité des ressources souterraines. Comprendre ces interactions spatio-temporelles est dès lors fondamental pour éclairer les choix de gestion et d'aménagement du territoire.

L'approche méthodologique proposée dans cette étude se distingue par son originalité et sa pertinence, en intégrant des outils de modélisation hydrologique, d'analyse spatiale et de simulation des dynamiques d'occupation du sol. Elle a été spécifiquement conçue pour répondre aux enjeux complexes du bassin versant d'Oued Fekan, en tenant compte des contraintes de données, des spécificités climatiques semi-arides et de la nécessité d'une vision intégrée des processus hydrologiques.

Cette synthèse conceptuelle et bibliographique permettra de fonder scientifiquement l'approche retenue pour l'analyse des interactions entre dynamiques d'occupation du sol et processus hydrologiques dans le bassin versant d'Oued Fekan, en vue d'en éclairer les implications en matière de gestion durable des ressources en eau.

I.1. Introduction au cadre théorique : la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE)

L'eau représente depuis toujours un enjeu politique majeur, tant à l'échelle nationale qu'internationale. Elle fait l'objet de nombreuses conférences intergouvernementales, déclarations, conventions et initiatives portées par la société civile. La pression croissante exercée sur cette ressource, aggravée par l'augmentation des besoins, la pollution des eaux superficielles et souterraines, ainsi que les conflits d'usage entre secteurs ou pays partageant un même bassin, impose une remise en question profonde des modes de gestion traditionnels. Face à ces défis, la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) s'impose comme une approche stratégique visant à concilier les besoins humains — domestiques, agricoles et industriels — avec les impératifs de préservation des écosystèmes et de la biodiversité, dans un souci d'équité et de durabilité. La GIRE reconnaît le caractère transversal, vital et patrimonial de l'eau, et promeut une gouvernance participative, décentralisée et coordonnée entre l'ensemble des acteurs concernés.

Dans un contexte de dégradation persistante de la qualité des eaux et d'inefficacité des solutions purement technologiques, il devient indispensable d'adopter de nouveaux paradigmes. Il s'agit de repenser la gestion de l'eau à travers une approche intégrée, adaptée aux spécificités territoriales et orientée vers la durabilité, apte à répondre aux enjeux contemporains et futurs, en particulier dans les régions vulnérables telles que les zones semi-arides.

I.2. La gouvernance mondiale de l'eau et l'émergence d'une vision intégrée

Depuis plus de trente ans, la problématique de l'eau occupe une place croissante dans les débats internationaux. L'évolution vers une gestion intégrée des ressources hydriques reflète un changement de paradigme désormais largement reconnu au niveau théorique par une pluralité d'acteurs. Cette transition repose sur l'intégration des dimensions socio-économiques, environnementales et politiques dans la gestion de l'eau, dépassant ainsi les approches technicistes centrées sur l'offre.

Plusieurs événements internationaux ont jalonné cette évolution. La Conférence de Mar del Plata en 1977 a amorcé une réflexion globale, suivie par la Conférence de Dublin en 1992, qui a énoncé quatre principes fondamentaux :

- L'eau est une ressource limitée et vulnérable, essentielle à la vie, au développement et à l'environnement ;
- Sa gestion doit être participative, impliquant tous les niveaux d'acteurs ;
- Le rôle central des femmes dans la gestion de l'eau doit être reconnu ;

- L'eau est un bien économique dont la valeur doit être prise en compte dans sa gestion (Dublin, 1992).

La même année, le Sommet de la Terre à Rio a renforcé ces principes en y intégrant des préoccupations liées à la santé publique, à la préservation des écosystèmes aquatiques et au développement des capacités humaines (UNESCO, 2002).

À la suite de ces initiatives, plusieurs institutions majeures ont vu le jour, parmi lesquelles le Partenariat mondial de l'eau (GWP), le Conseil mondial de l'eau (CME), le Réseau international des organismes de bassin (RIOB), et l'Office international de l'eau (OIEau). Le premier Forum mondial de l'eau, organisé à Marrakech en 1997, a relancé le débat à grande échelle, préparant le terrain pour le second Forum, tenu à La Haye en 2000, où fut présentée la Vision mondiale de l'eau. Intitulé « L'eau : l'affaire de tout le monde », ce document propose une gestion durable et équitable des ressources hydriques à toutes les échelles (CME, 2000).

Trois messages clés en sont ressortis :

- La crise mondiale de l'eau résulte moins d'une pénurie physique que d'une mauvaise gestion (CME, 2000) ;
- Une approche intégrée est indispensable pour concilier les besoins humains avec la préservation des écosystèmes ;
- L'ensemble des acteurs — citoyens, professionnels, autorités — doit être impliqué activement, dans un cadre de responsabilités partagées (CME, 2000).

Enfin, la Vision mondiale de l'eau souligne l'importance de la coopération dans les bassins transfrontaliers, la reconnaissance des fonctions écosystémiques et la nécessité de réformes institutionnelles, plaidant en faveur d'une gouvernance mondiale, équitable et durable des ressources en eau.

I.3.1 Émergence d'un cadre éthique pour une gestion durable et intégrée de l'eau

La question de l'eau a suscité de nombreux débats, notamment à travers la publication du *Contrat mondial sur l'eau* (Petrella, 1998), qui a joué un rôle catalyseur en renouvelant les réflexions sur la gouvernance de cette ressource vitale. Ce manifeste affirme que l'accès à l'eau doit être reconnu comme un droit fondamental de l'être humain. Si l'eau possède indéniablement une valeur économique, en raison de sa fonction essentielle pour la vie, elle ne peut être réduite à un simple bien marchand.

Cette position est clairement énoncée dans la directive-cadre européenne sur l'eau, adoptée en octobre 2000, dont le premier considérant stipule :

« L'eau n'est pas un bien marchand comme les autres, mais un patrimoine qu'il faut protéger, défendre et traiter comme tel » (Communauté européenne, 2000).

Dans cette optique, le *Contrat mondial sur l'eau* insiste sur deux principes fondamentaux : l'accès universel à l'eau et sa gestion solidaire et durable (Petrella, 1998). Le débat s'est ainsi étendu au-delà des cercles d'experts, cristallisant une opposition entre, d'un côté, les partisans d'une tarification intégrale permettant le recouvrement des coûts tout en assurant un accès équitable, et, de l'autre, ceux qui considèrent l'eau comme un bien public collectif, devant échapper à toute logique marchande ou privatisée.

Dans ce contexte, l'Académie de l'eau a initié l'élaboration d'une *Charte sociale de l'eau*, présentée lors du Forum mondial de l'eau à La Haye en mars 2000. Issue d'un vaste processus de concertation internationale, cette charte a formulé trois recommandations majeures, reflétant un consensus émergent à l'échelle mondiale :

- La gestion de l'eau doit être assurée pour tous, dans le respect des générations futures et de l'environnement, selon les principes du développement durable (Rio, 1992) ;
- Les usagers doivent être activement associés aux décisions en matière d'aménagement et de gestion (Dublin, 1992) ;
- L'eau est à la fois un bien économique et un bien social, dont l'accès doit être garanti à chacun (Dublin, 1992 ; Paris, 1998) (Académie de l'eau, 2000, p. 2).

Par ailleurs, la prise en compte des écosystèmes constitue une pierre angulaire de toute approche de gestion durable de l'eau. L'écosystème est défini comme un système organisé, intégrant l'être humain et ses activités dans un ensemble dynamique où interagissent des composantes physiques, chimiques et biologiques. Trois principes fondamentaux en découlent :

- 1. Les écosystèmes sont ouverts**, échangeant matière et énergie avec leur environnement. Ils possèdent des structures complexes, en constante évolution sous l'effet des pressions anthropiques et des dynamiques naturelles ;
- 2. L'être humain est une composante intrinsèque des écosystèmes**. Sa survie dépend de la résilience et de l'intégrité des systèmes naturels. La vie ne peut être envisagée indépendamment du système global dont elle fait partie ;
- 3. Le choix de l'échelle d'analyse**, qu'elle soit spatiale ou temporelle, doit être ajusté à la problématique environnementale ou sociale abordée.

En définitive, une gestion durable des ressources en eau requiert l'articulation conjointe des dimensions écologiques, sociales et économiques. Il s'agit de concilier les impératifs de

préservation des milieux naturels avec les besoins des sociétés humaines, dans une logique systémique fondée sur l'interdépendance et la solidarité.

I.3.2. La gestion intégrée par bassin versant : une approche territoriale de la ressource en eau

Le bassin versant constitue une entité territoriale englobant à la fois les ressources naturelles et les communautés humaines qui en dépendent. Il ne se limite pas à une unité hydrologique ; il représente également un cadre opérationnel pertinent pour la gestion intégrée de l'eau, en raison de son rôle central dans la production agricole, le développement économique et la préservation des écosystèmes (Wani et al., 2008).

Amoros et Petts (1993) définissent le bassin versant comme « l'espace qui reçoit l'eau des précipitations et alimente les cours d'eau. Délimité par une ligne de partage des eaux, il comprend un réseau hydrographique qui collecte le ruissellement provenant des versants, ainsi qu'une charge constituée de sédiments, de matières organiques particulières et de substances dissoutes. Un cours d'eau peut être considéré comme l'artère du bassin, transportant l'eau, la matière organique et les éléments minéraux jusqu'à la mer ». Par ailleurs, le bassin hydrographique — ou bassin de drainage — désigne la zone dans laquelle toutes les eaux convergent vers un même exutoire (Lasserre et Brun, 2007).

Les activités humaines au sein du bassin s'inscrivent pleinement dans le cycle hydrologique, influençant l'ensemble de ses composantes. Par conséquent, les processus naturels et les usages anthropiques doivent être envisagés de manière conjointe afin de garantir une gestion cohérente, équitable et durable. Depuis près de quarante ans, la gestion par bassin est reconnue comme l'un des piliers de la gouvernance de l'eau, et cette approche s'est progressivement imposé à l'échelle mondiale.

Le deuxième Forum mondial de l'eau a accordé une attention particulière à cette notion. L'atelier technique préparatoire tenu à La Haye en octobre 1999 a permis de rassembler une diversité d'études de cas, débouchant sur une synthèse à la fois théorique et pratique de la gestion par bassin (Mostert, 1999). Ces travaux ont été consolidés sous forme de recommandations, présentées lors du Forum de mars 2000 (Netherlands, 2000). L'ensemble de ces contributions, enrichi d'exemples concrets, offre un socle de référence pour comprendre les enjeux et les modalités de cette approche.

La Déclaration ministérielle du Forum de La Haye (2000) souligne le rôle stratégique du bassin versant dans la garantie de la sécurité hydrique au XXI^e siècle. Elle appelle à «renforcer la coopération entre les différents usages de l'eau, favoriser une gestion pacifique et durable des ressources partagées, en particulier dans les bassins transfrontaliers » (CME,

2000). Cette approche repose sur une logique de flexibilité, permettant son adaptation aux contextes locaux, sans en faire un modèle uniforme, mais bien une orientation stratégique vers une gouvernance mieux intégrée.

La gestion par bassin s'impose aujourd'hui comme une échelle incontournable, particulièrement face aux limites des approches traditionnelles, souvent fragmentées et sectorielles, dans un contexte de complexité croissante des enjeux liés à l'eau (Auger et al., 2004 ; OCDE, 2003). Elle induit un changement profond dans la manière d'appréhender la ressource : les eaux de surface et souterraines, les usages domestiques, agricoles et industriels, ainsi que les dynamiques d'occupation des sols, doivent être considérés comme interdépendants au sein d'un même espace de gestion (Brüschweiler, 2003 ; Ghiotti, 2007).

L'UNESCO (2009) rappelle que cette approche vise à préserver l'intégrité de l'écosystème à l'échelle du bassin, considéré comme une unité fonctionnelle. Toutefois, le choix du bassin comme niveau de gestion ne se justifie pas uniquement par des considérations hydrologiques : il implique également des dimensions écologiques, sociales, économiques et politiques. Les décisions relatives à l'eau doivent ainsi mobiliser une approche interdisciplinaire, intégrant l'ensemble des domaines liés à l'aménagement du territoire.

Depuis le troisième Forum mondial de l'eau (Kyoto, 2003), le bassin versant est largement reconnu comme l'unité de gestion la plus pertinente pour l'application des principes de la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) (Burton, 2003 ; Le Goulven et al., 2005 ; Sghaier et al., 2006 ; Agenda 21 pour l'eau, 2011). Néanmoins, la mise en œuvre concrète de cette approche demeure hétérogène, variant selon les priorités nationales, les enjeux locaux et les contextes institutionnels propres à chaque pays.

I.4. La Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE)

La Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE), désignée en anglais par le sigle *IWRM* (*Integrated Water Resources Management*), constitue une approche innovante qui a émergé au tournant des années 2000 pour répondre aux limites des modèles traditionnels de gestion sectorielle de l'eau. Elle repose sur le principe d'une gestion coordonnée de l'eau, des terres et des ressources connexes, dans le but de promouvoir un développement à la fois équitable, durable et efficient.

La définition de référence, proposée par le Partenariat Mondial pour l'Eau (*Global Water Partnership*), souligne cette perspective holistique :

« Un processus qui favorise la gestion coordonnée de l'eau, des terres et des ressources connexes, en vue de maximiser, de manière équitable, le bien-être économique et social, sans compromettre la durabilité des écosystèmes vitaux » (GWP, 2000).

Cette conception intègre pleinement les trois piliers fondamentaux du développement durable:

- **La durabilité environnementale**, par la protection et la restauration des écosystèmes aquatiques, essentiels au bon fonctionnement du cycle de l'eau ;
- **L'équité sociale**, en garantissant un accès équitable à la ressource pour l'ensemble des usagers, notamment les plus vulnérables ;
- **L'efficacité économique**, en encourageant une utilisation rationnelle, optimisée et économiquement viable de la ressource.

En tant que démarche systémique, la GIRE vise à dépasser les approches cloisonnées en favorisant la concertation entre tous les acteurs concernés — institutions publiques, communautés locales, secteurs économiques, société civile — autour d'une gestion intégrée, territorialisée et participative. Elle reconnaît également les interdépendances entre les échelles locales, régionales et globales, tout en prenant en compte les spécificités écologiques, culturelles et institutionnelles de chaque territoire.

I.4.1. Objectifs de la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE)

La Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) s'impose aujourd'hui comme le cadre stratégique de référence à l'échelle internationale pour une gouvernance durable, équitable et efficiente de la ressource en eau. Face à la fragmentation historique des responsabilités institutionnelles et sectorielles, la GIRE vise à instaurer une approche cohérente et intégrée, articulée autour d'objectifs fondamentaux répondant aux grands défis contemporains.

Objectifs fondamentaux de la GIRE

Trois objectifs principaux structurent cette démarche :

- **Autonomisation des communautés** : Il s'agit de renforcer la capacité des populations – hommes, femmes et collectivités locales – à prendre part aux décisions relatives à l'accès à l'eau potable, à l'assainissement, ainsi qu'à la planification de leurs activités économiques liées à l'eau. La GIRE favorise ainsi une gouvernance inclusive, participative et ancrée dans les dynamiques locales.
- **Augmentation de la production alimentaire** : L'optimisation de l'utilisation de l'eau en agriculture est essentielle pour accroître la productivité, garantir la sécurité alimentaire et créer des opportunités d'emplois. Il s'agit de produire davantage avec moins d'eau, tout en assurant à chacun un accès à une alimentation suffisante, saine et durable.
- **Préservation des écosystèmes** : La gestion de l'eau doit garantir la conservation, voire la restauration, des écosystèmes aquatiques et terrestres, qui assurent des fonctions écologiques essentielles (autoépuration, régulation du climat, biodiversité, etc.). La durabilité écologique devient ainsi une condition préalable à toute action de développement.

Moyens d'action prioritaires

Pour atteindre ces objectifs, cinq leviers stratégiques ont été identifiés dans la vision mondiale de l'eau :

1. Participation des parties prenantes : Impliquer l'ensemble des acteurs concernés (usagers, institutions, société civile, secteur privé) dans les processus de planification, de décision et de mise en œuvre, afin d'assurer une gestion partagée, démocratique et adaptée aux réalités locales.

2. Tarification complète de l'eau : Mettre en place des mécanismes de tarification reflétant la totalité des coûts économiques, environnementaux et sociaux des services liés à l'eau, tout en garantissant l'accès pour les plus vulnérables, dans une logique d'équité et de responsabilisation des usagers.

3. Soutien à la recherche et à l'innovation : Accroître les investissements publics et privés dans la recherche scientifique et technologique, afin de développer des solutions adaptées aux enjeux de l'eau, notamment dans les contextes sensibles (zones arides, milieux urbains denses, bassins transfrontaliers).

4. Coopération internationale : Renforcer la gouvernance partagée des ressources en eau transfrontalières à travers des mécanismes de dialogue, de coordination institutionnelle et de diplomatie de l'eau, dans une perspective de paix et de sécurité hydrique régionale.

5. Mobilisation des financements : Promouvoir un accroissement significatif et pérenne des investissements dans le secteur de l'eau, qu'il s'agisse d'infrastructures, de gouvernance, de formation ou de préservation des écosystèmes.

Une rupture avec les modèles traditionnels

Historiquement, la gestion de l'eau a été fragmentée entre ministères, secteurs et niveaux de gouvernance, souvent limitée à une approche technique, centrée sur l'approvisionnement et la tarification selon le principe de l'« usager-pollueur-payeur ». En rupture avec ces pratiques, la GIRE propose un changement de paradigme : elle réintroduit la nécessité d'intégrer les dimensions sociales, environnementales et économiques dans toute prise de décision en matière de gestion de l'eau.

Par ailleurs, la GIRE adopte une perspective systémique et intersectorielle, incluant la gestion conjointe des eaux de surface et souterraines, des terres, ainsi que des zones côtières, tout en tenant compte des interactions entre usages domestiques, agricoles, industriels et environnementaux. Elle s'avère particulièrement pertinente dans les zones à stress hydrique élevé, notamment les régions arides et semi-arides, où la compétition pour l'accès à la ressource est particulièrement aiguë.

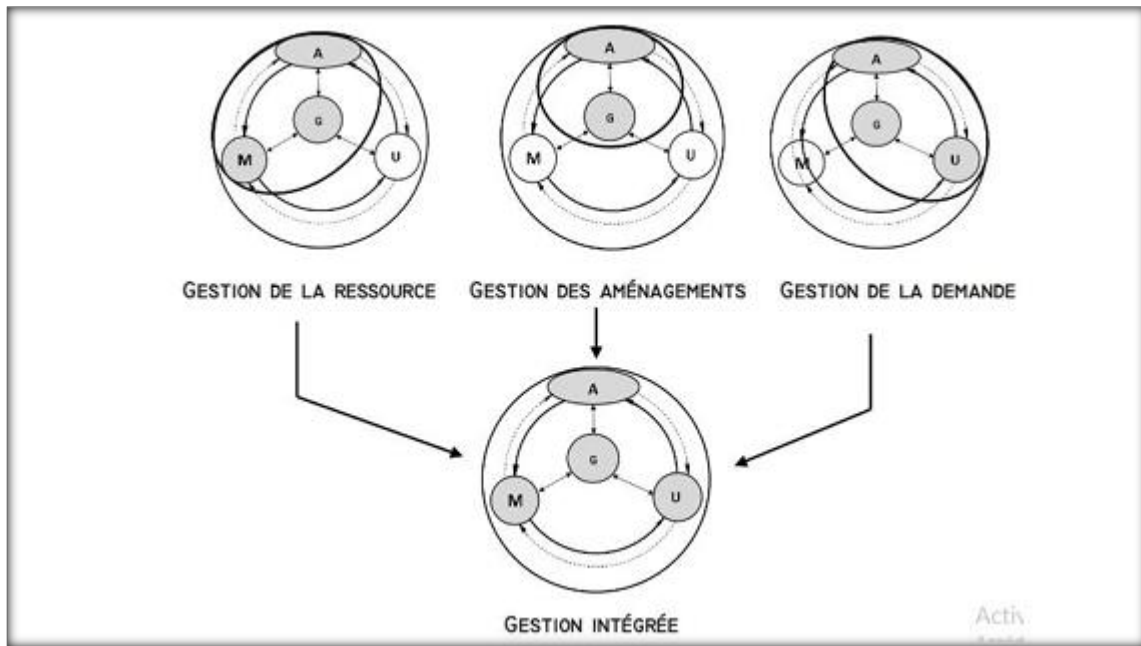


Figure I.1 : Vision thématique de la gestion intégrée des ressources en eau (Pouget et al., 2003). A : Aménagement – G : Gestion – M : Milieu – U : Usages.

I.4.2. L'approche à deux voies de la GIRE

L'approche dite « à deux voies » constitue un fondement méthodologique majeur de la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE). Elle repose sur une articulation cohérente entre plusieurs niveaux d'intervention et sur une coordination intersectorielle approfondie. Reynard (2000) en identifie les principes directeurs : intégration, coordination, organisation et hiérarchisation des éléments constitutifs de la gestion de l'eau. Ce modèle s'appuie sur deux formes complémentaires d'intégration : **l'intégration horizontale** et **l'intégration verticale**.

Intégration horizontale : une coordination intersectorielle

L'intégration horizontale renvoie à la coordination entre les différents secteurs d'activité et domaines de politique publique ayant un impact direct ou indirect sur les ressources en eau. Il s'agit notamment de l'agriculture, de l'énergie, de l'aménagement du territoire, de la santé, de l'environnement et de l'industrie. Cette forme d'intégration vise à briser les silos administratifs traditionnels, à éviter les politiques contradictoires et à assurer une cohérence entre les usages, les objectifs et les instruments de gestion. Elle favorise une vision systémique de l'eau en tant que ressource transversale, indispensable au fonctionnement des écosystèmes comme au développement économique et social.

Intégration verticale : une gouvernance multi-niveau

L'intégration verticale, quant à elle, implique une collaboration étroite entre les différents niveaux de gouvernance, allant du local au national, voire au transnational dans le cas des bassins transfrontaliers. Cette approche repose sur la subsidiarité, principe selon lequel les

décisions doivent être prises au niveau le plus pertinent et le plus proche des acteurs concernés. Elle vise à renforcer la cohérence entre les orientations stratégiques formulées au niveau central et leur mise en œuvre effective au niveau local, tout en adaptant les politiques aux réalités territoriales.

-Un cadre de gouvernance collaborative et décentralisée

Le principe de double intégration induit une gouvernance décentralisée, participative et inclusive. Il souligne l'importance de la collaboration entre l'ensemble des acteurs concernés : autorités publiques, usagers, organisations professionnelles, ONG, scientifiques et citoyens. Tous sont appelés à contribuer à l'identification des enjeux, à la définition des priorités, à l'élaboration des politiques et à leur mise en œuvre. Dans cette optique, le rôle des collectivités territoriales est central, de même que celui de la **société civile**, qui apporte des solutions innovantes, exprime les attentes sociales et joue un rôle de médiation et de veille.

La GIRE, dans cette approche, ne se limite donc pas à une technique de gestion, mais constitue un processus politique fondé sur le dialogue, la négociation et la co-construction des décisions. Elle repose sur l'élaboration de **réglementations socialement acceptées**, construites de manière concertée avec l'ensemble des parties prenantes, dans le but d'assurer une gestion durable, équitable et légitime des ressources en eau (Réseau International des Organismes de Bassins, 2002).

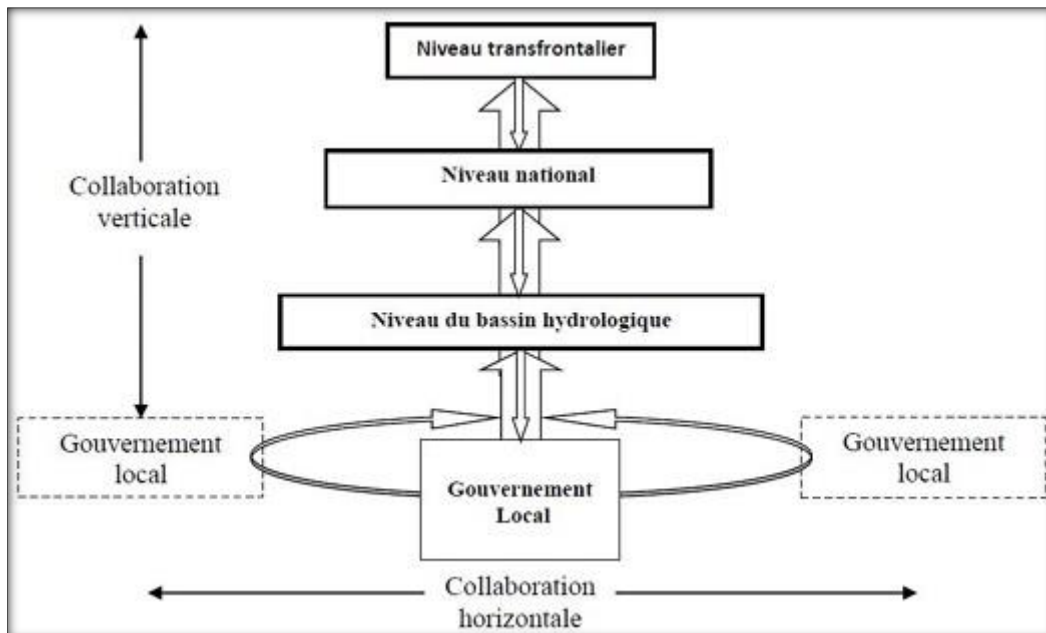


Figure I.2 : l'approche à deux voies de la GIRE (Philip et al.2008)

I.4.3. La collaboration horizontale

La **collaboration horizontale** constitue un pilier fondamental de la mise en œuvre de la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE). Elle se manifeste par l'implication active de l'ensemble des parties prenantes dans les processus de planification, de concertation et de gestion de l'eau à l'échelle du bassin versant. Cette dimension participative suppose une communication constante, un dialogue structuré et une coopération renforcée entre les différents utilisateurs de l'eau – qu'ils soient agricoles, industriels, domestiques ou institutionnels (Scoullos et al., 2002).

Contrairement à une coordination limitée aux seules autorités publiques, la collaboration horizontale s'étend à l'ensemble des usagers et acteurs territoriaux partageant une même ressource. Elle favorise la reconnaissance mutuelle des besoins, la transparence dans les processus décisionnels, ainsi que la co-construction de solutions acceptables et durables. Ce mode de gouvernance contribue ainsi à atténuer les tensions liées à la **concurrence pour l'accès à la ressource**, notamment dans les contextes de rareté ou de pressions multiples (Philip et al., 2008b).

De plus, la collaboration horizontale permet de renforcer la légitimité des décisions en matière de gestion de l'eau, en s'appuyant sur la diversité des savoirs – scientifiques, techniques, mais aussi empiriques et locaux. Elle encourage également l'innovation sociale, en stimulant la mise en place de mécanismes de médiation, de plateformes de dialogue et de dispositifs de concertation multi-acteurs. Par cette dynamique inclusive, elle contribue à instaurer une gouvernance de l'eau démocratique, équitable et partagée.

I.4.4. La collaboration verticale

En complément de la collaboration horizontale, la **collaboration verticale** joue un rôle déterminant dans la consolidation d'une gouvernance intégrée et cohérente des ressources en eau. Elle repose sur une articulation fonctionnelle entre les différents niveaux de gouvernance – du local au national, voire supranational – et vise à assurer la coordination entre les institutions de terrain (collectivités, agences de l'eau, usagers) et les instances décisionnelles supérieures (ministères, parlements, organisations régionales ou internationales) (Philip et al., 2008b).

Ce mode de coordination vise, d'une part, à **faire remonter** les problématiques locales, les besoins spécifiques et les propositions issues du terrain vers les niveaux stratégiques de décision ; d'autre part, à **décliner les orientations nationales ou internationales** en politiques opérationnelles adaptées aux réalités locales. Il permet ainsi une meilleure

intégration des préoccupations territoriales dans les cadres législatifs et programmatiques, tout en garantissant une mise en œuvre plus efficace et plus ciblée des politiques publiques.

La collaboration verticale suppose des mécanismes institutionnels robustes et des canaux de communication efficaces entre les échelons territoriaux. Les **agences de bassin** jouent, à ce titre, un rôle central dans cette médiation multi-niveaux, en assurant la coordination technique et politique entre les usagers locaux et les autorités nationales. Dans de nombreuses régions du monde, ces agences incarnent les principes de la GIRE à travers une gestion décentralisée, intégrée et participative des bassins hydrographiques.

1.4.5. La politique nationale de l'eau en Algérie

Depuis les années 1980, l'Algérie a engagé une série de réformes structurelles afin de rattraper le retard accumulé dans le domaine de la gestion de l'eau, un retard accentué par des périodes de sécheresse récurrentes. La création du ministère de l'Hydraulique en 1980 constitue une étape décisive dans cette dynamique. Ce ministère s'est vu confier des missions stratégiques, notamment l'inventaire, la mobilisation, la conservation et la distribution des ressources hydriques, avec une priorité accordée à l'approvisionnement en eau potable des populations.

La promulgation de la loi n°83-17 relative au code de l'eau en 1983 a marqué une avancée majeure en consacrant le droit d'accès à l'eau pour les besoins domestiques et d'hygiène. Cette législation, bien que novatrice pour l'époque, présentait des limites en matière de durabilité et d'équité. Elle a été révisée en profondeur en 2005, à travers une nouvelle loi intégrant les principes du développement durable et instaurant une approche plus intégrée, cohérente avec les orientations de la GIRE. Cette réforme a permis l'adoption de mécanismes de planification stratégique et de gouvernance plus adaptés aux enjeux contemporains.

Dans le cadre de cette réorganisation, le territoire algérien a été découpé en cinq bassins hydrographiques majeurs, chacun placé sous la responsabilité d'une Agence de Bassin Hydraulique (ABH). Ces agences jouent un rôle central dans la planification, la coordination et le suivi des politiques de l'eau à l'échelle régionale. Des Plans Directeurs d'Aménagement des Ressources en Eau (PDARE) ont été élaborés pour chaque bassin, appuyés par des plans quinquennaux de développement, un Conseil consultatif des ressources en eau, ainsi qu'une ouverture progressive au secteur privé pour dynamiser les investissements et renforcer l'efficacité du service public.

La politique actuelle, pilotée par le ministère des Ressources en Eau et de l'Environnement, reste orientée majoritairement vers une logique d'offre, à travers la construction d'infrastructures (barrages, forages, stations de dessalement). Toutefois, cette orientation

montre ses limites face à une demande croissante, résultant de la croissance démographique, de l'urbanisation accélérée et des impacts croissants du changement climatique. La nécessité d'une transition vers une gestion véritablement intégrée, équilibrant offre et demande, devient ainsi plus pressante à l'horizon 2030.

I.4.6. Évolution des administrations de l'eau

L'histoire institutionnelle du secteur de l'eau en Algérie reflète l'évolution des priorités nationales et les mutations du contexte socio-environnemental. Depuis l'indépendance, plusieurs structures administratives se sont succédé, témoignant d'une volonté d'adapter les modes de gouvernance aux enjeux émergents. Cette dynamique s'est traduite par des réorganisations fréquentes, à la fois en termes de tutelle ministérielle, de compétences attribuées, et de stratégies de gestion.

La première entité chargée du secteur hydraulique, la sous-direction de l'Hydraulique, fut créée dès **1963**. Par la suite, les responsabilités liées à la gestion de l'eau ont été transférées à différentes institutions selon les conjonctures : ministères de l'Agriculture, de l'Équipement, puis de l'Environnement, avant la mise en place du ministère des Ressources en Eau en tant qu'entité autonome et spécialisée.

Ce processus d'évolution reflète une montée en complexité de la gestion de l'eau, exigeant des structures plus techniques, transversales et décentralisées. Le tableau ci-dessous présente une synthèse chronologique des principales administrations de l'eau en Algérie, en précisant leurs périodes d'activité et leurs missions spécifiques:

Tableau I.1 : Évolution temporelle et missions des administrations nationales de l'eau en Algérie

Période	Nom d'administration	Missions principales
1963–1971	Sous-direction de l'Hydraulique (Direction de l'infrastructure, Ministère de la Reconstruction, des Travaux Publics et des Transports)	Contrôle, orientation des recherches scientifiques, des études appliquées à l'hydraulique, la construction, l'entretien des ouvrages hydrauliques tels les barrages de régularisation interannuelle, et la police des eaux.
1971–1980	Secrétariat d'État à l'Hydraulique	Chargé des études des milieux et de la recherche hydraulique.
1980–1985	Ministère de l'Hydraulique	Assure la mise en œuvre dans un cadre concerté de la politique nationale dans le domaine de l'hydraulique conformément aux objectifs de développement national afin d'assurer de façon intégrée et unitaire la valorisation des ressources en eau. Le ministère est chargé du développement et la gestion des infrastructures hydrauliques de l'inventaire, de la mobilisation, de l'affectation, du transfert, de la distribution, de la mobilisation, de la gestion et conservation des ressources en eau ainsi que l'étude et la réalisation.
1985–1989	Ministère de l'Hydraulique, de l'Environnement et des Forêts	Structuré en administrations chargées de la planification, des moyens, des études juridiques, du contentieux et de la coopération, de la formation, de la recherche, de la mobilisation, des transferts, de la petite et moyenne hydraulique, de l'approvisionnement, de l'assainissement, des périmètres irrigués, de la protection contre la pollution et les nuisances, de la protection de la faune, de la préservation et aménagement des sols.
1989–1990	Ministère de l'Hydraulique	Les activités dans le domaine de la recherche, l'exploration, la production, le stockage, la distribution de l'eau pour tous les usages et propose « la mise en œuvre de la politique des prix et tarifs de l'eau »
1990–1994	Ministère de l'Équipement	Le suivi et le contrôle de la mise en œuvre, dans le domaine hydraulique, de la recherche, du stockage et la distribution pour tous les usages.
1994–2000	Ministère de l'Équipement et de l'Aménagement du Territoire en collaboration avec le Ministère de l'Hydraulique Agricole	La recherche, le stockage et la distribution pour tous les usagers.
2000–2016	Ministère des Ressources en Eau	Chargé d'adapter pour une meilleure prise en charge du service public de l'eau, les modes d'exploitation et de gestion
2016–2020	Ministère des Ressources en Eau et de l'Environnement	Une perspective du développement durable dans les domaines des ressources en eau et de la protection de l'environnement.

I.4.7 Le Ministère des ressources en eau

Le ministère des ressources en eau (MRE) oriente la politique de l'eau, il est chargé de la réglementation et de la supervision des activités. D'autres entités s'occupent de la planification, des études, de la construction et de l'entretien des équipements et de la fourniture des services d'eau et d'assainissement ainsi que des services d'irrigation. Le secrétariat général du MRE commande huit directions.

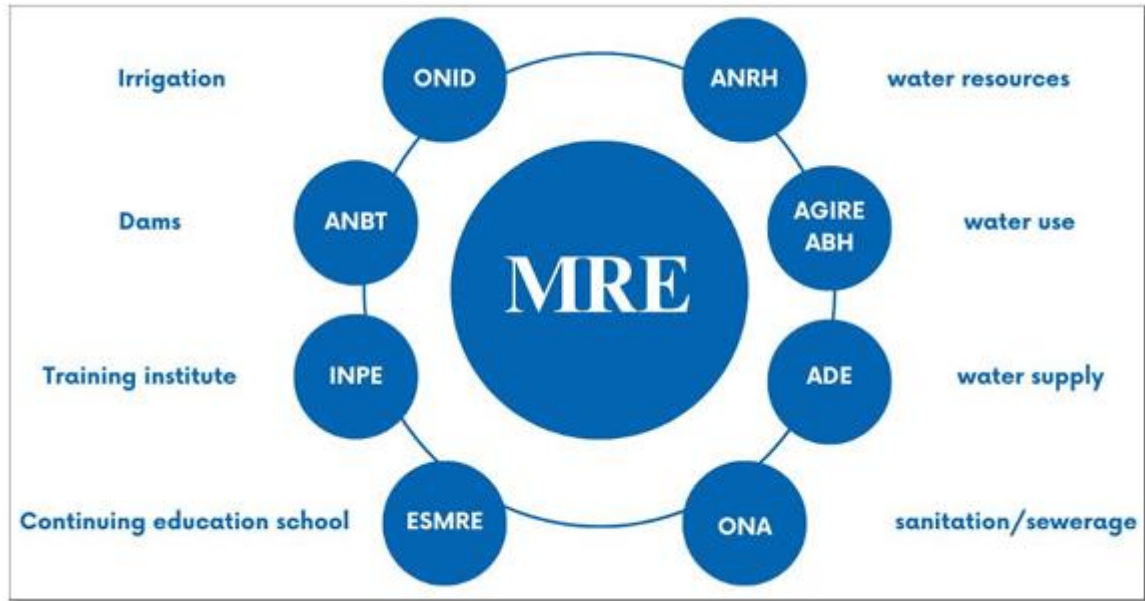


Figure I.3 : Organigramme des différentes directions du ministère des ressources en eau

I.4.8 Les agences de bassins hydrographiques en Algérie : missions et organisation

Créées dans le cadre de la loi relative à l'eau n°05-12 de 2005, les agences de bassins hydrographiques sont chargées de mettre en œuvre la gestion intégrée des ressources en eau au niveau de chaque unité hydrographique naturelle. Leurs missions principales sont définies par voie réglementaire et comprennent :

- La promotion de l'économie de l'eau, la préservation de sa qualité et la protection des milieux récepteurs contre les rejets polluants.
- L'élaboration et la mise à jour du cadastre hydraulique et de la balance en eau du bassin.
- La collecte des données statistiques et des informations relatives à la ressource en eau, à ses prélèvements et consommations.
- La définition des spécifications techniques pour les rejets d'eaux usées et les dispositifs d'épuration.
- La surveillance de la pollution des ressources en eau.

- La sensibilisation des usagers (domestiques, industriels et agricoles) à une utilisation rationnelle de l'eau.
- Le découpage du territoire national en cinq bassins hydrographiques regroupant 19 bassins versants repose sur plusieurs critères (Dahmani & Bithorel, 2000 ; Remini, 2010)
- L'équilibre en ressources hydriques et en potentiel humain entre régions.
- L'unité géographique des ressources en eau de surface et souterraines au sein d'un même bassin.
- L'équilibre en infrastructures hydrauliques et en réseaux de transfert d'eau.
- Une répartition équitable des wilayas selon leur importance économique.

Tableau I.2: Les bassins hydrographiques de l'Algérie.

Bassins Hydrographiques	Superficie en km ²	Bassins versants
Oranie-Chott Chergui	77 169	Côtiers oranais Macta Tafna Chott Chergui
Chéliff-Zahrez	56 227	Côtiers Dahra Chéliff Chott Zahrez
Algérois-Hodna-Soummam	47 431	Côtiers algérois Sébaou Isser Soummam Chott Hodna
Constantinois-Seybousse-Mellegue	44 348	Côtiers constantinois Kébir Rhumel Medjerdah Mellegue Seybousse Hauts Plateaux Constantinois
Sahara	2 018 054	Sahara Chott Melghir

I.4.9 L'Agence Nationale de Gestion Intégrée des Ressources en Eau (AGIRE)

Créée en 2011, placée sous la tutelle du ministère de la ressource en eau, a pour principales missions d'assurer l'orientation, l'animation, la coordination et l'évaluation des cinq agences de

bassins hydrographiques. Elle est chargée de réaliser des enquêtes, études et recherches liées au développement de la gestion intégrée des ressources en eau, et collecter l'information sur l'eau au niveau national, et surtout élaborer et actualiser des plans à moyen et long terme de développement sectoriel.

I.5 Le cycle hydrologique de l'eau :

Le cycle de l'eau, appelé aussi cycle hydrologique, est l'ensemble des cheminements que peut suivre une particule d'eau. Ces mouvements, accompagnés de changements d'état, peuvent s'effectuer dans l'atmosphère, à la surface du sol et dans le sous-sol. Chaque particule n'effectue qu'une partie de ce cycle et avec des durées très variables : une goutte de pluie peut retourner à l'océan en quelques jours alors que sous forme de neige, en montagne, elle pourra mettre des dizaines d'années (Laborde, 2009). Sous l'effet du rayonnement solaire, l'eau évaporée à partir du sol, des océans et des autres surfaces d'eau, entre dans l'atmosphère. L'élévation d'une masse d'air humide permet le refroidissement général nécessaire pour l'amener à saturation et provoquer la condensation de la vapeur d'eau sous forme de gouttelettes constituant les nuages, en présence de noyaux de Condensation. Puis la vapeur d'eau, transportée et temporairement emmagasinée dans les nuages, est restituée par le biais des précipitations aux océans et aux continents. Une partie de la pluie qui tombe peut-être interceptée par les végétaux puis être partiellement restituée sous forme de vapeur à l'atmosphère. La pluie non interceptée atteint le sol. Suivant les conditions données, elle peut alors s'évaporer directement du sol, s'écouler en surface jusqu'aux cours d'eau (ruissellement de surface) ou encore s'infiltrer dans le sol.

Il peut aussi y avoir emmagasinement temporaire de l'eau infiltrée sous forme d'humidité dans le sol, que peuvent utiliser les plantes. Il peut y avoir percolation vers les zones plus profondes pour contribuer au renouvellement des réserves de la nappe souterraine.

Un écoulement à partir de cette dernière peut rejoindre la surface au niveau des sources ou des cours d'eau. L'évaporation à partir du sol, des cours d'eau, et la transpiration des plantes complètent ainsi le cycle (Musy, 2005).

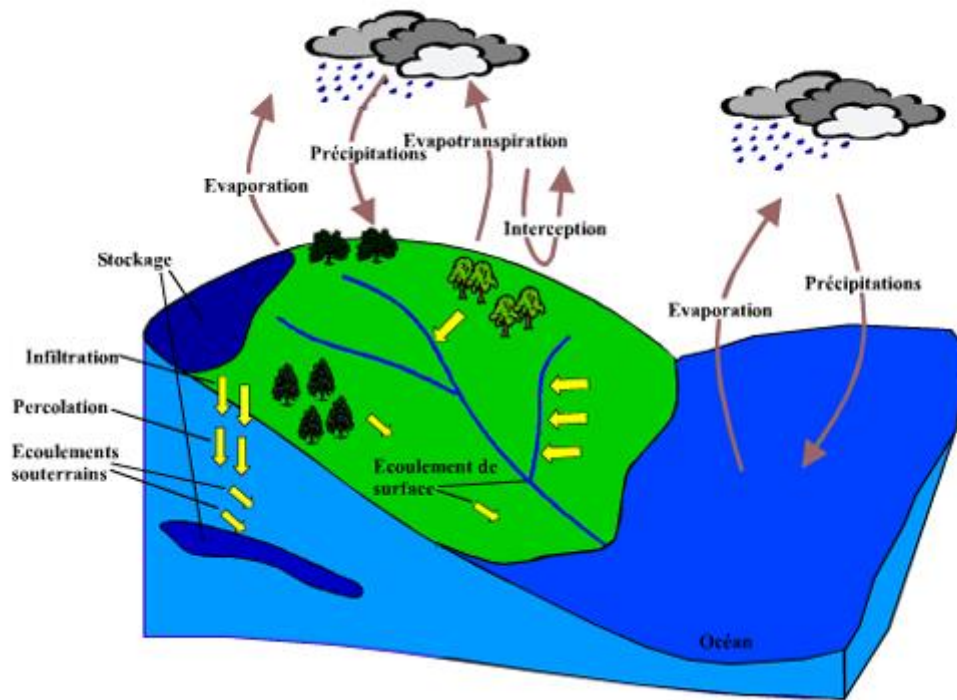


Figure I.4 : Schématisation du cycle d'eau (Musy, 2005)

I.5.1 Composition du cycle de l'eau :

Le cycle de l'eau est composé de plusieurs phases :

I.5.1.1 Evaporation : Chauffé par le soleil, l'eau des océans, des mers, des rivières et des lacs va s'évaporer et monter dans l'atmosphère. Les végétaux et les êtres vivants transpirent et rejettent eux aussi de la vapeur.

I.5.1.2 Condensation : Au contact des couches d'air froid de l'atmosphère, la vapeur d'eau se condense les minuscules gouttelettes, qui poussées par le vent se rassemblent et forment des nuages.

I.5.1.3 Précipitation : Les nuages déversent leur contenu sur la terre, sous forme de pluie, de neige, de grêle, selon la pression atmosphérique.

I.5.1.4 Ruissellement : Ces pluies et neiges s'écoulent vers les plaines pour alimenter les nappes souterraines.

I.6 Notion d'un bassin versant :

Un bassin versant est une zone géographique de collecte des eaux par un cours d'eau et ses affluents. Il est limité à l'amont par une ligne de partage des eaux qui correspond souvent,

mais pas toujours, à une ligne de crête. Les eaux de pluies de part et d'autre de cette ligne s'écoulent dans deux directions différentes en emportant avec elles les éléments dissous ou en suspension tels que les sédiments et les polluants. Le bassin versant est limité à l'aval au point de convergence des eaux appelé exutoire : confluence avec un cours d'eau, embouchure avec un lac, une mer ou un océan.

Chaque bassin versant peut-être hiérarchiser : on peut le subdiviser en un certain nombre de bassins de niveau inférieur « sous-bassins versants » correspondant à la surface d'alimentation de chacun des affluents se jetant dans le cours d'eau principal. Un bassin versant de grande taille se déversant vers la mer ou l'océan par une seule embouchure est un bassin hydrographique

I.7 Bilan hydrologique :

Le bilan hydrologique vise à établir le budget entre les entrées et les sorties en eau d'une unité hydrologique définie pendant une période de temps donné (Ambroise, 1998).

Le bilan hydrologique permet d'estimer l'infiltration et le ruissellement dans un bassin versant en tenant compte des précipitations moyennes et de l'évapotranspiration réelle.

On exprime généralement les termes du bilan hydrique en hauteur d'eau (mm par exemple), on parle alors de lame d'eau (précipitée, écoulée, évaporée).

Dans sa formulation la plus simple, s'écrit :

$$P = ETR + I + R + \Delta Ru \quad (I.1)$$

Avec : P : Précipitations moyennes annuelles (mm)

ETR : Evapotranspiration (mm)

I : la lame d'eau infiltrée (mm)

R : la lame d'eau ruisselée par les rivières (mm)

Ru : Réserve utile du sol (stocks d'eau dans la partie superficielle du sol colonisée par les racines)

ΔRu : variation de la réserve utile (mm)

Les modèles hydrologiques sont devenus des outils essentiels pour l'analyse et la gestion des ressources en eau. Ils permettent de mieux comprendre, quantifier et décrire le mouvement de l'eau, des sédiments et des contaminants à travers la phase terrestre du cycle hydrologique.

Leur niveau de détail varie selon le problème étudié, et ils sont largement utilisés dans de nombreux domaines, allant de la gestion des bassins versants à la conception technique (Singh & Woolhiser, 2002)

I.7.1. Évolution de la modélisation hydrologique et essor de l'hydrologie numérique

La modélisation hydrologique a connu, au fil des décennies, un essor remarquable qui a donné naissance à une branche spécialisée de l'hydrologie : l'hydrologie numérique (Singh, 2018). Cette discipline repose sur l'utilisation de modèles hydrologiques mathématiques, qui simplifient les processus complexes du cycle de l'eau pour les simuler à différentes échelles spatiales et temporelles. Ces modèles sont aujourd'hui des outils incontournables pour la prévision des variables hydrologiques, la gestion des réservoirs, ainsi que pour la compréhension du fonctionnement des bassins versants (Larabi, 2017 ; Refsgaard, 1997 ; Freeze & Cherry, 1987).

Le développement de la modélisation hydrologique a été marqué par des étapes clés. L'un des premiers modèles intégrés majeurs, le Stanford Watershed Model, a été développé par Crawford et Linsley en 1966, marquant une avancée décisive vers la représentation systémique du fonctionnement des bassins versants (Singh & Frevert, 2003). Ce modèle a ouvert la voie à une évolution continue portée par les progrès technologiques et informatiques.

L'introduction des systèmes d'information géographique (SIG), de la télédétection, et plus récemment des automates cellulaires, a considérablement amélioré la capacité des modèles à représenter la variabilité spatiale et temporelle des processus hydrologiques (Beven et al., 1995 ; MacMillan et al., 1993). Ces innovations ont permis le développement de modèles plus performants et mieux adaptés aux réalités du terrain.

Parmi les modèles contemporains les plus notables, on peut citer :

- **TOPMODEL** (Beven et al., 1995), qui intègre la topographie dans la modélisation du ruissellement et des processus de subsurface ;
- **KINEROS** (Rovey et al., 1977 ; Hernandez et al., 2017 ; Smith et al., 1995), utilisé pour simuler les processus hydrologiques à l'échelle fine, notamment dans des contextes urbains ou semi-arides ;
- **TOPOG_IRM** (Zhu & Xu, 2021 ; Dawes et al., 1993), qui combine des approches topographiques et hydrogéologiques pour modéliser les flux d'eau dans des environnements hétérogènes.

I.7.2 Types de modèles hydrologiques

Les modèles hydrologiques sont des représentations mathématiques ou conceptuelles du cycle de l'eau, utilisés pour simuler, analyser ou prévoir le comportement des ressources en eau dans un bassin versant. Ils constituent des outils essentiels pour la gestion des ressources hydriques, en permettant de mieux comprendre les processus hydrologiques, d'évaluer les impacts du changement climatique ou des aménagements, et d'orienter les décisions en matière de planification et d'allocation des ressources.

Selon Ambroise (1998) et Beckers & Degré (2011), les modèles hydrologiques peuvent être classés selon plusieurs critères, dont le niveau de représentation des processus, le degré de complexité, et l'échelle spatiale et temporelle. On distingue principalement trois grandes catégories :

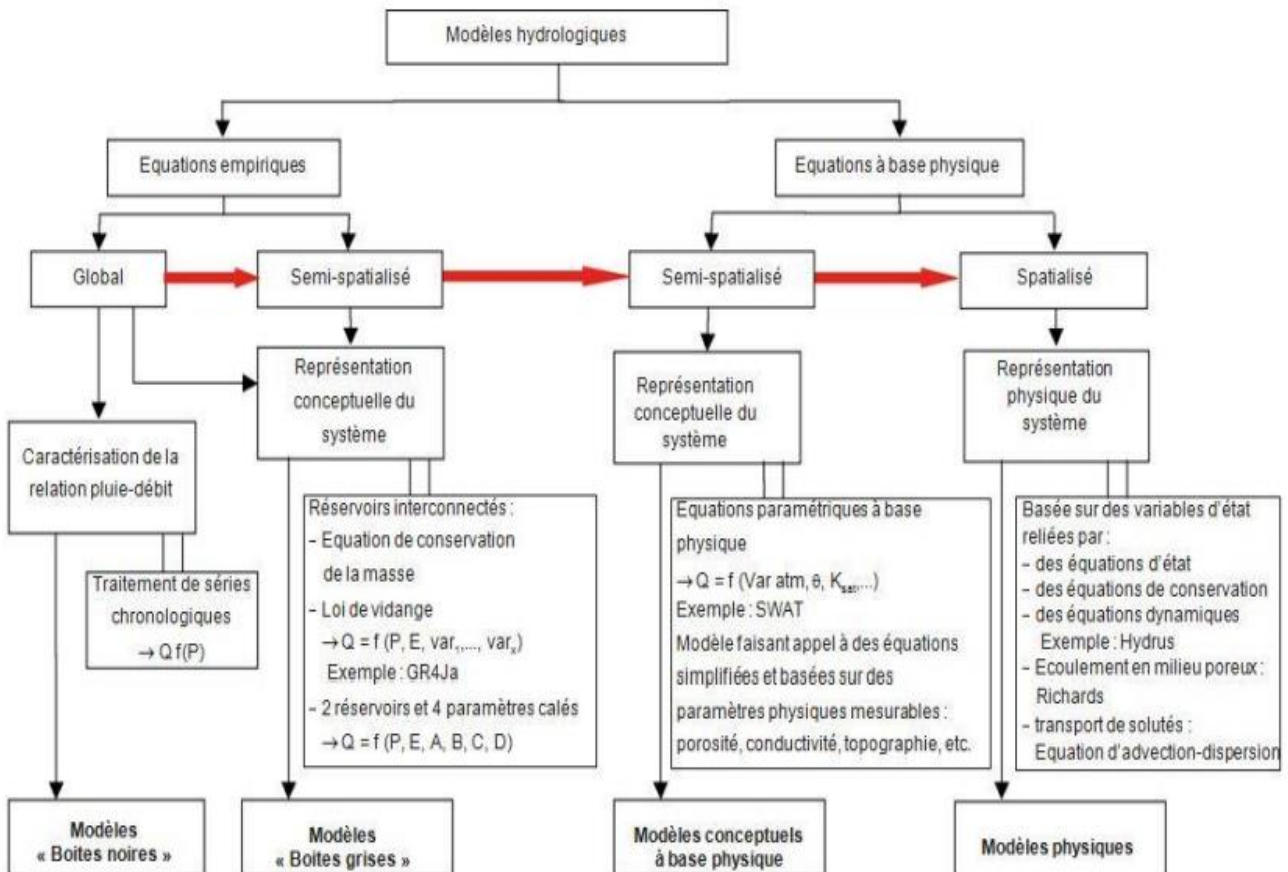


Figure I.5 : Classification des modèles hydrologiques selon Beckers and Degré (2011)

I.7.2.1. Modèles conceptuels

Ces modèles reposent sur une représentation simplifiée du fonctionnement hydrologique à travers des réservoirs interconnectés (surface, sol, nappe). Ils visent à reproduire les principales composantes du cycle de l'eau (précipitation, infiltration, ruissellement, évapotranspiration, recharge, etc.) sans nécessairement s'appuyer sur une base physique rigoureuse. Leur calibration repose généralement sur l'ajustement des paramètres à partir de séries chronologiques d'observations.

I.7.2.2. Modèles physiques ou mécanistes (ou distribués physiquement)

Ces modèles sont basés sur les lois fondamentales de la physique (conservation de la masse, de l'énergie, de la quantité de mouvement) et prennent en compte les caractéristiques précises du milieu (géologie, pédologie, topographie, usage des sols, etc.). Ils sont souvent spatialisés et requièrent des données détaillées pour chaque cellule du bassin. Leur objectif est de représenter le plus fidèlement possible les processus hydrologiques réels.

I.7.2.3. Modèles empiriques ou statistiques

Ces modèles s'appuient sur des relations mathématiques ou statistiques établies à partir de séries de données historiques (régressions, corrélations, réseaux de neurones, etc.). Ils ne cherchent pas à reproduire les processus hydrologiques mais à établir des relations entrées-sorties entre variables observées (par exemple, précipitations et débit).

I.8 Types de modèles hydrologiques en fonction de l'approche adoptée

Dans cette thèse, les approches retenues pour la modélisation hydrologique s'appuient sur une combinaison de méthodes physiques, empiriques et expérimentales afin d'assurer un bilan hydrologique fiable et adapté à l'échelle étudiée.

I.8.1 Modèle mixte (physique et empirique) pour le calcul du bilan hydrologique

Le modèle utilisé combine plusieurs approches complémentaires :

- **Approches empiriques**, notamment la méthode SCS-CN pour le calcul du ruissellement ;
- **Approches physiques ou physico-empiriques**, comme la méthode de Penman pour l'estimation de l'évapotranspiration ;
- **Données de terrain**, issues de mesures directes sur site pour évaluer l'infiltration.

Avantages de ce modèle mixte :

- Adapté aux grandes échelles spatiales, notamment grâce à l'intégration des données de télédétection ;
- Utilisation de données climatiques fiables et actualisées (ex. TerraClimate) ;

- Combinaison d'une méthode empirique rapide et facile à mettre en œuvre (SCS-CN) avec une méthode physique robuste et précise (Penman).

1.8.2 Ruissellement : méthode SCS-CN (Soil Conservation Service – CurveNumber)

Il s'agit d'un modèle empirique largement utilisé et bien adapté aux analyses à grande échelle.

Principe : Cette méthode estime le ruissellement direct à partir des précipitations, de la capacité de rétention du sol, de l'occupation du sol et de l'humidité initiale du sol.

Entrées principales : Précipitations, type de sol (groupe hydrologique), couverture du sol (obtenue par télédétection), et état d'humidité initiale.

1.8.3 Évapotranspiration : méthode de Penman-Monteith

Cette méthode physique est reconnue pour sa fiabilité dans les analyses hydrologiques et agricoles.

Principe : Basée sur le bilan énergétique et les transferts de masse, elle calcule l'évapotranspiration potentielle (ETP) à partir de variables climatiques.

Entrées principales : Température, rayonnement solaire, humidité relative et vitesse du vent, données issues de bases climatiques comme TerraClimate et la télédétection.

1.9. La télédétection : fondements et apports pour l'observation environnementale

La télédétection est une discipline scientifique transversale qui regroupe l'ensemble des méthodes et outils permettant l'acquisition, le traitement, l'analyse et l'interprétation d'informations sur l'environnement à distance, c'est-à-dire sans contact physique direct avec les objets observés. Elle repose sur la détection et l'enregistrement du rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi par les surfaces terrestres, à l'aide de capteurs embarqués sur diverses plateformes (satellites, drones, avions, stations terrestres ou maritimes). Les données obtenues permettent d'extraire des caractéristiques géométriques (position, forme, dimensions), optiques (réflexion, absorption, transmission) et physico-chimiques (température, humidité, teneur en chlorophylle, biomasse végétale, teneur en matière organique du sol, etc.) des cibles observées.

La télédétection s'impose ainsi comme un outil stratégique pour la surveillance des dynamiques environnementales, l'évaluation des ressources naturelles et le soutien à la gestion durable des territoires. Observée depuis l'espace, la Terre offre une vision synoptique nouvelle, permettant d'identifier les structures géomorphologiques de la croûte terrestre, de recenser les ressources naturelles (eaux de surface, cultures, ressources minières) et de suivre la dynamique atmosphérique, notamment la couverture nuageuse. Bien que diverses techniques, telles que la photographie aérienne, soient employées pour ces observations, seule la plateforme satellitaire assure une couverture spatiale étendue, systématique et répétitive à

l'échelle globale, caractéristique essentielle de la télédétection (Wachal et Banks, 2007 ; Amiar, 2013).

1.9.1. Principe de la télédétection

La télédétection repose sur l'acquisition d'informations à distance, à travers l'interaction de trois éléments fondamentaux : une cible (objet ou surface terrestre observée), une source d'énergie (naturelle ou artificielle), et un capteur (embarqué sur une plateforme aéroportée ou spatiale). Elle s'apparente au processus de la vision humaine, mais utilise des capteurs pour enregistrer le rayonnement électromagnétique réfléchi ou émis par les objets observés.

Selon la nature de la source d'énergie utilisée, on distingue deux types principaux de télédétection :

1.9.1.1. Télédétection passive

La télédétection passive repose sur une source d'énergie naturelle, principalement le rayonnement solaire. Le capteur enregistre le rayonnement réfléchi (dans les domaines du visible et du proche infrarouge) ou émis (dans l'infrarouge thermique) par les objets terrestres. Ce type de télédétection est limité aux conditions d'éclairement favorables, ce qui restreint son utilisation aux périodes diurnes et à une atmosphère relativement dégagée. Elle est donc moins efficace dans les zones nuageuses (ex. : régions tropicales) ou faiblement éclairées (ex. : zones polaires en hiver) (Adnane, 2011).

1.9.1.2. Télédétection active

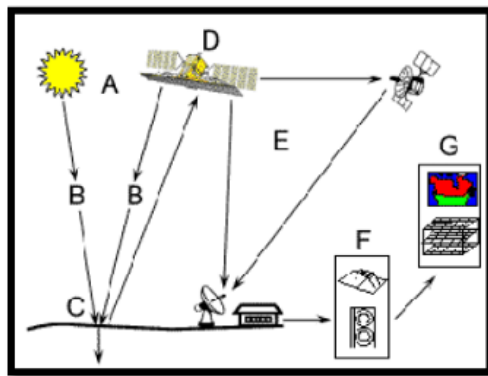
À l'inverse, la télédétection active utilise une source d'énergie artificielle émise par le capteur lui-même, tel qu'un radar ou un lidar (laser). Le capteur émet une onde électromagnétique vers la surface terrestre, puis enregistre l'énergie rétrodiffusée (écho). Ce système fonctionne indépendamment des conditions d'éclairement ou météorologiques, permettant l'acquisition de données de jour comme de nuit, y compris en présence de nuages. Il fournit des informations précieuses sur la topographie, la rugosité du sol, l'humidité de surface, ou encore la détection de structures non visibles par imagerie optique, telles que les nappes d'hydrocarbures en mer (Lee, 2002 ; Adnane, 2011 ; Araya, 2016).

Les capteurs de télédétection peuvent être embarqués sur diverses plateformes, allant des dispositifs terrestres aux plateformes aériennes (avions, drones, ballons) et spatiales (satellites, stations orbitales), offrant ainsi une grande flexibilité et adaptabilité selon les objectifs scientifiques, environnementaux ou opérationnels visés.

1.4. Étapes du processus de la télédétection

Le processus de la télédétection repose sur une chaîne d'étapes interdépendantes, allant de l'acquisition de l'énergie jusqu'à l'application de l'information extraite :

1. **Source d'énergie (A)** : Toute opération de télédétection commence par une source d'énergie (naturelle ou artificielle) nécessaire pour illuminer la surface terrestre.
2. **Propagation dans l'atmosphère (B)** : Le rayonnement électromagnétique interagit avec l'atmosphère avant et après son interaction avec la surface terrestre, ce qui peut en modifier l'intensité et la direction.
3. **Interaction avec la cible(C)**: L'énergie atteint la surface de la Terre, où elle est absorbée, réfléchie ou réémise selon les propriétés physiques et optiques de la cible.
4. **Acquisition par le capteur(D)** : L'énergie modifiée par la cible est détectée à distance par un capteur embarqué sur une plateforme (satellite, avion, etc.), puis enregistrée sous forme de données numériques.
5. **Transmission et traitement des données (E)** : Les signaux enregistrés sont transmis à une station de réception au sol, puis traités afin de produire des images exploitables.
6. **Interprétation et analyse (F)** : Ces images sont analysées visuellement ou à l'aide de méthodes numériques pour extraire des informations thématiques ou géospatiales.
7. **Application(G)**: Enfin, l'information extraite est utilisée pour diverses applications scientifiques, environnementales, agricoles, urbaines, etc., en fonction des objectifs de l'étude.



- A : Source d'énergie ou d'illumination
B : Rayonnement et atmosphère
C : Interaction avec la cible
D : Enregistrement de l'énergie par le capteur
E : Transmission, réception et traitement
F : Interprétation et analyse
G : Application

Figure I.6 : Les étapes couvrent le processus de la télédétection.

I.4 Les bases physiques de la télédétection :

I.4.1 Le rayonnement électromagnétique :

En télédétection, les échanges radiatifs entre le Soleil, le système Terre-atmosphère et les satellites concernent un large spectre électromagnétique allant de $0,35 \mu\text{m}$ à 1 m . Cette technique repose sur les propriétés physiques des objets, notamment leur capacité à émettre

ou réfléchir le rayonnement. Celui-ci peut provenir d'une source externe (comme le Soleil) ou être généré par la cible elle-même.

En télédétection, on mesure principalement l'intensité de ces ondes à l'aide de capteurs spécialisés (Baret, 1986 ; McVicar et Bierwirth, 2001).

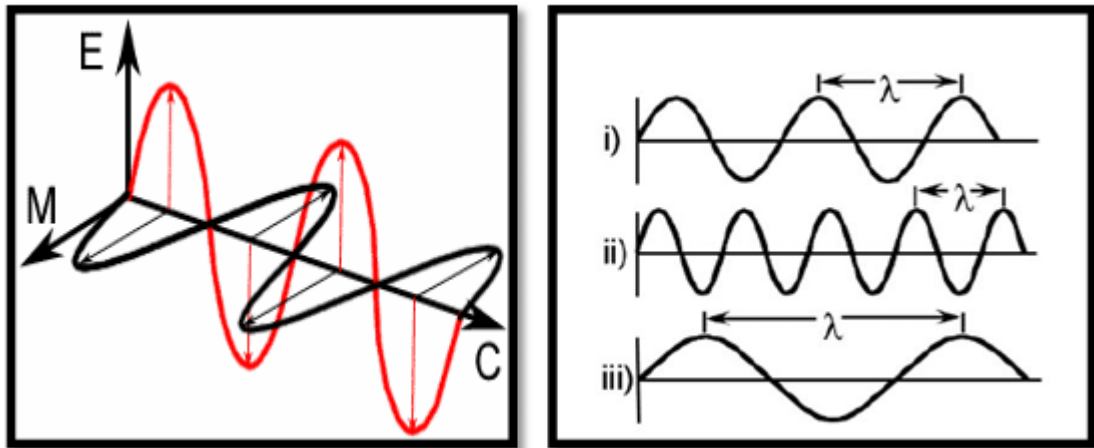


Figure I.7 : L'onde électromagnétique monochromatique.

I.4.2 Le spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique représente la répartition des ondes électromagnétiques en fonction de leur longueur d'onde, de leur fréquence ou bien encore de leur énergie (Figure I.8).

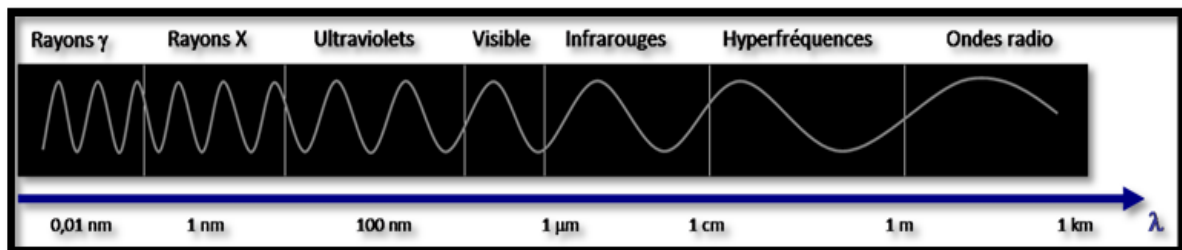


Figure I.8 : Le spectre électromagnétique (<http://e-cours.univ-paris1.fr>).

Le spectre électromagnétique s'étend des courtes longueurs d'onde (dont font partie les rayons gamma et les rayons X) aux grandes longueurs d'onde (micro-ondes et ondes radio). Les plus petites longueurs d'onde utilisées pour la télédétection se situent dans l'ultraviolet. Ce rayonnement se situe au-delà du violet de la partie du spectre visible. Certains matériaux de la surface terrestre, surtout des roches et minéraux, entrent en fluorescence ou émettent de la lumière visible quand ils sont illuminés par un rayonnement ultraviolet. (Wang, 2009 ., Toumi, 2013).

A. Les rayons gamma : ont les plus courtes longueurs d'onde et les plus hautes fréquences connues. Ces ondes de haute énergie peuvent parcourir de longues distances dans les airs et sont les plus pénétrantes de toutes.

B. Les rayons X : ils ont des longueurs d'onde plus grandes que les rayons gamma mais plus courtes que les rayons ultraviolets et ils ont donc une plus grande énergie que ces derniers. Les rayons X sont utilisés dans diverses applications scientifiques et industrielles mais sont principalement utilisés en médecine, par exemple en radiographie. Les rayons X sont émis par les électrons en dehors du noyau tandis que les rayons gamma sont émis par le noyau.

C. Le rayonnement ultraviolet (UV) : se définit comme la partie du spectre électromagnétique qui se situe entre les rayons X et la lumière visible.

D. La lumière visible : également dénommée spectre visible est la partie du spectre électromagnétique perceptible par l'œil humain. Elle couvre la totalité des couleurs, du bleu à 400 nm au rouge à 700 nm, la lumière bleue ayant plus d'énergie que le rouge.

E. Le rayonnement infrarouge (IR) : également appelé rayonnement thermique, il est la partie du spectre électromagnétique qui se situe entre la lumière visible et les microondes. La plus importante source naturelle de radiation infrarouge est le soleil.

F. Les ondes radio : possèdent de grandes longueurs d'onde allant de quelques centimètres à plusieurs milliers de kilomètres. Elles sont notamment utilisées pour la télévision, les téléphones portables et les communications radio (<https://www.greenfacts.org>).

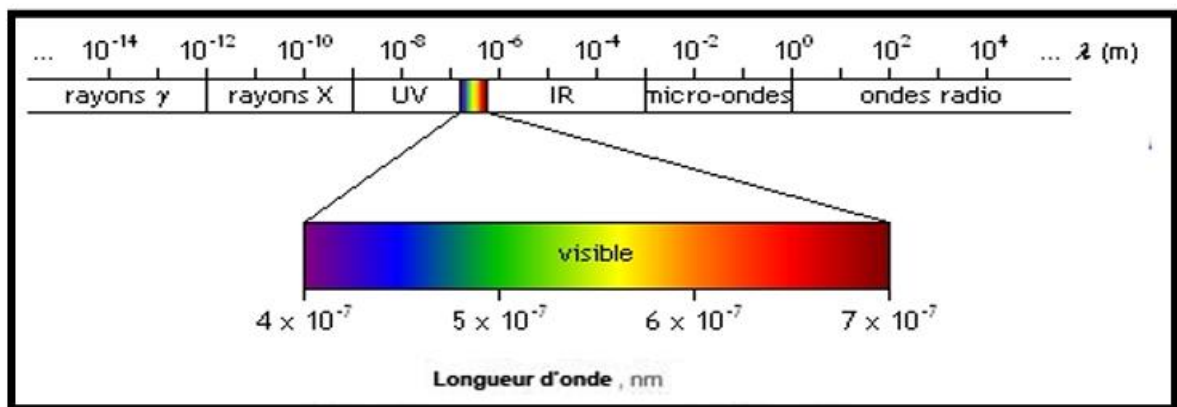


Figure I.9 : Le spectre visible.

I.4.3 Signatures spectrales des principales surfaces naturelles

En fonction de la nature et des propriétés intrinsèques de l'objet ou de la surface, le rayonnement incident interagit avec la cible. Par conséquent, chaque surface possède sa propre signature spectrale (quantité d'énergie émise ou réfléchie en fonction de la longueur d'onde) et peut être identifiée sur les images satellite (Uved, 2008).

I.1.5 Les vecteurs :

Le terme vecteur ou plate-forme (en télédétection) désigne le véhicule sur lequel sont embarqués les capteurs, les instruments de mesure du rayonnement électromagnétique. Le véhicule peut être aérien ou spatial, mais également terrestre pour les spectraux radiomètres ponctuels. En fonction de la distance au sol on distingue différents types de vecteurs. Ceux qui opèrent à quelques mètres du sol : grues, ou véhicules qui supportent des radiomètres ou appareils photographiques. B. Ceux qui opèrent entre la dizaine de mètres et la dizaine de kilomètres : avions, hélicoptères, ballons et dernièrement drones. Ceux qui opèrent entre la dizaine et la centaine de km : ballons stratosphériques. D. Ceux qui opèrent entre 200 km et 40 000 km : satellites. On distingue généralement deux types de satellites (Girard C.M, 1999) :

Les satellites géostationnaires :

Un satellite géostationnaire est un satellite artificiel qui se trouve sur une orbite géostationnaire. Sur cette orbite, le satellite se déplace de manière exactement synchrone avec la planète et reste constamment au-dessus du même point de la surface. Cette caractéristique est très utile pour les télécommunications (satellite de télécommunications) et certaines applications dans le domaine de l'observation de la planète (Demdoum N, 2020).

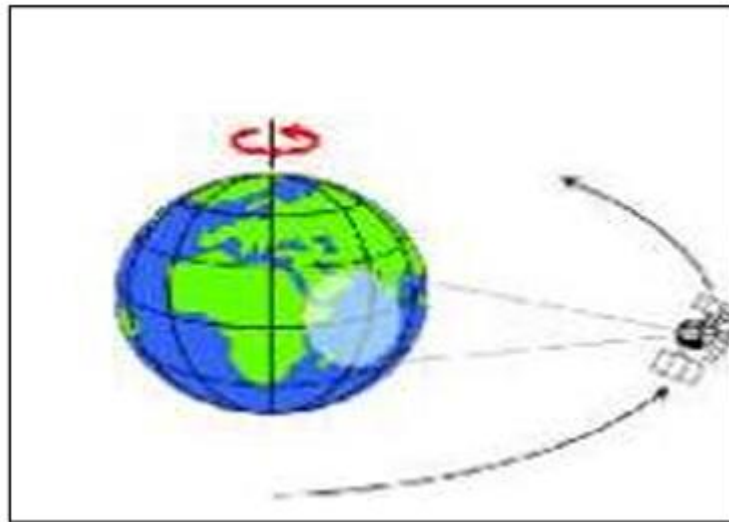


Figure I.10 : Satellites géostationnaires (Essahlaoui A, 2019)

Les satellites à défilements :

Un satellite à défilement est un satellite qui défile. C'est-à-dire qu'ils sont en orbite basse et défilent rapidement (typiquement 1 h ou 1 h 30 pour faire le tour de la terre). Ce genre de

satellite permet à toute personne équipée d'un téléphone adéquat et quel que soit l'endroit du monde où elle est de se relier directement au satellite pour téléphoner (Demdoum N, 2020).

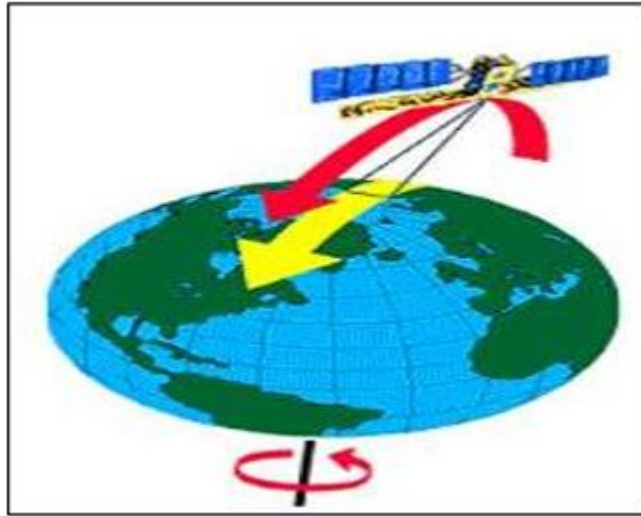


Figure I.11 : Les satellites à défilements (Essahlaoui A, 2019)

I.1.6 Les Capteurs :

Un capteur, dans le domaine de la télédétection spatiale, est un instrument qui recueille de l'énergie radiative provenant de la scène visée et délivre un signal électrique correspondant et mesurable. Les différents types de capteurs utilisés dans le domaine de la télédétection spatiale, sont les suivants :

A. Capteur actif :

Les capteurs actifs peuvent se définir comme étant des instruments qui émettent artificiellement de l'énergie sous forme d'impulsion à fréquence temporelle régulière et qui ont la capacité d'enregistrer le signal rétrodiffusé par les objets qui ont été en contact avec cette énergie. En télédétection, ce genre de capteur permet de produire des images.

B. Capteur passif :

Produit sa propre énergie pour illuminer la cible. Il dégage un rayonnement électromagnétique qui est dirigé vers la cible. Il a l'avantage de pouvoir prendre des mesures à n'importe quel moment de la journée ou la saison.

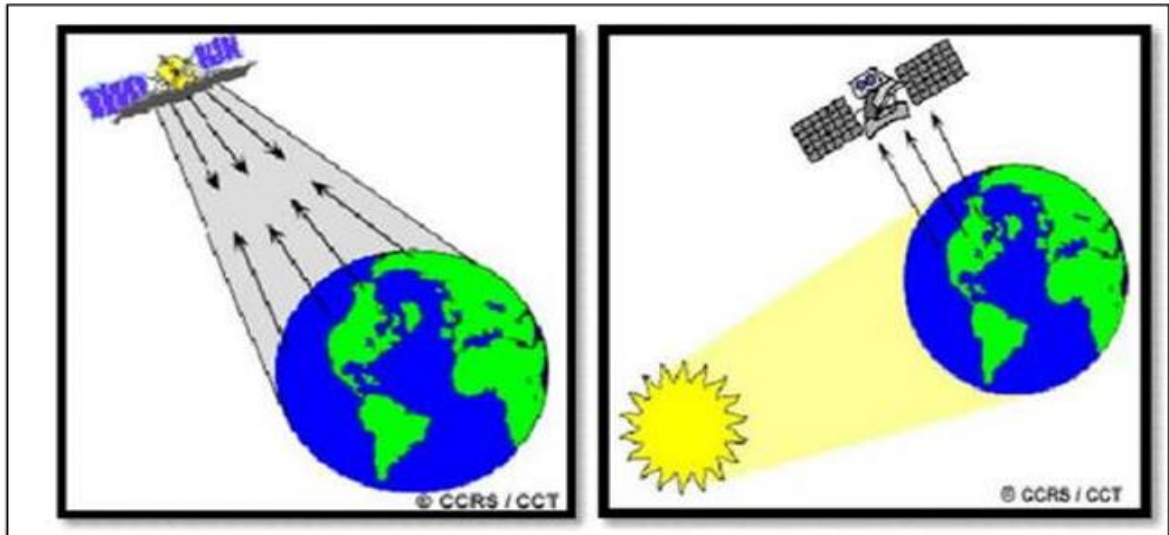


Figure I.12 : Télédétection active et télédétection passive (<https://ressources-naturelles.canada.ca/>)

I.6 Les satellites LANDSAT (land satellite) :

Le programme Landsat est le premier programme spatial civil consacré à l'observation systématique de la surface terrestre. Il a été développé par la NASA (National Aeronautics and Space Administration) à l'initiative de l'USGS (United States Geological Survey) et du ministère de l'Agriculture des États-Unis, au milieu des années 1960. L'objectif initial était de disposer d'un outil permettant de surveiller, cartographier et analyser les ressources naturelles à l'échelle globale.

Depuis le lancement de Landsat 1 en 1972, neuf satellites ont été placés en orbite jusqu'en 2021, avec Landsat 9 comme dernier en date. Grâce à une continuité de données multispectrales sur plus de 50 ans, le programme Landsat constitue une source unique d'information pour l'étude de l'évolution de la Terre.

Les satellites Landsat sont utilisés dans de nombreux domaines d'application, notamment :

- L'agriculture : suivie des cultures, évaluation des rendements, gestion de l'irrigation ;
- La cartographie : production de cartes topographiques ou thématiques ;
- L'analyse de l'occupation du sol et de son évolution : urbanisation, déforestation, désertification, etc. ;
- La gestion des ressources en eau et des écosystèmes.

Ce programme joue un rôle clé dans la surveillance de l'environnement, grâce à des données accessibles au public, qui sont exploitées par des chercheurs, décideurs et gestionnaires dans le monde entier.

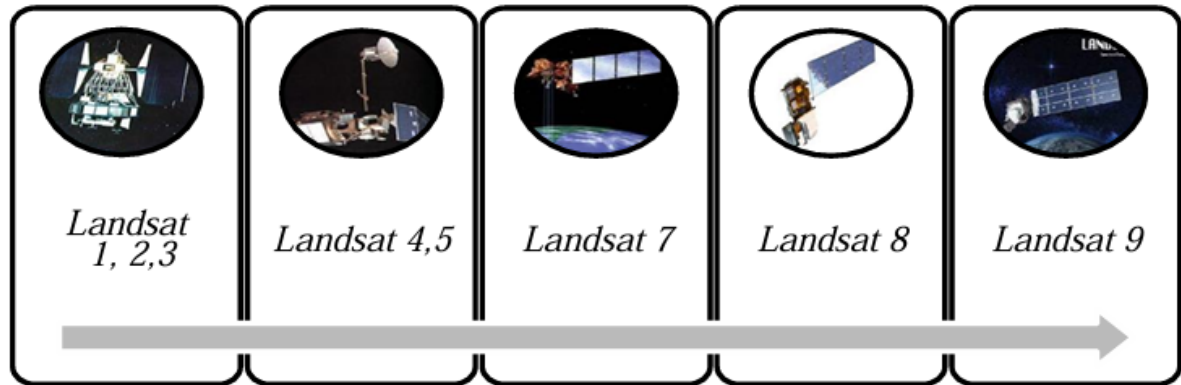


Figure I.13 : les différents types de Landsat

I.7 Les images satellitaires :

Une **image satellitaire** est un document numérique qui contient une grande variété d'informations sur des objets terrestres, tels que le **sol**, la **végétation**, ou encore les surfaces d'eau (Mousselmel Z., 2020). Ces informations sont issues du rayonnement électromagnétique réfléchi ou émis par les différentes surfaces terrestres, capté par les capteurs embarqués à bord des satellites.

Sur le plan technique, une image numérique se définit comme une matrice composée de valeurs numériques, appelées comptes numériques (Digital Numbers, DN). Ces valeurs sont généralement comprises entre **0 et 255**, dans le cas d'une image codée sur 8 bits (soit 256 niveaux de gris ou de valeur radiométrique).

Les principales caractéristiques d'une image numérique sont les suivantes :

- **Chaque pixel** (élément d'image) est identifié par un numéro de ligne (ligne i) et un **numéro de colonne** (colonne j), correspondant à ses coordonnées dans la matrice.
- La **résolution spatiale** dépend de la taille d'un pixel sur le terrain (exprimée en mètres).

La **taille mémoire** occupée par l'image est égale au produit du nombre de lignes par le **nombre de colonnes**, multiplié éventuellement par le nombre de bandes spectrales dans le cas d'une image multispectrale.

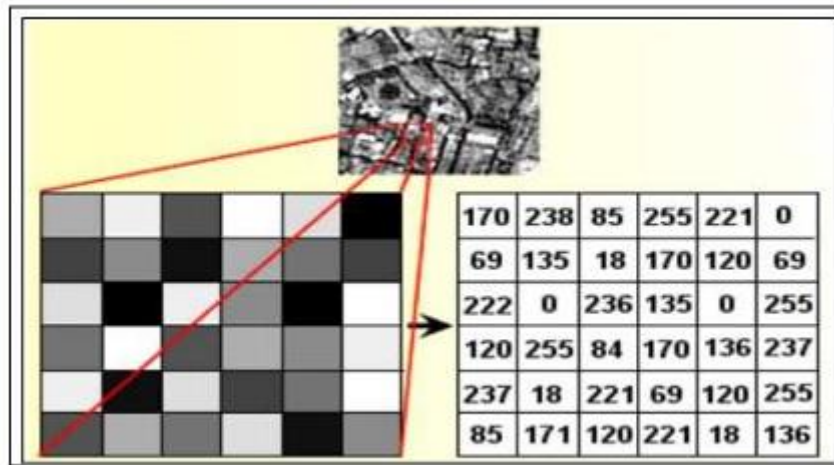


Figure I.14 : Image numérique satellite (<https://ressources-naturelles.canada>)

I.8 Résolution :

I.8.1 Résolution spectrale :

La résolution spectrale indique le nombre de bandes spectrales dans lesquelles le capteur peut capturer des radiations. Cependant le nombre de bandes n'est pas le seul aspect important de la résolution spectrale, la position des bandes dans le spectre électromagnétique est aussi un aspect clé.

I.8.2 Résolution Spatiale :

Elle donne une indication de la taille du pixel de l'image avec une faible séparation entre les objets qui peuvent être résolus par le capteur (Derdjini H, 2017).

Haute résolution spatiale : 0.5 - 4 m.

Moyenne résolution spatiale 4 - 30 m.

Faible résolution spatiale 30 - 1000 m.

I.8.3 Résolution radiométrique :

La résolution radiométrique d'un système de télédétection décrit sa capacité de reconnaître de petites différences dans l'énergie électromagnétique. Plus la résolution radiométrique d'un capteur est fine, plus le capteur est sensible à de petites différences dans l'intensité de l'énergie reçue (Essahlaoui A, 2020).

I.8.4 Résolution temporelle :

La résolution temporelle précise la fréquence de révision du satellite pour un emplacement spécifique. Le facteur temps est important lorsque (Derdjini H, 2017) :

- Les nuages persistants offrent une vue directe limitée de la surface de la Terre.
- Les phénomènes à court terme (inondations, marées noires, etc.)
- Les phénomènes qui changent rapidement (atmosphérique).

Les différents intervalles de la résolution temporelle se regroupent ainsi :

- Haute résolution temporelle : < 1 - 3 jours
- Moyenne résolution temporelle : 4 - 16 jours
- Faible résolution temporelle : > 16 jours

I.9. Conclusion :

Ce chapitre a présenté une revue documentaire sur la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) et les modèles de bilan hydrique, en introduisant les fondements de la modélisation hydrologique et les principales classifications de modèles. La GIRE, en tant qu'approche de gestion durable et concertée des ressources en eau, repose sur l'intégration des dimensions hydrologiques, environnementales et socio-économiques à l'échelle du bassin versant. Dans ce cadre, l'accent a été mis sur un modèle hydrologique mixte combinant des approches empiriques (SCS-CN pour l'estimation du ruissellement), physiques (formule de Penman pour l'évapotranspiration potentielle). Ce modèle s'avère particulièrement pertinent pour les grandes échelles spatiales, grâce à l'intégration de données issues de la télédétection et de bases climatiques fiables comme TerraClimate. Il offre un compromis entre simplicité d'application, rapidité de mise en œuvre et robustesse des résultats, ce qui en fait un outil adapté à l'évaluation des impacts des changements d'occupation du sol dans une perspective de GIRE.

Chapitre II

Contexte général et présentation de la zone d'étude

Introduction :

L'analyse intégrée des caractéristiques géographiques, géomorphologiques, hydrographiques, de la couverture végétale et de la nature des sols constitue une étape fondamentale pour appréhender le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant. Ce dernier, en interaction permanente avec son exutoire, forme un système hydrologique complexe, régi par l'interrelation de paramètres tels que la superficie, la morphologie, la topographie, la densité et la hiérarchie du réseau de drainage, ainsi que les conditions biophysiques et climatiques locales. Ces facteurs exercent une influence déterminante sur les processus hydrologiques, notamment l'écoulement de surface, l'infiltration, le ruissellement, l'érosion et le transport sédimentaire.

Agissant comme un réservoir naturel, le bassin versant recueille les précipitations et les transforme en écoulements de surface ou souterrains, en fonction de ses caractéristiques morphométriques et des conditions météorologiques. La compréhension de cette dynamique est essentielle pour l'évaluation quantitative des ressources en eau, ainsi que pour l'étude des processus d'érosion hydrique et de transport solide. Elle permet également de mieux anticiper les réponses hydrologiques face à des événements extrêmes tels que les crues.

L'analyse morphométrique constitue un outil fondamental pour caractériser les propriétés physiques d'un bassin versant. Elle repose sur l'étude de variables telles que la superficie, le facteur de forme, la pente moyenne, la longueur du bassin et la structure du réseau de drainage, qui influencent directement la vitesse de concentration des écoulements, la capacité de rétention des eaux et la réactivité du bassin aux épisodes pluvieux.

Les approches développées par Strahler (1964) et Schumm (1977) fournissent un cadre conceptuel et méthodologique robuste pour l'étude systémique des bassins versants. Elles permettent d'établir des corrélations fonctionnelles entre la structure morphométrique du bassin et son comportement hydrologique, ouvrant la voie à des modèles prédictifs de plus en plus précis.

En définitive, la prise en compte des paramètres morphométriques ne se limite pas à une meilleure compréhension des mécanismes internes du bassin versant. Elle constitue également un outil précieux pour anticiper les impacts du changement climatique et des activités anthropiques sur les régimes hydrologiques, et pour définir des politiques de gestion intégrée et durable des ressources en eau.

II.1 Situation géographique de la zone d'étude :

La zone d'étude se situe dans le grand bassin de la Macta, plus précisément dans la région de l'Oued Fekan, au nord-ouest de l'Algérie. Ce bassin versant couvre une superficie de 1 205 km² et présente un périmètre de 194,3 km (Figure II.1). Il est géographiquement localisé entre 35°10'0" et 35°30'0" de latitude Nord, et 0°0'0" et 0°20'0" de longitude Est.

Le bassin appartient à l'unité physiographique des Hauts Plateaux, située entre l'Atlas tellien au nord et l'Atlas saharien au sud. Il est drainé par un réseau hydrographique composé de petits affluents prenant naissance dans les zones d'altitude. Les eaux de ruissellement convergent vers l'Oued Fekan, principal cours d'eau de la région, alimentée par deux oueds majeurs : l'Oued Froha, qui draine la partie sud du bassin, et l'Oued Maoussa, qui collecte les eaux des sections nord et est. Ces deux oueds contribuent ensemble à l'alimentation hydrique de la plaine de Ghriss.

La zone est caractérisée par un relief contrasté, marqué par des collines et des chaînes montagneuses environnantes. Elle est délimitée au nord par les Monts de Beni-Chougrane, au sud par les Monts de Saïda, à l'ouest par les Monts de Bouhanifia, et à l'est par les Hauts Plateaux de Tighennif. Cette diversité topographique joue un rôle déterminant dans la dynamique hydrologique du bassin, influençant à la fois le régime des écoulements, l'érosion, et les modes d'occupation du sol.

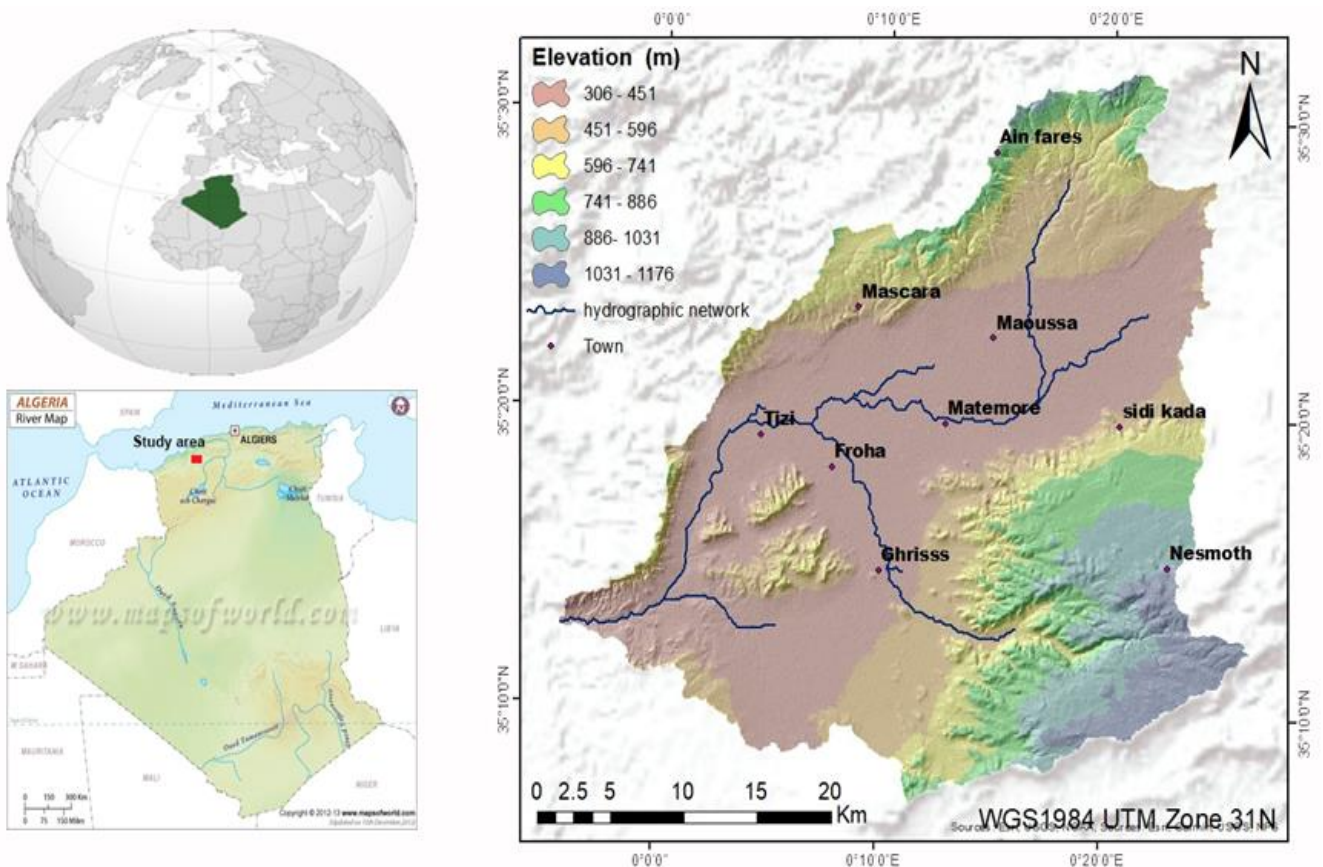


Figure II. 1 : localisation du bassin versant d'Oued Fekan

II.2 Étude morphométrique

II.2.1 Caractéristiques géométriques du bassin versant :

L'identification et l'analyse des caractéristiques morphométriques d'un bassin versant sont essentielles pour comprendre son comportement hydrologique. Ces paramètres influencent directement les processus d'écoulement, de ruissellement, de concentration des débits et, par conséquent, la forme et la réponse de l'hydrogramme.

II.2.1.1 Indice de compacité de GraveliusKc :

La forme d'un bassin versant, définie principalement par son contour, exerce une influence significative sur les modalités d'écoulement et la dynamique de concentration des eaux de ruissellement. Selon **Roche (1963)**, un bassin allongé présente une réponse hydrologique différente de celle d'un bassin compact, même si leurs autres caractéristiques sont identiques.

L'indice de compacité de **Gravelius** est couramment utilisé pour quantifier cette caractéristique. Il est défini comme le rapport entre le périmètre du bassin et la circonférence d'un cercle ayant la même superficie que celui-ci :

$$Kc = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (\text{II. 1})$$

Où :

Kc : indice de Gravelius (sans unité).

P : périmètre du bassin versant en Km

A :superficie du bassin en Km².

Pour le bassin versant de l'Oued Fekan, le coefficient de compacité est de **1,57**, ce qui indique une forme allongée. Cette configuration allongée suggère un développement linéaire du ruissellement et une réponse hydrologique plus étalée dans le temps. En effet, plus la valeur de Kcs'éloigne de l'unité, plus la forme du bassin s'éloigne du cercle, entraînant des temps de concentration plus longs et des hydrogrammes moins abrupts.

II.2.1.2 Rectangle équivalent :

Le concept de rectangle équivalent permet de modéliser le bassin versant comme un rectangle de superficie équivalente, afin d'évaluer l'influence de la forme sur l'écoulement. Cette représentation simplifiée facilite la comparaison entre bassins en réduisant la complexité géométrique à deux dimensions principales : la longueur (L) et la largeur (l) du rectangle équivalent.

Les longueurs sont déterminées selon les formules suivantes :

a) Longueur du rectangle équivalent (L) :

$$L = \frac{K_c \sqrt{A}}{1,12} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_c} \right)^2} \right) \quad (\text{II. 2})$$

b) Largeur du rectangle équivalent (l) :

$$l = \frac{K_c \sqrt{A}}{1,12} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_c} \right)^2} \right) \quad (\text{II. 3})$$

Avec :

K_c : indice de Gravelius (coefficient de compacité).

L : longueur du rectangle équivalent en (km).

l : largeur du rectangle équivalent en (km).

A : superficie du bassin en km^2

II.2.1.3 Coefficient d'allongement :

Le coefficient d'allongement est un autre indicateur utilisé pour évaluer la forme du bassin. Il est calculé à partir du rapport entre le carré du périmètre et la superficie :

$$K_p = \frac{P^2}{A} \quad (\text{II. 4})$$

Ce coefficient permet d'apprécier le degré de développement linéaire du bassin. Plus cette valeur est élevée, plus le bassin est allongé.

Les caractéristiques géométriques du bassin versant de l'Oued Fekan sont récapitulées dans le Tableau (II.1).

Tableau II. 1 : Caractéristiques géométriques du bassin versant d'Oued Fekan.

Bassin Versant	Superficie A(km^2)	Périmètre P (km)	K_c	Longueur L (km)	Largeur l (km)	Forme	Coefficient d'allongement
Oued Fekan	1205.11	194.29	1.57	82.5	14.6	Allongée	31.32

II.2.2 Etude de relief :

Le relief constitue un facteur fondamental dans l'analyse hydrologique d'un bassin versant. Il influence directement la dynamique des eaux de surface, notamment le ruissellement, l'infiltration, ainsi que les processus d'évaporation et d'érosion. En modifiant la vitesse des écoulements et le temps de concentration, la topographie joue un rôle déterminant dans la réponse hydrologique globale du bassin.

II.2.2.1 Courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique est un outil d'analyse morphologique permettant de caractériser la répartition altitudinale de la surface d'un bassin versant. Elle fournit une représentation graphique de la variation de l'aire cumulée du bassin en fonction de l'altitude. Concrètement, cette courbe permet de visualiser la proportion de la surface située au-dessus d'un certain niveau topographique.

- L'**axe des abscisses** représente les altitudes (en mètres).
- L'**axe des ordonnées** indique la surface cumulée (ou le pourcentage de la surface totale) située au-dessus de chaque altitude.

L'analyse de cette courbe permet :

- de caractériser la pente moyenne du bassin ;
- d'identifier les zones de forte ou de faible déclivité ;
- de mieux comprendre les mécanismes de ruissellement et de concentration des eaux.

Une répartition homogène des altitudes indique un relief régulier, alors qu'une courbe fortement concave ou convexe reflète des contrastes topographiques marqués.

Le Tableau (II.2) ci-après présente la répartition des tranches altitudinales en surface pour le bassin versant de l'Oued Fekan, donnée utilisée pour la construction de la courbe hypsométrique.

Tableau II. 2 : Répartition des tranches de surface en fonction de l'altitude du bassin versant d'Oued Fekan.

Altitude (m)	Ai (km ²)	Ai cumulée (km ²)	Ai (%)	%Ai cumulé
1176-1100	3.020	3.020	0.251	0.251
1100-1000	27.590	30.610	2.289	2.540
1000-900	55.820	86.430	4.632	7.172
900-800	65.660	152.090	5.448	12.620
800-700	128.290	280.380	10.646	23.266
700-600	149.420	429.800	12.399	35.665
600-500	347.860	777.660	28.865	64.530
500-400	422.990	1200.650	35.100	99.630
400-306	4.460	1205.110	0.370	100.000

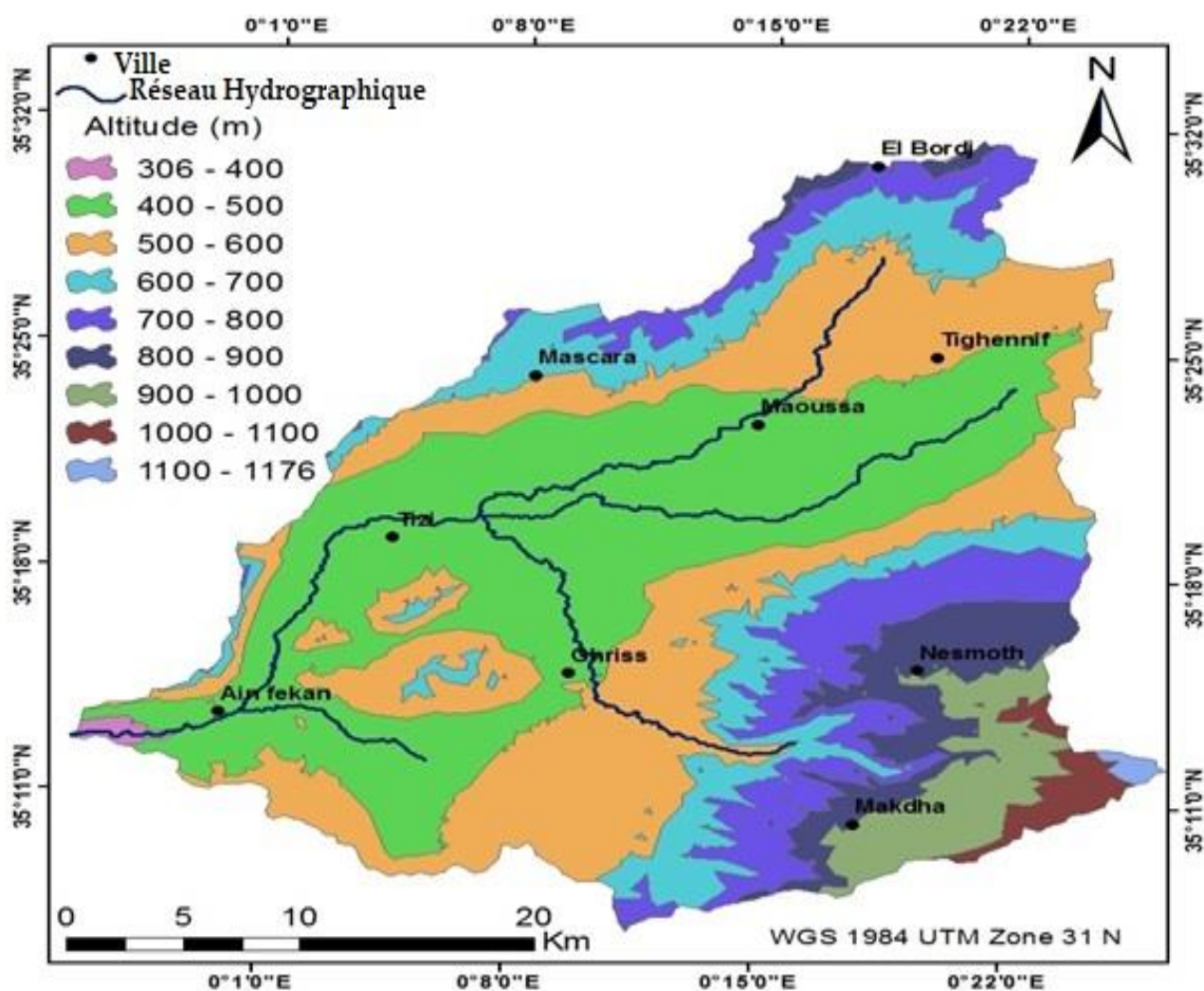


Figure II. 2 : Carte de la répartition altimétrique du bassin versant d'Oued Fekan

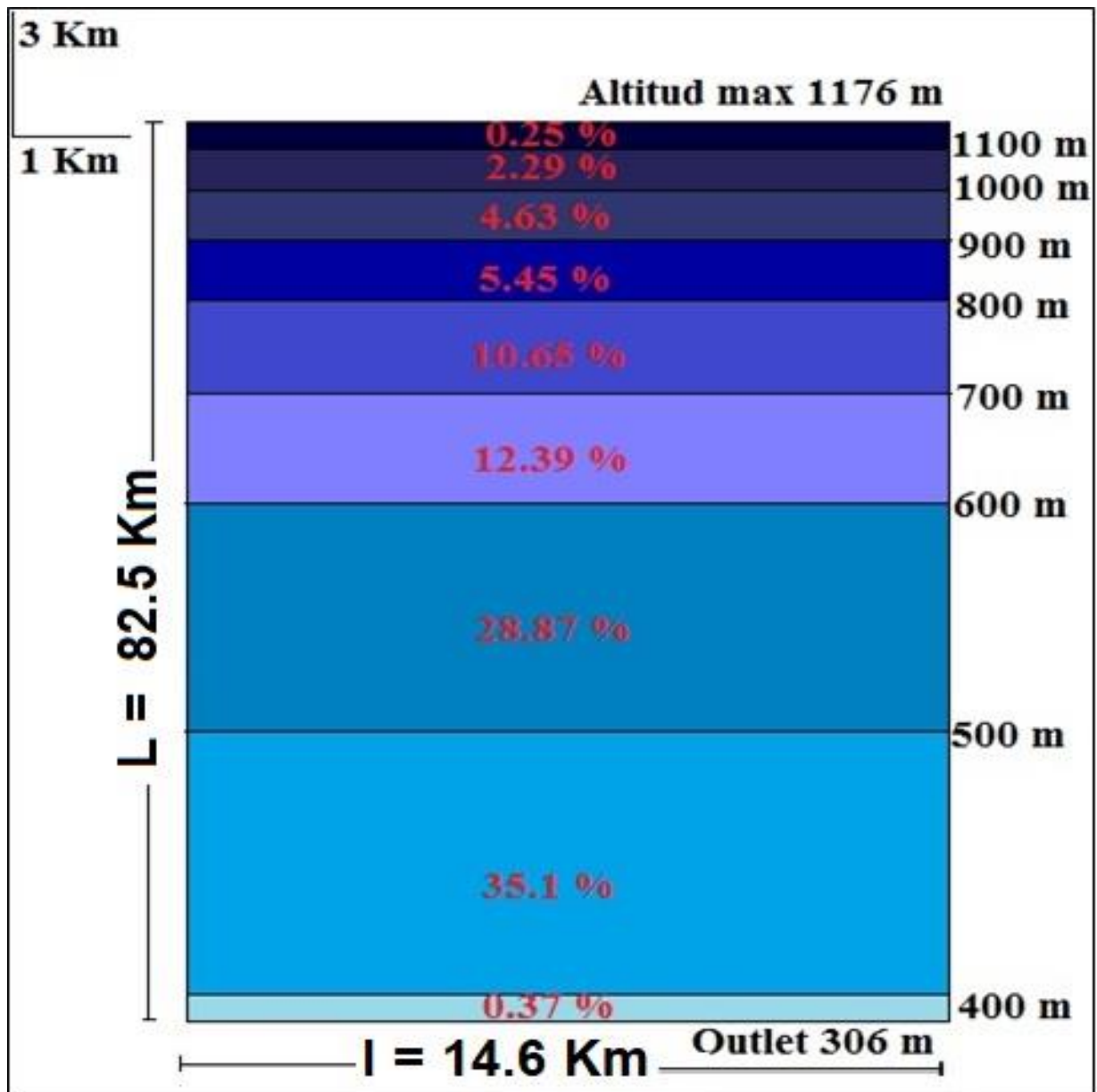


Figure II. 3 : Rectangle équivalent du bassin versant d'Oued Fekan

II.2.2.2 Courbe hypsométrique et diagramme des fréquences altimétriques

Le diagramme des fréquences altimétriques représente la distribution des surfaces par tranches d'altitude, exprimées en pourcentage par rapport à la surface totale. Ce diagramme (Figure II.5) permet de visualiser l'inégalité de répartition des altitudes sur le bassin et met en évidence les zones dominantes du relief.

À partir de la courbe hypsométrique et du rectangle équivalent, il est observé que la répartition de la surface en fonction de l'altitude est irrégulière, suggérant un relief contrasté.

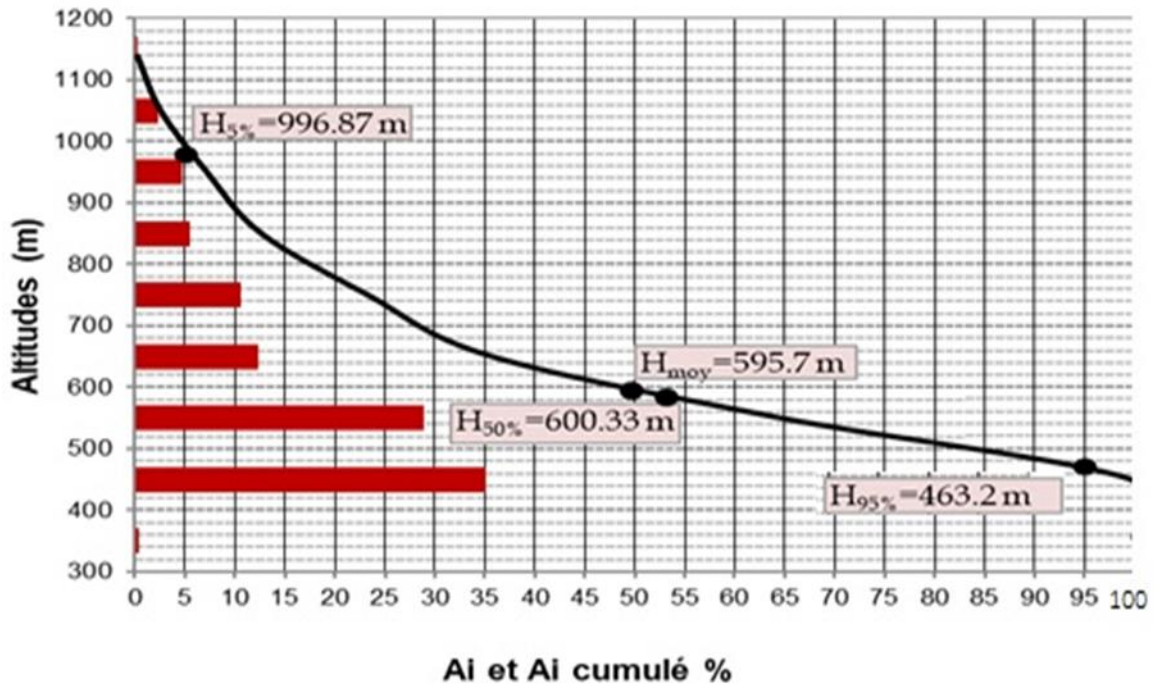


Figure II. 4 : La courbe hypsométrique et le diagramme des fréquences altimétriques

II.2.2.3 Altitudes caractéristiques

Les altitudes caractéristiques du bassin versant de l'Oued Fekan sont synthétisées dans le **Tableau II.4**. Elles permettent de quantifier la structure altitudinale du bassin :

- **Altitude maximale ($H_{\max}$)** : correspond au point le plus élevé du bassin.
→ $H_{\max} = 1176$ m
- **Altitude minimale ($H_{\min}$)** : correspond au point le plus bas du bassin.
→ $H_{\min} = 306$ m
- **Altitude moyenne (H_{moy})** : elle est calculée comme la moyenne pondérée des altitudes entre deux courbes de niveau, en tenant compte des surfaces correspondantes. Elle est obtenue par la formule suivante :

$$H_{\text{moy}} = \frac{\sum H_i \cdot A_i}{A} \quad (\text{II. 5})$$

Avec :

H_i : l'altitude moyenne entre deux courbes de niveaux (m).

A_i : la surface partielle comprise entre deux courbes de niveaux (km^2).

A : la surface totale du bassin versant en (km^2).

Les valeurs utilisées pour ce calcul sont présentées dans le **Tableau (II.3)** :

Tableau II.3 : Calcul de l'altitude moyenne du bassin versant d'Oued Fekan

Altitude (m)	Hi (m)	Ai (Km ²)	Hi*Ai
1176-1100	1138.000	3.020	3436.76
1100-1000	1050	27.590	28969.5
1000-900	950	55.820	53029
900-800	850	65.660	55811
800-700	750	128.290	96217.5
700-600	650	149.420	97123
600-500	550.000	347.860	191323
500-400	450.000	422.990	190345.5
400-306	353.000	4.460	1574.38

II.2.2.4 Altitudes caractéristiques issues de la courbe hypsométrique

À partir de la courbe hypsométrique (Figure II.5), on extrait également d'autres indicateurs altitudinaux essentiels :

- Altitude à 5 % ($H_5\%$) : altitude au-dessus de laquelle se trouvent 5 % de la surface totale du bassin.
- Altitude à 95 % ($H_{95\%}$) : altitude en dessous de laquelle se trouvent 5 % de la surface.
- Altitude médiane ($H_{50\%}$) : altitude correspondant à 50 % de la surface cumulée.
- Altitude la plus fréquente ($H_{fréq}$) :

Tableau II.4 : Altitudes caractéristiques du bassin versant d'Oued Fekan

Altitude	Valeurs(m)
Altitude maximale (H_{max})	1176
Altitude minimale (H_{min})	306
Altitude moyenne (H_{moy})	595.7
Altitude la plus fréquente ($H_{fréq}$)	450
Altitude à 5% ($H_{5\%}$)	996.87
Altitude médiane ($H_{50\%}$)	600.33
Altitude à 95% ($H_{95\%}$)	463.2

II.2.2.5 Indices de pente :

Les indices de pente sont des paramètres fondamentaux pour la caractérisation morphologique des bassins versants. En effet, la pente influence fortement les processus hydrologiques, notamment le ruissellement, l'infiltration, l'érosion et le temps de concentration. Ces indices permettent également la **classification comparative des bassins versants**. Ils sont généralement déterminés à partir de la répartition hypsométrique du bassin.

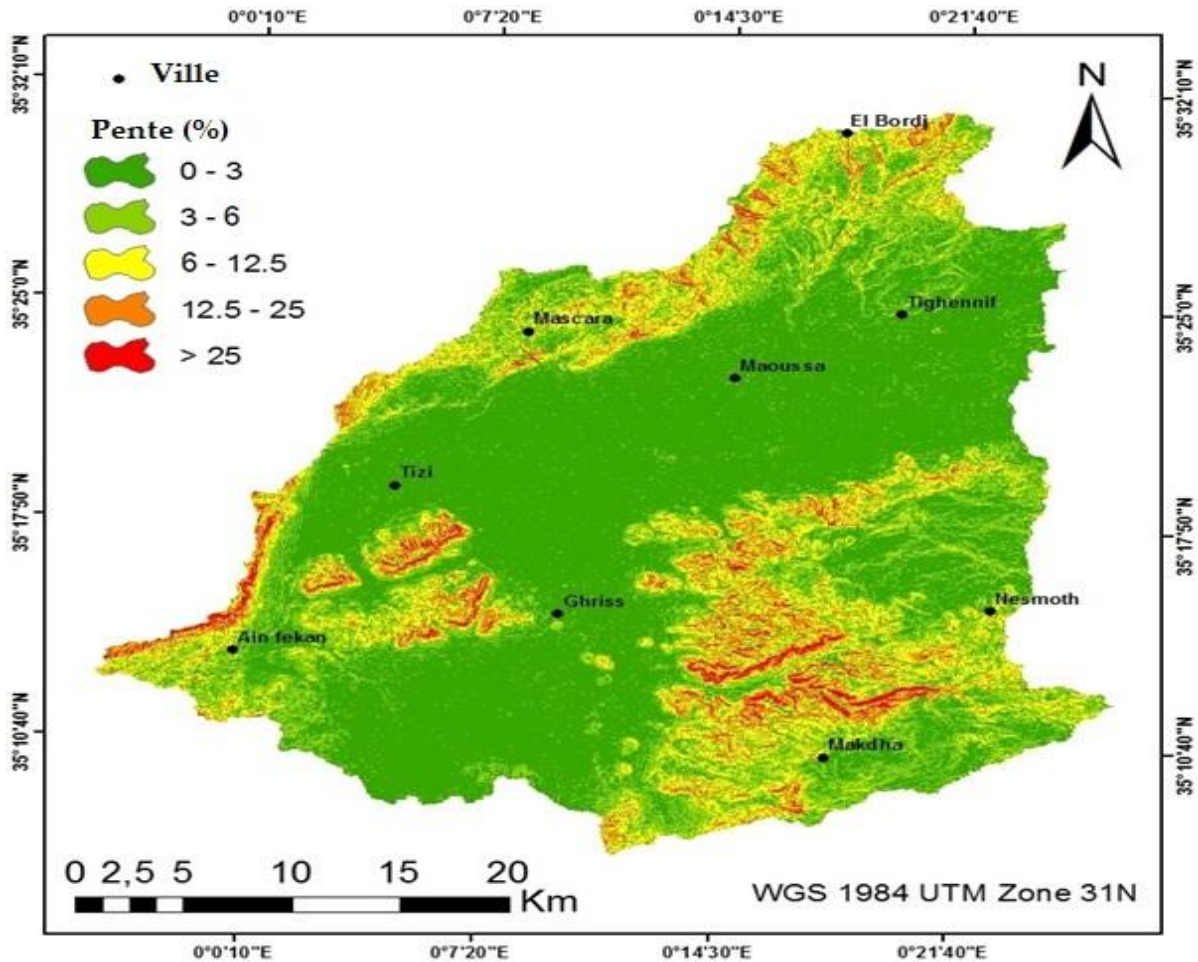


Figure II.5: Carte des pentes du bassin versant d'Oued Fekan

L'analyse morphométrique révèle que le bassin est largement dominé par des pentes à faible gradient (0 à 3 %), couvrant près de 55 % de la superficie totale. Cette configuration hydrogéomorphologique se traduit par un ralentissement significatif des processus de ruissellement de surface, un accroissement du temps de concentration des écoulements et une amélioration des conditions d'infiltration, favorisant ainsi la recharge potentielle des nappes souterraines.

a) Répartition des pentes

Le **Tableau II.5** présente la répartition des surfaces du bassin versant d'Oued Fekan selon les classes de pente.

Tableau II.5 : Répartition des pentes du bassin versant d'Oued Fekan

Pente (%)	Surface de la pente (Km ²)	Taux de recouvrement (%)
0 - 3	674.19	55.95
3 - 6	298.06	24.74
6 - 12.5	153.20	12.71
12.5 - 25	63.70	5.28
>25	15.96	1.32

Plus de 55 % de la surface du bassin présente des pentes faibles (0 à 3 %), traduisant une morphologie globalement plane qui limite l'intensité du ruissellement et crée des conditions propices à l'infiltration.

b) Indice de pente globale :

L'indice de pente globale permet de caractériser la pente moyenne d'un bassin versant et facilite ainsi les comparaisons et classifications entre différents bassins. Il est calculé à partir de la répartition hypsométrique du bassin, en prenant en compte les altitudes correspondant aux percentiles 5 % et 95 % de la courbe hypsométrique. Cet indice est exprimé par la relation suivante :

$$I_g = \frac{D}{L} \text{ (II. 6)}$$

$$D = H_{5\%} - H_{95\%} \text{ (II. 7)}$$

Avec :

I_g : est l'indice de pente global en (m/km)

D : est la dénivelée en (m).

L : étant la longueur du rectangle équivalent en (km).

$H_{5\%}$: l'abscisse à 5% dans la courbe hypsométrique en (m).

$H_{95\%}$: l'abscisse à 95% dans la courbe hypsométrique en (m).

c) Indice de pente moyenne :

L'indice de pente moyenne est un paramètre important qui fournit des informations sur la topographie générale du bassin versant. Il influence directement le temps de concentration des eaux et par conséquent le débit de pointe en cas d'averse. Une pente moyenne élevée favorise un ruissellement rapide, tandis qu'une pente plus douce induit une infiltration plus importante et un ruissellement plus lent.

Cet indice est calculé à partir de la différence d'altitude entre les points extrêmes du bassin et la longueur du rectangle équivalent, selon la formule suivante :

$$I_{moy} = \frac{D_{max}}{L} \quad (II.8)$$

$$D_{max} = H_{max} - H_{min} \quad (II.9)$$

Avec :

D_{max} : est la différence entre les niveaux extrêmes du bassin versant (m).

H_{max} : altitude maximal (m)

H_{min} : altitude minimal (m)

L : étant la longueur du rectangle équivalent (Km)

d) Indice de pente de Roche (Ip) :

L'indice de pente de Roche permet d'estimer la pente moyenne du bassin versant à partir de données réelles issues de la répartition altimétrique. Contrairement à l'indice de pente moyenne classique, cet indice intègre un facteur lié au ruissellement, ce qui en fait un paramètre plus représentatif des conditions de terrain.

Il est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_i^n \sqrt{A_i D_i} \quad (II.10)$$

Avec :

I_p : est l'indice de pente de Roche en %.

L : longueur de rectangle équivalent, égale à 82,5 (Km).

A_i : pourcentage des surfaces partielles (en %) comprise entre deux courbes de niveau.

Di : dénivelée entre deux courbes de niveau voisines (Km)

Tableau II. 6 : Données de calcul pour l'indice de Roche

Tranche d'altitude	Di=H _i -H _{i-1}	%Ai	%Di	%Ai.Di	$\sqrt{A_i \cdot D_i}$
1176-1100	76	3.02	0.076	0.229	0.47
1100-1000	100	27.59	0.100	2.759	1.66
1000-900	100	55.82	0.100	5.582	2.36
900-800	100	65.66	0.100	6.566	2.56
800-700	100	128.29	0.100	12.829	3.58
700-600	100	149.42	0.100	14.942	3.86
600-500	100	347.86	0.100	34.786	5.89
500-400	100	422.99	0.100	42.299	6.50
400-306	94	4.46	0.094	0.419	0.64

e) Dénivelée spécifique (DS) :

La dénivelée spécifique apparaît comme une correction de la dénivelée simple, obtenue par l'application d'un coefficient tenant compte de la forme du bassin versant. Elle permet ainsi d'effectuer des comparaisons entre différents bassins, indépendamment de leur superficie ou de leur morphologie.

$$D_s = I_g \cdot \sqrt{A} \quad (\text{II. 11})$$

Avec :

- I_g : indice de pente globale en (m/km).
- A : surface totale du bassin versant en km².

Tableau II. 7 : Classification du relief selon Ds par l'O.R.S.T.O.M

Type de relief	Valeur de Ds
Relief très faible	Ds < 10m
Relief faible	10 < Ds < 25m
Relief assez faible	25 < Ds < 50m
Relief modéré	50 < Ds < 100m
Relief assez fort	100 < Ds < 250m
Relief fort	250m < Ds < 500m
Relief très fort	500 < Ds

Dans le cas du bassin versant d'Oued Fekan, la **dénivelée spécifique** (Ds) est estimée à **224,44 m**. Selon la classification de l'O.R.S.T.O.M (Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer) présentée dans le tableau II.7, cette valeur indique que le bassin est caractérisé par un **relief assez fort**.

Les différents indices de pente calculés pour le bassin versant d'Oued Fekan sont récapitulés dans le tableau ci-dessous :

Tableau II. 8 : Indices de pente et type de relief du bassin d'Oued Fekan.

Bassin versant	Ig(m/km)	Ip (%)	Imoy (m/km)	Ds (m)	Relief selon Ds
Oued Fekan	6.47	0.303	3.03	224.44	Assez Fort

II.2.2.5 Caractérisation du réseau hydrographique :

Le **réseau hydrographique** désigne l'ensemble des cours d'eau (permanents ou temporaires) qui drainent les eaux issues des sources, des précipitations et du ruissellement généré par la topographie des versants. Il comprend le cours d'eau principal ainsi que ses affluents, également appelés tributaires.

Ce réseau est caractérisé par deux aspects principaux :

- **La hiérarchisation** des cours d'eau (ou ordre de Strahler)
- **Le développement** du réseau (longueur cumulée et nombre total de tronçons)

Pour quantifier la ramification du réseau, chaque segment de cours d'eau est numéroté selon son rang hiérarchique. Cette hiérarchisation, connue sous le nom d'ordre des cours d'eau, repose sur les lois définies par Horton (1945) et Schumm (1956). Elle permet d'identifier les tronçons de même ordre, de compter leur nombre et de mesurer leur longueur respective.

Afin de caractériser la forme et la structure du réseau hydrographique, plusieurs indices sont utilisés :

- **La densité de drainage** (Dd)
- **La fréquence des cours d'eau** (Fc)
- **Le rapport de confluence** (Rc)
- **Le rapport de longueur** (Rl)

- Le temps de concentration (T_c)
- Le coefficient de torrentialité (C_t)

Ces paramètres offrent une description quantitative du réseau et permettent d'établir des comparaisons entre différents bassins versants.

Tableau II.9 : Classification des talwegs du bassin versant d'Oued Fekan

Ordre	Nombre	Longueur (Km)	Longueur moyenne
1	397	721.22	1.82
2	195	363.20	1.86
3	92	115.06	1.25
4	68	97.2	1.43
5	39	29.06	0.75
Totale	791	1325.74	7.11

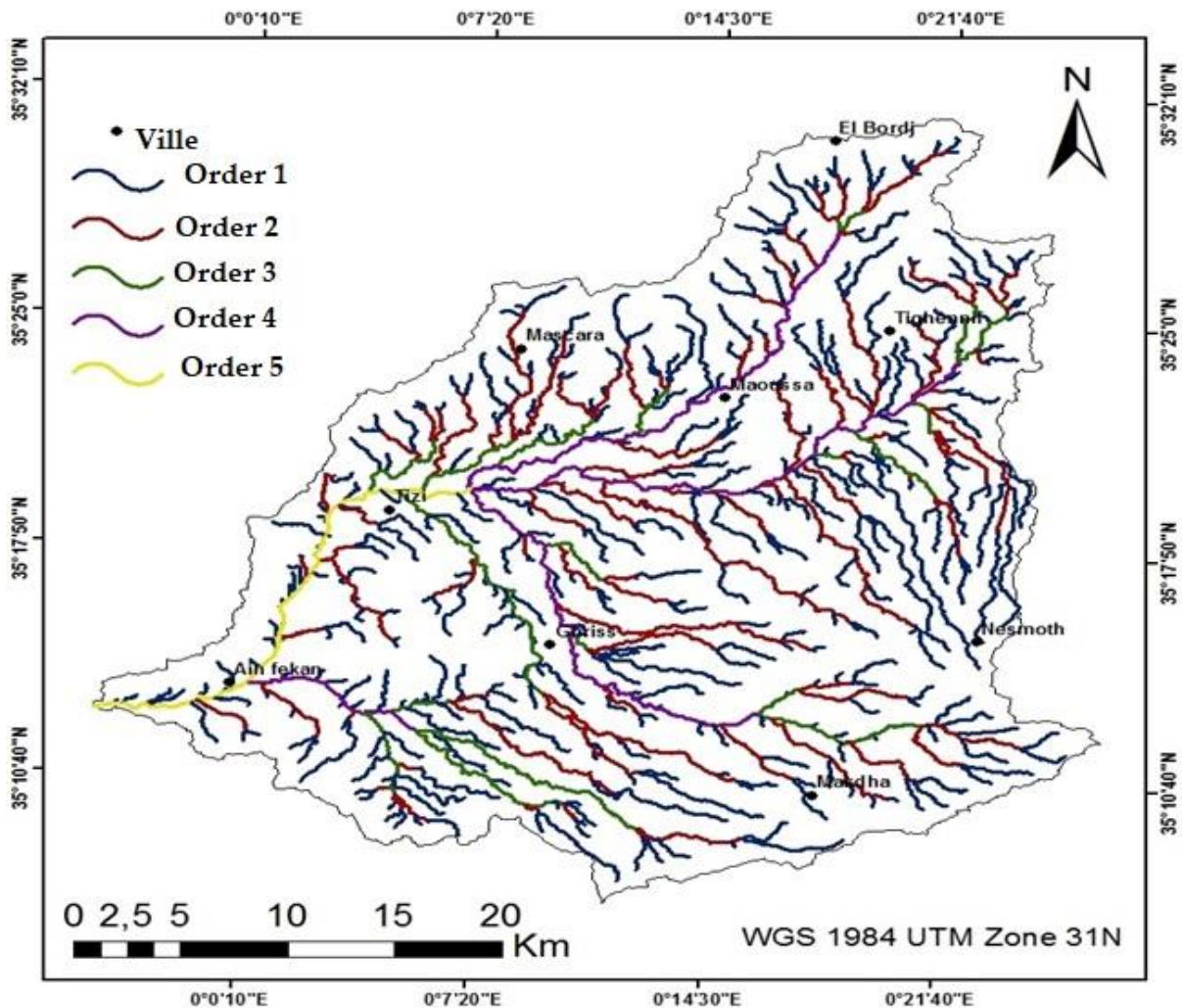


Figure II. 6 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant d'Oued Fekan.

II.2.2.5.1 Pente moyenne du cours d'eau principal :

La pente moyenne du cours d'eau principal détermine la vitesse à laquelle l'eau s'écoule vers l'exutoire du bassin, influençant ainsi le **temps de concentration**. Elle joue également un rôle

important dans la détermination du débit maximal observé. Une pente abrupte favorise et accélère l'écoulement de surface, tandis qu'une pente douce ou nulle permet à l'eau de s'infiltrer partiellement ou totalement dans le sol.

Le calcul des pentes moyennes et partielles des cours d'eau s'effectue à partir du profil longitudinal du cours d'eau principal et de ses affluents. La méthode la plus couramment utilisée pour déterminer la pente longitudinale consiste à diviser la différence d'altitude entre deux points éloignés du cours d'eau par sa longueur totale :

$$P_{\text{moy}} = \frac{\Delta H_{\text{max}}}{L_{\text{cp}}} \quad (\text{II. 12})$$

Avec :

P_{moy} :Pente moyenne du cours d'eau (m/km)

ΔH_{max} :Dénivelé maximal (en m), correspondant à la différence d'altitude entre le point le plus haut et l'exutoire du bassin :

$$\Delta H_{\text{max}} = H_{\text{max}} - H_{\text{min}} \quad (\text{II. 13})$$

L_{cp} : Longueur du cours d'eau principal (km).

II.2.2.5.2 Densité de drainage (Dd) :

La densité de drainage, introduite par Horton (1945), est définie comme le rapport entre la longueur totale du réseau hydrographique et la superficie du bassin versant. Sa détermination nécessite d'adopter certaines conventions sur la définition des chenaux de drainage, incluant :

- Les talwegs nettement marqués et empruntés par des écoulements temporaires (rivières non pérennes) ;
- Ou les ruisseaux permanents dans les grands bassins versants.

$$D_d = \frac{\sum L_c}{A} \quad (\text{II. 14})$$

Avec :

D_d : la densité de drainage (en km/km²).

$\sum L_c$: la longueur cumulée de tous les talwegs du bassin en km

A : superficie du bassin (en km²).

II.2.2.5.3 Constante de stabilité du cours d'eau

La constante de stabilité du réseau hydrographique est définie comme l'inverse de la densité de drainage :

$$C = \frac{1}{D_d} \quad (\text{II. 15})$$

Avec :

C : constante de stabilité du cours d'eau.

D_d : densité de drainage.

Tableau II. 10 : Pente moyenne, densité de drainage et constante de stabilité

Bassin Versant	P_{moy} (m/km)	P_{moy} (%)	D_d (Km/Km ²)	C
Oued Fekan	10.54	1.053	1.1	0.91

La densité de drainage (1,1 km/km²) reflète un niveau de développement modéré du réseau hydrographique par unité de surface. Cette valeur intermédiaire traduit plusieurs caractéristiques du bassin :

- Un réseau hydrographique moyennement ramifié, typique de milieux à perméabilité modérée, où le substrat n'est ni trop imperméable (ce qui favoriserait un ruissellement intense), ni trop perméable (ce qui réduirait le développement du réseau de surface).
- Une capacité satisfaisante de collecte des eaux pluviales, indiquant un équilibre hydrologique entre les processus de ruissellement et d'infiltration.

Le rapport de confluence (R_c) :

Le Rapport de confluence est le quotient du nombre des cours d'eau d'ordre (n) par celui des cours d'eau d'ordre supérieur (n + 1), soit :

$$R_c = \frac{N_n}{N_{n+1}} \quad (\text{II. 16})$$

Avec :

R_c : Rapport de confluence.

N_n : Nombre de cours d'eau d'ordre n.

N_{n+1} : Nombre de cours d'eau d'ordre n + 1.

Le rapport des longueurs (R_l) :

Le rapport des longueurs de thalwegs d'ordre (n+1) par celle d'ordre (n) est estimé par la formule :

$$R_l = \frac{l_{n+1}}{l_n} \quad (\text{II.17})$$

Avec :

R_l : Rapport de longueur.

l_{n+1} : Longueur moyenne des cours d'eau d'ordre (n + 1).

l_n : Longueur moyenne des cours d'eau d'ordre n.

Dans un bassin versant homogène, les rapports R_c et R_l tendent à être constants (Laborde, 2006).

$$R_c = \frac{N_n}{N_{n+1}} \approx Cte \quad ; \quad R_l = \frac{l_{n+1}}{l_n} \approx Cte$$

Tableau II. 11 :Rapport de confluence et rapport de longueur

Ordre	Nombre	Longueur	Longueur moyenne (Km)	R_c	R_l
1	397	721.22	1.82	/	1.02
2	195	363.2	1.86	2.03	0.67
3	92	115.06	1.25	2.12	1.14
4	68	97.2	1.43	1.35	0.52
5	39	29.06	0.75	1.74	/
Total	791	1325.74	7.104	1.81	0.84

D'après le tableau (II.11), l'analyse des rapports de confluence R_c et de longueur R_l met en évidence plusieurs caractéristiques importantes de l'organisation du réseau hydrographique du bassin :

- Le rapport de confluence moyen $R_c=1,81$ se rapproche de la valeur théorique moyenne d'un réseau bien structuré. En général, un R_c de l'ordre de 2 est caractéristique d'un réseau bien ramifié et organisé, traduisant une efficacité hydrologique dans la concentration et

l'acheminement rapide des eaux vers l'exutoire. La valeur obtenue indique donc un réseau modérément hiérarchisé, avec une structuration relativement équilibrée du système de drainage.

- Un rapport de confluence élevé est souvent associé à un comportement torrentiel, avec des affluents nombreux et bien hiérarchisés qui déversent rapidement leurs eaux dans le cours principal, ce qui peut favoriser des temps de concentration plus courts et des pics de crue plus marqués.
- Le rapport de longueur moyen $Rl=0,84$ indique une progression modérée mais régulière de la longueur des cours d'eau entre les différents ordres. Des valeurs proches de 1 suggèrent une croissance équilibrée du réseau, sans ruptures majeures dans l'allongement des segments.

La fréquence des thalwegs élémentaires :

La fréquence des thalwegs élémentaires correspond au nombre de cours d'eau par unité de surface du bassin :

$$F = \frac{\sum N_i}{A} \quad (\text{II.18})$$

Avec :

F : densité hydrographique (km^{-2}).

$\sum N_i$: la somme de nombre des cours d'eau.

A : superficie du bassin (km^2).

Ainsi, la fréquence des cours d'eau pour le bassin étudié est de **0.65 thalweg/ km^2** .

Coefficient de torrentialité :

Le coefficient de torrentialité est un indicateur combinant la fréquence des thalwegs élémentaires et la densité de drainage. Il permet d'évaluer le caractère torrentiel du bassin versant.

$$C_t = F \cdot D_d \quad (\text{II. 19})$$

Avec :

F : fréquence des thalwegs élémentaires (km^{-2})

D_d : densité de drainage ($\text{km} \cdot \text{km}^{-2}$).

Dans le cas du bassin versant de l'Oued Fekan, le coefficient de torrentialité est de $0.36 \text{ km} \cdot \text{km}^{-2}$. Cette valeur modérée indique un comportement hydrologique intermédiaire, avec une tendance modérée au ruissellement de type torrentiel.

Le coefficient d'allongement :

Le coefficient d'allongement (E) permet de caractériser la forme du bassin versant. Il est donné par la relation :

$$E = \frac{2}{L_0} \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (\text{II.20})$$

Avec :

A : surface totale du bassin versant.

L_0 : longueur moyenne caractéristique, donnée par :

$$L_0 = \frac{\sqrt{L_n}}{N} \quad (\text{II.21})$$

où :

L_n : longueur totale des cours d'eau

N: nombre total de cours d'eau

Pour le bassin versant de l'Oued Fekan, le coefficient d'allongement est estimé à : **E=5.51**

Cette valeur élevée indique que le bassin présente une forme très allongée, ce qui implique généralement un temps de réponse hydrologique plus long, et donc un risque moindre de crues rapides.

Le temps de concentration :

Le **temps de concentration** est le temps mis par une particule d'eau pour atteindre l'exutoire depuis le point le plus éloigné du bassin. Il a été estimé à l'aide de trois formules empiriques :

a) Formule de GIANDOTTI (Sud Italie, 1937)

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}} \quad (\text{II.22})$$

T_c : temps de concentration (heures)

A : superficie du bassin versant (km²)

L : longueur du thalweg principal (km)

H_{moy}, H_{min} : altitude moyenne et minimale (m)

$$T_c = 19.28 \approx 20 \quad \text{Heures}$$

b) Formule d'Izzard-Meunier

$$T_c = \beta \frac{A^{0.312}}{I^{0.325}} \quad (\text{II. 23})$$

T_c : temps de concentration (minutes).

A : surface du bassin versant (Km^2).

β : coefficient de Meunier (= 331 pour un bassin versant végétaliser ; $\beta = 145$ lorsque le bassin versant est dégradé).

I : pente moyenne le long du thalweg en %

$$T_c = 21.75 \approx 22 \quad \text{Heures}$$

c) Formule de KIRPICH (zones arides / semi-arides) :

$$T_c = 0.6615 \cdot L^{0.77} I_g^{0.385} \quad (\text{II. 24})$$

Avec

L : longueur du bassin versant (km)

I_g : pente globale (%)

$$T_c = 20.15 \approx 21 \quad \text{Heures}$$

Les valeurs obtenues varient entre **19.28 h** et **21.75 h**, avec une valeur moyenne adoptée de **20.39 h**. Ce temps élevé traduit :

- une faible vitesse d'écoulement,
- une pente moyenne modérée,
- une forme allongée du bassin,
- et une topographie s'aplanissant vers l'exutoire.

Vitesse de ruissellement :

La vitesse de ruissellement (V_r) est le quotient de la longueur du cours d'eau principal par le temps de concentration :

$$V_r = \frac{L_{cp}}{T_c} \quad (\text{II. 25})$$

Avec :

L_{cp} : longueur du thalweg principal (Km)

T_c : temps de concentration (h)

La vitesse de ruissellement du bassin versant d'Oued Fekan est estimée à 3,85 km/h. Cette vitesse modérée traduit un écoulement relativement lent, cohérent avec la faible pente moyenne du bassin, ce qui peut favoriser une infiltration plus importante.

Tableau II.12 : Tableau récapitulatif des principales caractéristiques morphométriques et hydrographiques du bassin versant de l'Oued Fekan

Caractéristiques		Unité	Bassin Versant d'Oued Fekan
Superficie		Km ²	1205.11
Périmètre		Km	194.29
Indice de compacité		-	1.57
Longueur du rectangle équivalent		Km	82.5
Largeur du rectangle équivalent		Km	14.6
Altitude	Altitude maximale	M	1176
	Altitude minimale	M	306
	Altitude moyenne	M	595.7
	Altitude médiane	M	600.33
	Altitude fréquente	M	450
	$H_{5\%}$	M	996.87
	$H_{95\%}$	M	463.2
Indice de pente globale I_g		m/km	6.47
Indice de pente de Roche I_p		-	3.03
Indice de pente moyenne I_{moy}		m/km	10.54
Dénivelée spécifique D_s		M	224.44
Pente moyenne du cours d'eau		M/Km	10.54
Densité de drainage D_d		Km/Km ²	1.1
Rapport de confluence R_c		-	1.81
Rapport de longueur R_l		-	0.84
Temps de concentration		Heure	20.39
Vitesse de ruissellement		Km/h	3.85

II.3 Occupation du sol

La carte du couvert végétal et de l'occupation du sol, extraite de l'Agence Nationale des Barrages (2004), fournit une représentation précise des caractéristiques locales du bassin versant de la Macta. Elle constitue une base fiable pour l'analyse de l'occupation du sol dans le bassin.

Dans le bassin versant de l'Oued Fekan, l'activité agricole est en progression, portée par un potentiel important avec environ 116 231 hectares de terres cultivables (DPAT, 2016). Cette dynamique agricole, bien que bénéfique sur le plan économique, influence significativement les processus hydrologiques, notamment à travers l'altération du couvert végétal et l'augmentation du ruissellement et de l'érosion.

Les zones forestières, localisées principalement au sud-est vers Nesmoth, sont constituées de formations de chênes et de pins d'Alep. Toutefois, ces espaces sont menacés par la pression anthropique, les incendies et le surpâturage, entraînant une dégradation de leur densité et de leur capacité de protection des sols.

L'urbanisation, concentrée autour des communes et des hameaux, modifie le cycle hydrologique naturel. L'imperméabilisation des sols liée aux constructions et aux infrastructures routières favorise le ruissellement au détriment de l'infiltration, perturbant ainsi l'équilibre hydrique du bassin.

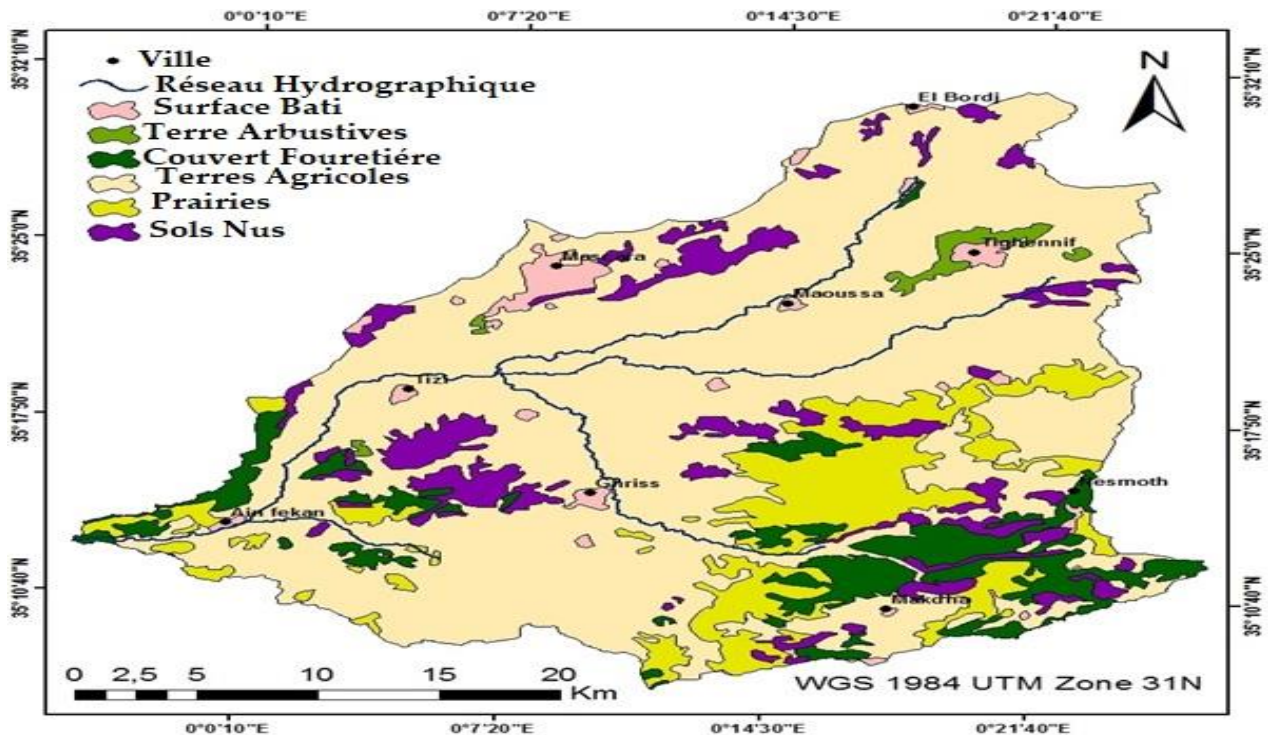


Figure II.7 : Carte du couvert végétal et occupation du sol dans le bassin versant d'Oued Fekan (ANBT.2004)

II.4 Contexte géologique et structural

La géologie joue un rôle fondamental dans l'organisation du paysage et l'occupation des sols. L'analyse géologique du bassin versant d'Oued Fekan repose sur des données issues de cartes régionales (BETIER et al., 1951 ; ANBT, 2004) et d'études plus détaillées, notamment celles de Sourisseau (1972) sur la plaine de Ghriss.

II.4.1 Configuration générale du bassin

Le bassin est centré sur la plaine de Ghriss, une dépression d'effondrement comblée par des sédiments alluvionnaires argilo-sableux. Cette plaine est bordée par plusieurs unités géologiques :

- **Au nord et à l'ouest**, les Monts des Beni-Chougrane, à structure plissée, sont constitués de formations crétacées et tertiaires.
- **Au sud**, les Monts de Saïda, de nature calcaréo-dolomitique (Jurassique), présentent une tectonique cassante avec des failles majeures, favorisant l'émergence de sources comme à Aïn Fekan.
- **À l'est**, des formations marneuses et argileuses (Oligo-Miocène) forment une barrière imperméable séparant le bassin de celui de l'Oued Mina.
- **Au centre**, la cuvette est une zone de subsidence active, alimentée par les apports alluviaux de l'Oued Maoussa, avec un remplissage sédimentaire néogène dominant (Miocène et Pliocène).

II.4.2 Nature des formations superficielles (ANBT, 2004)

L'occupation géologique superficielle du bassin se répartit ainsi :

II.4.2.1 Dépôts meubles à texture moyenne (Quaternaire) :

La majorité de la surface du bassin versant, soit 40,5 %, est constituée de dépôts meubles à texture moyenne. Ces formations quaternaires, essentiellement alluviales, présentent une porosité et une perméabilité modérées, ce qui influence favorablement le drainage, l'absorption de l'eau et la stabilité des sols dans la plaine de Ghriss.

II.4.2.2 Brèches et conglomérats (Pliocène continental) :

Occupant 17,4 % de la superficie autour de la plaine de Ghriss, ces formations sont d'origine continentale (Pliocène). Elles sont constituées de matériaux gris et calcaires, caractérisés par deux faciès : l'un calcaire-marneux, l'autre composé de grès et de conglomérats.

II.4.2.3 Roches sédimentaires (Miocène supérieur) :

Les roches sédimentaires couvrent 16,48 % de la région nord du bassin versant. Il s'agit principalement de formations du Miocène supérieur, composées d'argiles sableuses.

II.4.2.4 Calcaires (Jurassique supérieur) :

Les formations calcaires représentent 14,2 % de la superficie du sud-est du bassin versant, notamment dans les zones de Nesmoth et des Monts de Saïda. Il s'agit de calcaires dolomitiques du Jurassique supérieur, formés en grande partie à partir de matériaux du Jurassique moyen et supérieur, ainsi que du Crétacé inférieur et moyen.

II.4.2.5 Marnes (Crétacé inférieur) :

Les marnes couvrent 11,42 % du bassin versant d'Oued Fekan. Ces formations du Crétacé inférieur, composées de calcaire gréseux, sont constituées de particules fines de calcaire, souvent associées à du sable ou d'autres éléments. Leur teinte varie généralement du gris au vert, brun ou jaune selon la composition minéralogique.

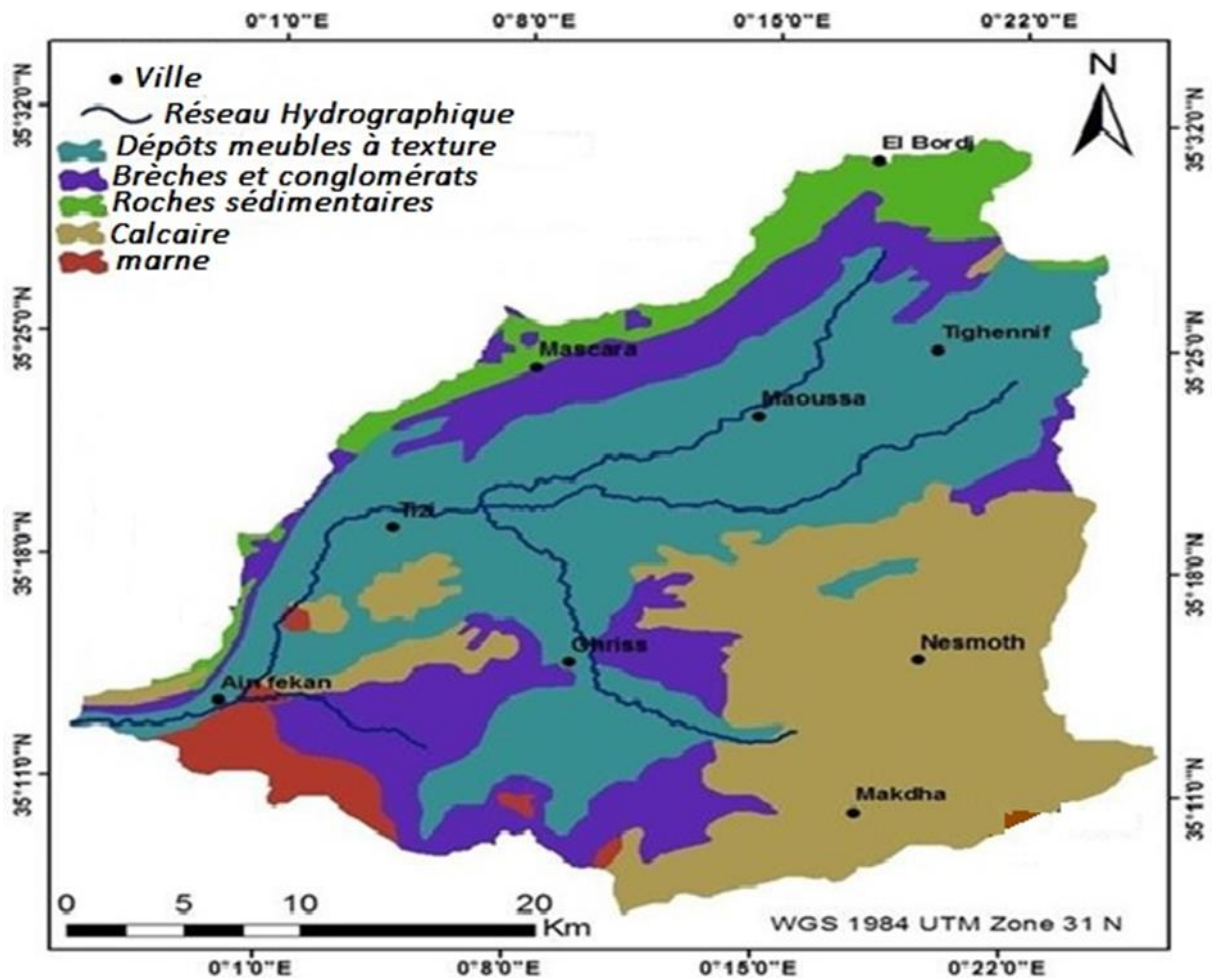


Figure II.8 : La carte Lithologie du Bassin Versant d'Oued Fekan (ANBT 2004).

II.4.3 Litho stratigraphie des formations

La série stratigraphique caractérisant les formations de la plaine de Ghriss (Figure III.9), d'après Sourisseau (1972), se développe de la base vers le sommet comme suit :

II.4.3.1 Le Secondaire

a) Le Trias

Présent dans les monts de Beni-Chougrane, à la base des nappes du Crétacé et dans la vallée de l'Oued Taria, le Trias est toujours gypseux, parfois salifère. Il est accompagné de roches vertes (ophites et gabbros), de dolomies et de marnes bariolées.

b) Callovo-Oxfordien

Affleurant au sud du bassin, dans la vallée de l'Oued Taria, cette formation se compose de bancs gréseux peu épais alternant avec des séries épaisses d'argiles et de marnes jaunes et vertes. Son épaisseur est estimée à environ 250 m.

c) Lusitanien

Visible dans le sud des monts de Sidi Kada et observé en sondage dans la plaine, il s'agit d'une alternance de bancs gréseux et dolomitiques, avec des passages argilo-marneux. L'épaisseur atteint environ 150 m.

d) Jurassique supérieur

Composé du Kimméridgien supérieur et du Purbeckien, il affleure largement sur la bordure sud de la plaine et constitue le substratum effondré. Il est formé de calcaires gris à pâte fine riches en nérinées et polypiers, suivis de calcaires dolomitiques. Des marnes noires intercalées freinent l'infiltration de l'eau. L'épaisseur dépasse 350 m.

e) Crétacé inférieur

Attribué à l'Hauterivien, il affleure à l'ouest du Djebel Enfouss et dans le sud-ouest de la plaine du Guerdjoum. Il comprend des calcaires gréseux qui deviennent plus argileux en profondeur, ainsi que des grès fins argileux (Benadla, 2023).

II.4.3.2 Le Tertiaire

a) Éocène

Affleurant à l'ouest de la plaine, cette formation est constituée de bancs grésocalcaires alternant avec des couches argilo-marneuses.

b) Oligocène

Présent à Beni-Chougrane et à l'est de Tighennif, il présente des faciès similaires à ceux de l'Éocène, avec à la base un conglomérat polygénique.

c) Miocène

Affleurant dans les monts de Beni-Chougrane, le Miocène est représenté par un ensemble épais dominé par des marnes vertes riches en faune fossile. la série marine miocène est relayée par une formation continentale argilo-sableuse rouge, dite de Bou Hanifia. Au sommet apparaissent des sables fins argileux et des calcaires récifaux massifs (Benadla, 2023).

d) Pliocène

Présent dans les monts des Beni-Chougrane et sous la plaine, il débute avec des grès marins transgressifs (Astien), suivis de sables dunaires jaunes et gris. L'épaisseur varie entre 40 et 100 m. En bordure, des calcaires lacustres blancs, localement érodés, affleurent. Là où ces calcaires sont absents, ils sont remplacés par des conglomérats et des argiles rouges résultant de l'érosion de formations calcaires (Sourisseau, 1972).

II.4.3.3 Le Quaternaire

a) Quaternaire moyen

Des argiles rouges détritiques couvrent la bordure ouest et nord de la plaine, recouvrant les formations de calcaires lacustres. Une terrasse alluviale, composée de sables fins et de graviers décimétriques, s'est formée entre Maoussa et Tighennif (Benadla, 2023).

b) Quaternaire actuel

Les formations superficielles sont constituées de sables limoneux et argileux d'une épaisseur maximale de 6 m. Ces dépôts sont influencés par la nature de la roche mère et les conditions de transport. Ils forment le principal support agricole de la région.

II.4.3.4 Tectonique

Le bassin de Ghriss n'est pas marqué par une tectonique majeure en surface (absence d'affleurements triasiques). Les principales structures tectoniques sont des failles d'effondrement affectant le substratum jurassique, encore actives aujourd'hui. Certaines de ces failles sont à l'origine de sources, comme celle d'Ain Fekan (Sourisseau, 1972).

Le Néogène est affecté par une tectonique récente, notamment sur la bordure sud des Beni-Chougrane. Plus au sud, dans les monts de Saïda, une tectonique cassante a donné lieu à des horsts, comme ceux du Djebel Enfouss et de Ben Rhadou. Le massif calcaro-dolomitique des monts de Sidi Kada présente des failles orientées selon deux directions principales, en relation avec la proximité de la môle granitique de Tiffrit.

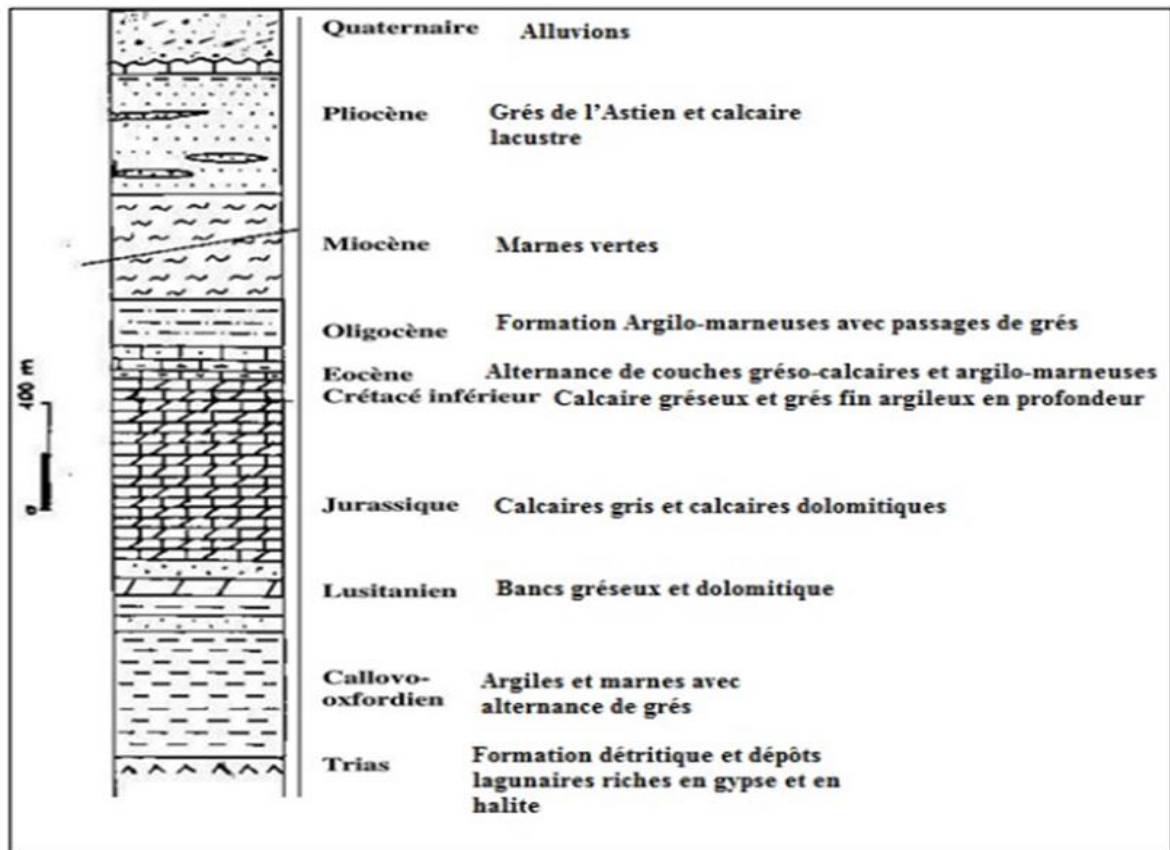


Figure II. 9 : Litho stratigraphie des formations du bassin d'Oued Fekan (Sourisseau B.1972)

II.5 Hydrogéologie :

II.5.1 Aquifères de la région :

Le bassin versant de l'Oued Fekan constitue une entité hydrogéologique indépendante. Il est formé par une superposition de couches perméables aquifères, séparées par des formations imperméables qui assurent la rétention ou la mise en charge des nappes. Les différentes études menées dans la région ont permis d'identifier trois principaux aquifères :

II.5.1.1 Aquifère des alluvions plio-quaternaires :

Cet aquifère, de type libre et superficiel, est alimenté par l'infiltration des eaux de pluie à travers son impluvium qui couvre l'ensemble de la plaine. Il est constitué d'alluvions issues de la désagrégation des grès, de sables, ainsi que de l'altération des formations sous-jacentes (calcaires lacustres et dolomitiques). Il est géologiquement limité par les bordures de la plaine.

Le mur de cette nappe est constitué par les marnes bleues du Miocène, tandis que le toit correspond à la surface libre de la nappe. Son exutoire principal se situait autrefois à la source d'Ain Fekan, actuellement tarie sous l'effet de l'épaississement des dépôts argileux.

Le taux d'infiltration est estimé à environ 20 % des précipitations sur la plaine. Le niveau de la nappe varie entre -6 m et -80 m par rapport au sol (Sourisseau, 1972).

Les valeurs de transmissivité pour cet aquifère sont comprises entre 5×10^{-5} et 10^{-2} m²/s. La zone de Guerdjoum (Sud-Ouest de Ghriss) présente les plus faibles perméabilités avec une transmissivité moyenne de 10^{-5} m²/s. Ces valeurs sont issues d'essais de pompage réalisés sur une cinquantaine de puits agricoles à travers la région.

Le coefficient d'emmagasinement varie de 0,1 à 0,25, traduisant une porosité élevée de cet aquifère plio-quatenaire (Bekkoussa, 2020).

II.5.1.2 Aquifère des calcaires et grès du Pliocène

a) Nappe des calcaires lacustres

Cette nappe est libre dans les bordures des monts de Beni-Chougrane et captive sous la plaine, particulièrement dans sa moitié occidentale. L'aquifère est constitué d'une formation hétérogène de large extension. Son impluvium se situe dans les monts de Beni-Chougrane (bordures nord et ouest), avec un apport complémentaire en provenance des grès astiens du plateau de Mascara.

L'écoulement souterrain est modéré, du fait de la baisse de transmissivité vers le sud. Le seul exutoire identifié est la source d'Aïn Tizi, dont le débit reste faible.

Le niveau piézométrique dans cette nappe varie de -23 m à -50 m par rapport au sol (Benadela, 2023).

b) Nappe des grès de l'Astien

Cette nappe, captive, est localisée au nord de la plaine. Elle est alimentée par les affleurements gréseux de la région de Khalouia. Vers le sud, cette nappe devient captive sous les calcaires lacustres à faciès marneux. L'aquifère constitué de grès et de calcaires lacustres s'amincit progressivement sous la plaine et disparaît plus au sud.

Le niveau de la nappe astienne varie entre -6 m et -23 m par rapport au sol (Benadela, 2023).

Les essais de pompage effectués sur les forages captant cette formation ont permis d'estimer une transmissivité comprise entre 5×10^{-5} et 3×10^{-3} m²/s, et un coefficient d'emmagasinement de l'ordre de 0,005 (Sourisseau, 1972).

II.5.1.3 Aquifère des calcaires dolomitiques du Jurassique

Cet aquifère, de type karstique, est relativement évolué. Les formations calcaires et dolomitiques du Jurassique affleurent dans les monts de Saïda ainsi que dans les djebels Enfous et Bourhaddou. L'écoulement s'effectue principalement à travers un réseau karstique souterrain se prolongeant sous la plaine, en direction de la source d'Aïn Fekan, où l'eau jaillit au contact d'une faille bordant les terrains imperméables du Crétacé.

L'aquifère est également drainé par des dépôts de galets et de conglomérats de piémont. Son mur est constitué de roches calciro-dolomitiques compactes non fissurées, tandis que son toit est formé par des marnes miocènes ou des argiles rouges détritiques.

La profondeur de la nappe varie entre -4 m et -120 m sous la surface du sol. Les valeurs de transmissivité, estimées par essais de pompage, se situent entre 10^{-4} et 10^{-2} m²/s. Le coefficient d'emmagasinement est de l'ordre de 0,003 (Sourisseau, 1972).

La nappe jurassique se divise en deux compartiments hydrauliques distincts, séparés par un graben orienté nord-sud :

Compartiment oriental : alimenté par les affleurements des monts de Saïda. Les eaux infiltrées rejoignent les dolomies et s'écoulent vers le nord. Plus en aval, une couche de marne verte forme une barrière hydraulique efficace. Une partie de ces eaux percole vers la nappe phréatique (Assens et al., 1977).

Compartiment occidental : alimenté par les affleurements des djebels Enfous et Bourhaddou. Dans cette zone, l'aquifère profond est en communication directe avec la nappe phréatique sur une large surface (Bekkoussa, 2020).

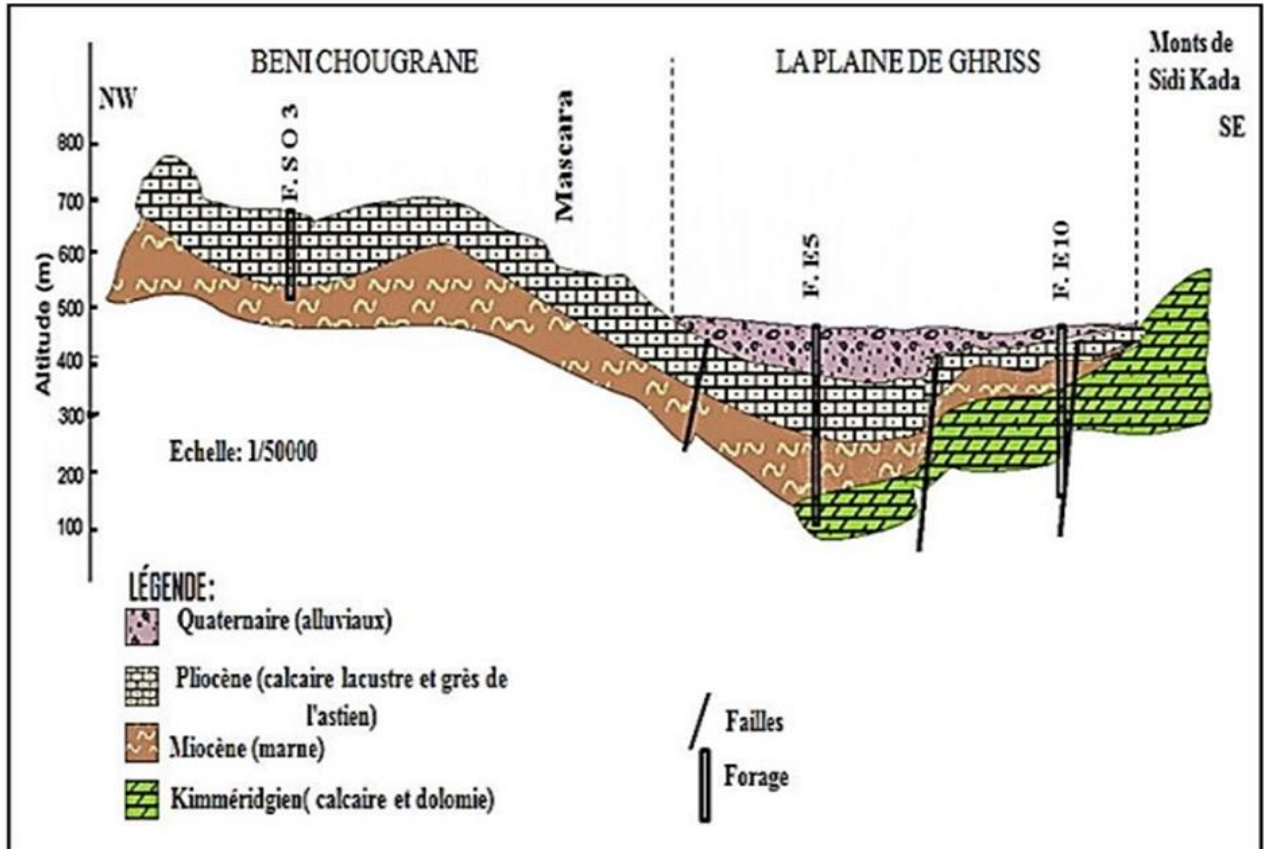


Figure II. 10 : Coupe Hydrogéologique du bassin d'Oued Fekan (Bekkoussa S. 2020).

II.5.2 Limites des nappes

II.5.2.1 Nappe alluvionnaire (ou phréatique)

Cette nappe est délimitée géologiquement par l'interruption des formations perméables constituant l'aquifère sur les bordures de la plaine. Son mur est formé par les marnes bleues du Miocène, tandis que sa limite supérieure correspond à la couche pédologique, ce qui en fait une nappe libre. (Bekkoussa, 2020)

II.5.2.2 Nappe des calcaires et grès du Pliocène

Les limites de cette nappe sont d'origine géologique. Au sud, elle disparaît par biseautage progressif sous les formations plus récentes. Au nord, elle est interrompue par les affleurements rocheux des monts des Beni-Chougrane. Son toit est libre au niveau des bordures nord, et captif sous les marnes miocènes dans la partie centrale de la plaine. (Bekkoussa, 2020).

II.5.2.3 Nappe du Jurassique supérieur

Hydrogéologiquement, cette nappe est limitée :

- Au sud et sud-est par une ligne de partage des eaux souterraines ;
- Au nord, elle est confinée sous les marnes miocènes.

Le toit est constitué par ces marnes dans la plaine, tandis que la nappe est libre au sud. Le mur est formé soit par les argiles callovo-oxfordiennes, soit par la roche saine de dolomies. (Bekkoussa, 2020)

Cette nappe est délimitée géologiquement par l'interruption des formations perméables constituant l'aquifère sur les bordures de la plaine. Son mur est formé par les marnes bleues du Miocène, tandis que sa limite supérieure correspond à la couche pédologique, ce qui en fait une nappe libre. (Bekkoussa S., 2020)

II.6. Etude climat

La zone d'étude se situe dans une région semi-aride, au nord de l'Atlas Tellien. Elle est soumise à une double influence climatique : au nord, celle du climat méditerranéen, et au sud, celle du vaste domaine continental saharien. Ce contraste se traduit par une transition progressive vers un climat plus aride en allant vers le sud.

Le climat de la région se caractérise par deux grandes saisons :

Un hiver froid et humide, marqué par des précipitations cycloniques intenses dues à l'effet orographique de l'Atlas.

Un été chaud et sec, dominé par un anticyclone d'origine continentale, entraînant un temps stable et très sec.

Malgré ces contrastes, la région bénéficie toute l'année d'une certaine modération des températures extrêmes grâce à l'influence maritime.

II.6.1 Température :

La température moyenne annuelle à la station de Ghriss, calculée sur la période 2006–2019, est d'environ 17,7 °C. Les températures mensuelles moyennes maximales atteignent environ 26 °C, tandis que les minimales moyennes descendent à 9 °C. Le mois de janvier est généralement le plus froid de l'année, tandis que le mois d'août enregistre les températures les plus élevées.

II.6.2 Humidité :

L'humidité relative moyenne annuelle à la station de Ghriss est estimée à environ 71 %. Les valeurs maximales sont généralement observées en décembre et janvier, atteignant environ 81 %, tandis que les valeurs minimales sont enregistrées en juillet, avec une moyenne d'environ 63 %.

II.6.3 Vent :

La vitesse moyenne annuelle du vent à la station de Ghriss est estimée à environ 10 km/h, avec des directions dominantes orientées vers le Nord-Ouest, le Nord et le Nord-Est.

II.6.4 Précipitations

Les précipitations représentent une composante essentielle du cycle hydrologique. Leur connaissance est indispensable pour évaluer l'état des réserves en eau du sol, la recharge des nappes phréatiques et le régime des cours d'eau.

L'étude pluviométrique d'une région requiert un réseau de plusieurs stations réparties sur une longue période d'observation, ce qui permet de mieux appréhender l'évolution du régime des précipitations. Les données utilisées doivent répondre à deux critères fondamentaux :

La continuité des séries sur une période suffisamment longue,

La qualité et la fiabilité des données collectées.

Ces stations, gérées par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH), disposent de chroniques mensuelles de précipitations couvrant plus de 46 ans (de 1969 à 2015) pour neuf stations, ce qui en fait les séries les plus complètes et les plus récentes disponibles pour la région.

II.6.4.1 Traitement des données pluviométriques

I.6.4.1.1 Test de normalité des séries pluviométriques

Afin d'évaluer la distribution statistique des séries pluviométriques sur la période 1969–2015, nous avons appliqué des tests de normalité aux données annuelles de différentes stations.

L'analyse a été réalisée à l'aide du logiciel Khronostat 1.01, qui permet de tester l'ajustement des séries à différentes lois statistiques.

Le tableau ci-dessous présente un récapitulatif des méthodes appliquées ainsi que les lois de distribution les mieux ajustées pour chaque série.

Tableau II.13 Résultats du test de normalité des séries pluviométriques (1969–2015)

N°	Station	Résultat du test de normalité
1	Mascara	Une loi racine carrée
2	Maoussa	
3	Aïn Farès	
4	Sidi Kada	
5	Tizi	Une loi normale
6	Ghriss	
7	Froha	
8	Nasmoth	Une loi logarithme
9	Matmore	

Trois types de comportements ont été observés.

Tout d'abord, les séries issues des stations de Tizi, Ghriss et Froha présentaient une distribution déjà suffisamment proche de la loi normale, ne nécessitant donc aucune transformation préalable.

En revanche, les séries des stations de Mascara, Maoussa, Aïn Farès et Sidi Kada montraient une asymétrie modérée ; une transformation par racine carrée s'est révélée suffisante pour les normaliser.

Enfin, les séries des stations de Matmore et Nasmoth présentaient une forte asymétrie, nécessitant l'application d'une transformation logarithmique, plus efficace pour corriger la présence de valeurs extrêmes.

Ces transformations ont permis d'obtenir des distributions normales ou quasi-normales, condition indispensable à la robustesse des analyses statistiques ultérieures (tests de tendance, corrélations, modélisations, etc.).

II.6.4.1.2 Comblement des lacunes

Pour évaluer les données manquantes, nous avons utilisé la macro-commande « Bouche-trou » du logiciel Hydrolab 2018, basée sur la méthode des résidus cumulés.

Nous avons constitué des matrices comportant, en colonnes, les données des stations pour un mois donné, et en lignes, les valeurs correspondantes aux différentes années.

Chaque donnée manquante a été remplacée par le texte « LAC », puis complétée en utilisant les valeurs disponibles dans la même matrice, conformément à l'algorithme appliqué par le logiciel.

II.6.4.1.3. Etude d'homogénéité des séries pluviométriques :

Le contrôle de la fiabilité des données constitue une étape essentielle, car la validité des résultats et leur interprétation en dépendent directement. Dans cette étude, nous avons opté pour le test d'homogénéité normal standardisé (SNHT), reconnu pour sa simplicité et sa robustesse. Ce test a été appliqué aux neuf séries pluviométriques annuelles couvrant la période 1969–2015.

Le test SNHT, réalisé à l'aide du logiciel Khronostat 1.01, avec 10 000 simulations Monte Carlo, permet de vérifier l'homogénéité interne des séries sans intervention corrective. L'objectif était d'identifier d'éventuelles ruptures statistiques ou incohérences dans les données tout en évaluant leur stabilité temporelle.

Il est important de noter qu'aucune correction n'a été apportée à la suite de ce test : l'analyse visait uniquement à statuer sur la qualité des données avant leur utilisation dans les traitements ultérieurs. Les séries jugées homogènes ont été conservées telles quelles, tandis que les anomalies détectées ont été signalées.

Le tableau ci-dessous présente les résultats détaillés du test SNHT pour chaque station.

Tableau II .14 Résultats du test d'homogénéité SNHT appliqué aux données pluviométriques annuelles (1969–2015)

N°	Station	T0	Année (t)	p-value bilatérale	Alpha	Décision	Interprétation
1	Mascara	9,795	1972	0,064	0,05	H0 non rejetée	Série homogène (pas de changement significatif détecté)
2	Maoussa	7,743	2008	0,143			
3	Tizi	8,107	2007	0,088			
4	Matmore	8,412	1970	0,091			
5	Aïn Farès	20,635	2005	< 0,0001		H0 rejetée	Séries non homogènes (changement détecté)
6	Sidi Kada	25,511	2007	< 0,0001			
7	Ghriss	12,533	1976	0,004			
8	Froha	9,087	2008	0,035			
9	Nesmoth	19,786	2005	0,000			

II.6.4.1.4. Tests de détection de ruptures :

Test de Pettit est non-paramétrique et dérive du test de Mann-Whitney. L'absence d'une rupture dans la série (x_i) de taille N constitue l'hypothèse nulle.

Le fondement de ce test est le suivant :

La série est divisée en deux sous-échantillons respectivement de taille m et n .

Les valeurs des deux échantillons sont regroupées et classées par ordre croissant. On calcule alors la somme des rangs des éléments de chaque sous-échantillon dans l'échantillon total.

Une statistique est définie à partir des deux sommes ainsi déterminées, et testée sous l'hypothèse nulle d'appartenance des deux sous-échantillons à la même population.

La mise en œuvre du test suppose que pour tout instant t variant de 1 à N, les séries

$(x_i), i = 1 \text{ à } t$ et $(x_i), i = t + 1, N$ Appartiennent à la même population.

$$\text{Soit } D_{ij} = \text{sgn}(x_i - x_j) \text{ avec } \begin{cases} \text{sgn}(x) = 1 \text{ si } x > 0 \\ \text{sgn}(x) = 0 \text{ si } x = 0 \\ \text{sgn}(x) = -1 \text{ si } x < 0 \end{cases} \quad (II.29)$$

On considère $U_{t,N}$ telle que :

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij} \quad (II.30)$$

Soit K_N la variable définie par le maximum en valeur absolue de $U_{t,N}$ pour t variant de 1 à N.

A partir de la théorie des rangs, Pettitt montre que si k désigne la valeur de K_N prise sur la série étudiée, sous l'hypothèse nulle, la probabilité de dépassement de la valeur k est donnée approximativement par :

$$prob(K_N)K \approx 2 \exp\left(\frac{-6K^2}{N^3+N^2}\right) \quad (II.31)$$

Pour un risque α de première espèce donnée, si $prob(K_N)K$ est inférieur à α , l'hypothèse nulle est rejetée. La série comporte alors une rupture localisée au moment τ où est observée K_N .

Le test est plus particulièrement sensible à un changement de moyenne.

b. La Procédure Bayésienne de Lee et Heghinian (Lubes et al, 1994) :

Le modèle de base de la procédure est le suivant :

$$x_i = \begin{cases} \mu + \varepsilon_i & i = 1, \dots, \tau \\ \mu + \delta + \varepsilon_i & i = \tau + 1, \dots, n \end{cases} \quad (II.32)$$

Les ε_i sont des variables aléatoires normales de moyenne nulle et de variance σ^2 . τ , μ , δ et σ sont des paramètres inconnus et indépendants, $1 \leq \tau \leq N - 1$, $-\infty \leq \mu \leq +\infty$, $-\infty \leq \delta \leq +\infty$, $\sigma > 0$

τ et δ représentent respectivement la position dans le temps et l'amplitude d'un changement éventuel de moyenne.

L'approche Bayésienne présentée ici est fondée sur les distributions marginales α posteriori de τ et δ (Lee et Heghinian, 1977).

Les distributions α priori de τ et δ sont :

$$p(\tau) = \frac{1}{N-1}, \tau = 1, 2, \dots, N-1 \quad (II.33)$$

$p(\tau)$ Est normale de moyenne nulle et de variance σ_δ^2

La distribution α posteriori de τ est définie par :

$$p(\tau/x) = \left[\frac{N}{\tau(N-\tau)} \right]^{1/2} \cdot [R(\tau)]^{-(N-2)/2} \quad 0 \leq \tau \leq N-1 \quad (II.34)$$

Avec :

$$R(\tau) = \frac{H(\tau)}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}_N)^2} = \frac{\sum_{i=1}^{\tau} (x_i - \bar{x}_{\tau})^2 + \sum_{i=\tau+1}^N (x_i - \bar{x}_{N-\tau})^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}_N)^2} \quad (II.35)$$

Et

$$\bar{x}_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad ; \quad \bar{x}_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} x_i \quad ; \quad \bar{x}_{N-\tau} = \frac{1}{N-\tau} \sum_{i=\tau+1}^N x_i \quad (II.36)$$

la distribution a posteriori de δ est définie à partir de la distribution α posteriori de τ , $p(\tau/x)$ et de la distribution conditionnelle α posteriori par rapport à τ , $p(\delta/\tau, x)$:

$$p(\delta/x) = \sum_{\tau=1}^{N-1} p(\delta/\tau, x) \cdot p(\tau/x) \quad (II.37)$$

la distribution conditionnelle α posteriori de δ par rapport à τ est une distribution de Student de moyenne $\hat{\delta}_{\tau} = \bar{x}_N - \bar{x}_{\tau}$ et de variance $\sigma_{\delta/\tau}^2 = \frac{N \cdot H(\tau)}{(N-2) \cdot (\tau(N-\tau))}$ avec $\mu = N - 2$ la fonction densité de probabilité de cette loi de Student est la suivante :

$$p(\delta/\tau, x) = \frac{\mu^{1/2} T(\mu/2) (\mu+1)/2}{T(1/2) \cdot T(\mu/2) (\sigma_{\delta/\tau}^2)^{1/2}} \cdot \frac{1}{(\mu + (\delta - \hat{\delta}_{\tau})^2 / \sigma_{\delta/\tau}^2)^{(\mu+1)/2}} \quad (II.38)$$

Le changement éventuel, position et amplitude, correspond au mode des distributions α posteriori de τ et δ . La méthode fournit la probabilité que le changement se produise au moment τ dans une série où on suppose α priori qu'il y a effectivement un changement à un moment indéterminé. De même elle donne une estimation de la probabilité que l'amplitude du changement ait la valeur δ .

La procédure de segmentation des séries hydrométéorologiques (Hubert P., 1997) :

Une procédure de segmentation de séries hydrométéorologiques a été présentée par Hubert en 1989. Le principe de cette procédure est de « découper » la série en m segments ($m > 1$) de telle sorte que la moyenne calculée sur tout segment soit significativement différente de la moyenne (ou des) segment(s) voisin(s). Une telle méthode est appropriée à la recherche de multiples changements de moyenne. La segmentation est définie de la façon suivante :

Toute la série $x_i, i = i_1, i_2$ avec $i_1 \leq 1$ et $i_2 \geq N$ ou $i_1 < i_2$ constitue un segment de la série initiale des $(x_i), i = 1, \dots, N$

Toute partition de la série initiale en m segments est une segmentation d'ordre m de cette série. A partir d'une segmentation particulière d'ordre m pratiquée sur la série initiale, on définit :

$i_k, k = 1, 2, \dots, m$ Le rang dans la série initiale de l'extrémité terminale du $k^{\text{ième}}$ segment ;

$n_k = i_k - i_{k-1}$ La longueur du $k^{\text{ième}}$ segment ;

$\bar{x}_k$ La moyenne du $k^{\text{ième}}$ segment, $\bar{x}_k = \frac{\sum_{i=i_{k-1}+1}^{i=i_k} x_i}{n_k}$

D_m L'écart quadratique entre la série et la segmentation considérée, $D_m = \sum_{k=1}^m d_k$

Avec $d_k = \sum_{i=i_{k-1}}^{i=i_k} (x_i - \bar{x}_k)^2$ Cet écart permet d'apprécier la proximité de la série et de la segmentation qui lui est appliquée.

La segmentation retenue au terme de la mise en œuvre de la procédure doit être telle que pour un ordre m de segmentation donné, l'écart quadratique D_m soit minimum. Cette condition est nécessaire mais non suffisante pour la détermination de la segmentation optimale. Il faut lui adjoindre la contrainte suivante selon laquelle les moyennes de deux segments contigus doivent être significativement différentes : $\bar{x}_k \neq \bar{x}_{k-1} \forall k = 1, 2, \dots, m - 1$

Cette contrainte est satisfaite par application du test de Scheffé qui repose sur le concept de contraste (Dagnélie, 1970). Par conséquent si lors du processus de segmentation d'ordre $m+1$, aucune segmentation produite n'est valide au sens du test de Scheffé, la segmentation de la série qui est retenue en tant que meilleure segmentation est la segmentation optimale d'ordre m . D'après les auteurs (Hubert et al., 1989), cette procédure de segmentation peut être regardée comme un test de stationnarité, « la série étudiée est stationnaire », constituant l'hypothèse nulle de ce test. Si la procédure ne produit pas de segmentation acceptable d'ordre supérieur ou égal à 2, l'hypothèse nulle est acceptée.

Les résultats des détections de ruptures sont consignés dans le tableau I.14.

Tableau II.15: résultats des tests de détection de rupture appliqués aux séries pluviométriques annuelles (1972-2012).

Station	Période d'étude	Segmentation de Pierre Hubert				Petit	Lee et Heghinian
		Début	Fin	Moyenne	Ecart type	Année	
Mascara	1970-2015	1970	1972	521.2	207.5	2005	1972
		1973	2005	314.3	80.7		
		2006	2015	442	105.4		
Maoussa		1970	1972	480.1	156.9	2008	2008
		1973	2008	288.5	70.7		
		2009	2015	427.1	136.7		
Matmore		1971	2011	290.9	65.8	1981	1970
		2012	2015	416.4	138.8		
Tizi		1970	2007	325.9	76.2	2000	2007
		2008	2015	421.7	93.2		
Ghriss		1970	1976	421.5	66.4	1981	1976
		1977	2011	276.4	69.3		
		2012	2015	399	93.6		
Froha		1970	2008	288.5	68.5	2000	2008
		2009	2015	385.9	85.6		
Ain Fares		1970	2005	369.2	100.6	2001	2005
		2006	2015	631.9	177.3		
Sidi Kada		1970	1977	454.5	54.8	2005	2007
		1978	2007	328.5	79.9		
		2008	2015	665.9	160.9		
Nesmoth		1970	1974	587.9	81.8	2001	2005

II.6.4.1.5 Etude des statistiques descriptives des pluies moyennes annuelles

Afin de mieux visualiser la variabilité pluviométrique à l'échelle de la zone d'étude, les principales caractéristiques statistiques des séries enregistrées entre 1969 et 2015 sont présentées dans le tableau II.13. Pour évaluer la variabilité relative des précipitations, le coefficient de variation (CV) s'avère particulièrement pertinent. Cet indicateur statistique

permet également une comparaison des fluctuations interannuelles entre plusieurs stations pluviométriques (Ghachi, 1986).

Les résultats montrent une variabilité notable, avec des CV allant de 25 % à 39 %. La valeur la plus élevée est enregistrée à la station de Sidi Kada (39 %), indiquant une forte irrégularité des précipitations. À l'inverse, la station de Tizi présente la variabilité la plus faible, avec un CV de 25 %. En ce qui concerne les totaux pluviométriques annuels moyens, ceux-ci varient entre 303,3 mm à la station de Matmore et 473 mm à celle de Nesmoth.

Tableau II.16 Caractéristiques statistiques des précipitations (p) aux stations retenues pour la période 1969-2015 :

Bassin versant	Station	Code de l'ANRH	Coordonnées Lambert		Altitude Z(m)	% LAC	P min (mm)	P max (mm)	P moy (mm)	Médiane (mm)	σ (mm)	CV (%)
			X (km)	Y (km)								
la Macta (Sous bassin O.Fekan)	Mascara	111407	265	230	400	11.5	198.9	740.8	358.9	341.7	121.5	33.8
	Maoussa	111401	277,3	233,8	494	0.0	166	690	322	310	108	34
	Matmore	111405	274	228,5	482	3.8	176	592	308	285	89	29
	Tizi	111413	261,5	227,8	453	0.5	179	624	343	339	87	25
	Ghriss	111424	269,5	219,4	498	0.0	145	512	309	298	91	29
	Froha	111402	266,3	225,8	467	0.0	161.5	514.6	303.3	295.6	78.8	25.9
	Ain Fares	111417	277,5	245,3	806	2.3	171.4	1050.6	426.3	390.2	161.9	37.9
	Sidi Kada	111414	285,9	228,3	549	0.0	208	967.4	409	369	158	39
	Nesmoth	111418	289,1	219,5	930	5.0	222	1033	473	408	173	36.6

II.6.4.1.6 calcul de la lame précipitée sur l'ensemble du bassin versant d'Oued Fekan

Les postes pluviométriques au sol fournissent des observations ponctuelles des pluies. On a besoin de connaître la lame d'eau précipitée sur l'ensemble du bassin. Différentes méthodes d'interpolation sont utilisées :

La méthode de moyenne arithmétique.

La méthode de des isohyètes.

II.6.4.1.7 Méthode de la moyenne arithmétique

C'est la méthode la plus simple pour calculer la moyenne des pluies à partir de l'ensemble des mesures ponctuelle obtenues à plusieurs stations pluviométriques sur le bassin cette méthode consiste à calculer la moyenne arithmétique des valeurs obtenues aux stations étudiées.

$$\bar{P} = \frac{\bar{P}_1 + \bar{P}_2 + \dots + \bar{P}_n}{N} \quad (II.26)$$

$\bar{P}$: Précipitation moyenne (mm)

$\bar{P}_1 + \bar{P}_2 + \bar{P}_n$: Précipitation moyenne annuelle pour chaque station

N : nombre des stations

La valeur de la lame précipitée calculée par la méthode de la moyenne arithmétique sur la période 1970-2015 est : **362.17 mm**

Cette méthode est assez grossière et elle est potentiellement source d'erreurs importantes. Elle est donc à proscrire le plus souvent. Elle reste néanmoins acceptable dans les cas suivants :

Densité importante et répartition régulière des points de mesure ;

Altitude du bassin homogène ;

Mesures ponctuelles peu différentes de la valeur moyenne.

II.6.4.1.8. La méthode des isohyètes

La méthode des isohyètes consiste à tracer des courbes reliant les points de même valeur, généralement utilisées pour représenter la distribution spatiale des précipitations. Traditionnellement, ces courbes sont établies à partir de mesures ponctuelles par interpolation.

Le krigeage est une méthode d'interpolation spatiale stochastique qui améliore la précision de cette interpolation en tenant compte non seulement de la configuration géométrique des points d'observation, mais aussi de la dépendance spatiale entre les données via le variogramme.

La formule générale utilisée par cette méthode d'interpolation consiste en une somme pondérée des données, où :

$$\hat{Z}(S_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(S_i) \quad (II.27)$$

$Z(S_i)$:valeur relevée à l'emplacement i

λ_i : Pondération inconnue de la valeur relevée à l'emplacement i (déterminée à partir du variogramme)

S_0 : Emplacement de prévision

N : nombre de valeurs relevées

En théorie, le krigeage générerait les interpolations spatiales les plus précises. Cette précision dépend alors de plusieurs facteurs, à savoir, Nombre d'échantillons et la qualité des données en chaque point, Position des échantillons et la distance entre les échantillons et le point dont on veut estimer la valeur.

La Figure II.12 présente la distribution spatiale des précipitations annuelles, interpolée à l'aide de la méthode du krigeage à partir des données de neuf stations pluviométriques sur la période 1970–2015. On peut en tirer les observations suivantes :

Les précipitations les plus faibles, d'environ 303 mm, se situent principalement dans la région centre-ouest du bassin, autour de Froha, Tizi et Ghriss. À l'inverse, les précipitations les plus abondantes, pouvant atteindre jusqu'à 473 mm, sont localisées dans le sud-est, notamment autour de Nesmoth.

Cette distribution met en évidence un gradient pluviométrique croissant du centre-ouest vers le sud-est, influencé par plusieurs facteurs géographiques, tels que la topographie, l'altitude, les effets orographiques liés à l'Atlas Tellien, ainsi que l'exposition aux masses d'air humides.

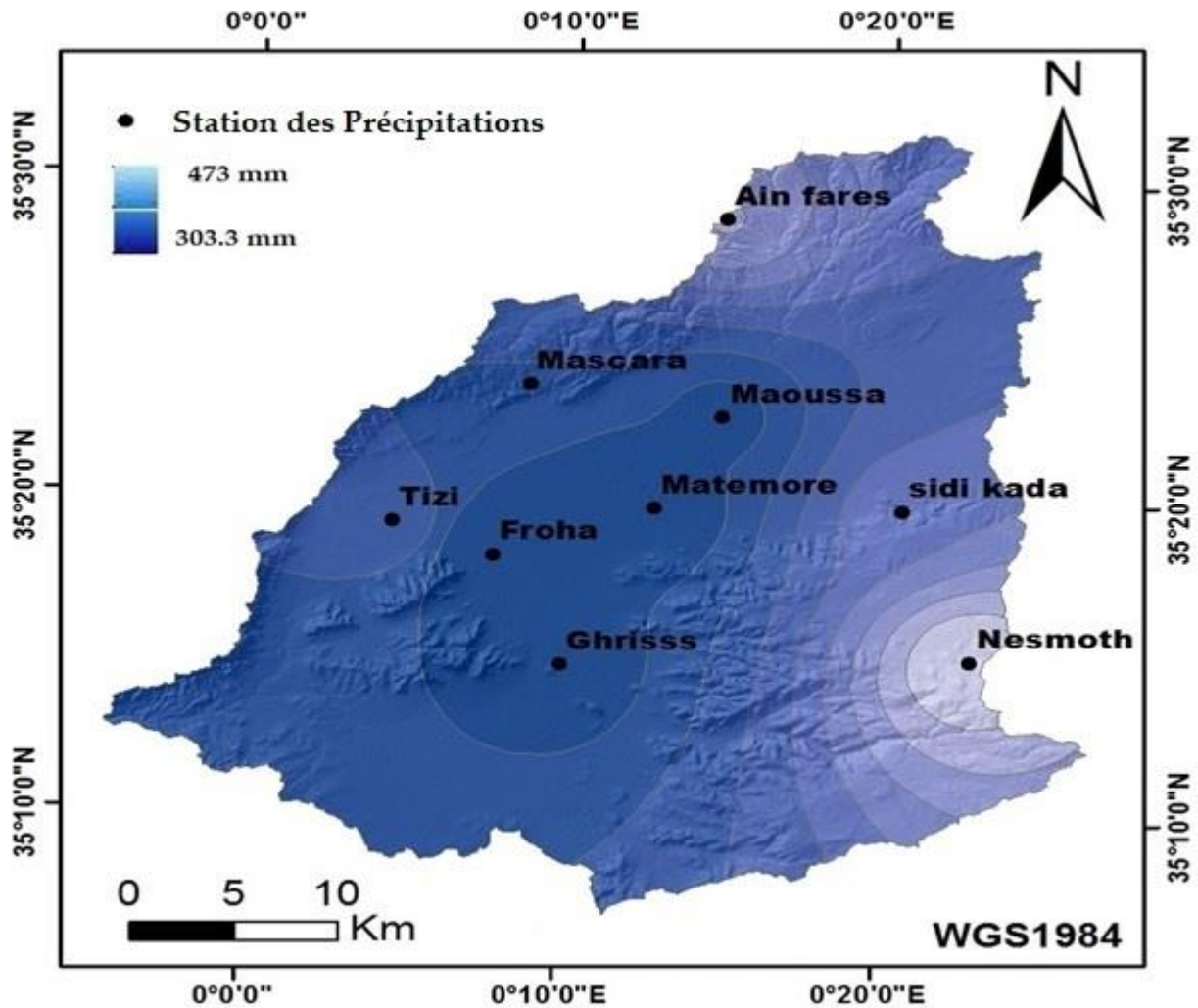


Figure II.11 : Répartition spatiale des précipitations annuelles moyennes dans le bassin d'Oued Fekan (période 1970–2015).

II.6.4.1.8 L'étude de la variabilité à l'échelle du temps

La répartition annuelle des précipitations et ses variations conditionnent, en relation avec les facteurs thermiques, l'écoulement par conséquent le régime des cours d'eau ainsi que celui de nappes aquifères. Sa connaissance est donc fort indispensable pour la gestion des ressources en eau.

Cependant, si le phénomène de variabilité des précipitations annuelles se prête facilement à l'analyse, vu son caractère tranché dans la zone d'étude, il est néanmoins malaisé de définir de périodes pluviométriques spatialement homogènes et ce en raison des différences des régimes de précipitations déterminés eux-mêmes par des variantes à la fois géographiques et météorologiques.

Pour étudier l'évolution des totaux pluviométriques annuels, on a appliqué la méthode de la moyenne mobile.

II.6.4.1.91 La moyenne mobile :

Chaque observation est remplacée par une moyenne arithmétique calculée sur la valeur de cette observation et les valeurs voisines qui l'encadrent ; dans le cadre de notre étude on a utilisé trois valeurs. Ainsi x_i est remplacé dans la série par :

$$\frac{x_{i-1} + x_i + x_{i+1}}{3} \quad (II.28)$$

Cette méthode réduit l'influence des variations accidentelles, élimine l'effet des fluctuations de très courtes périodes et par conséquent les résultats sont plus commodes à interpréter. On a opté pour cette méthode en raison de sa simplicité et sa pertinence.

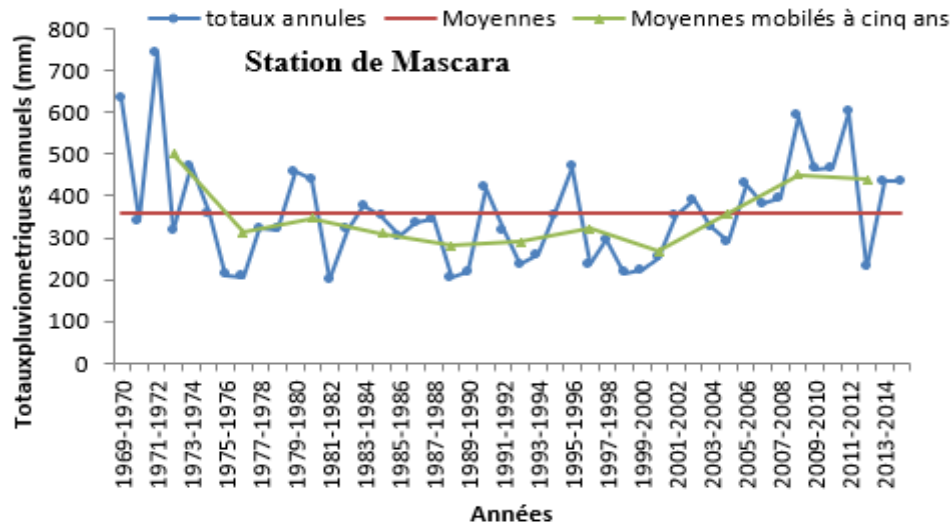


Figure II.12 : Variabilité des précipitations annuelles dans la région d'étude (1969-2015).

I.6.4.1.10 L'étude des débits

Cette étude repose sur l'analyse des débits liquides mensuels et annuels enregistrés à la station hydrométrique de Ghriss.

Tableau II.17 stations hydrométriques retenues dans l'étude

Station	Coordonnées Lambert			Période
	X(Km)	Y(Km)	Z (m)	
Ghriss	269.5	219.4	498	1969-2015

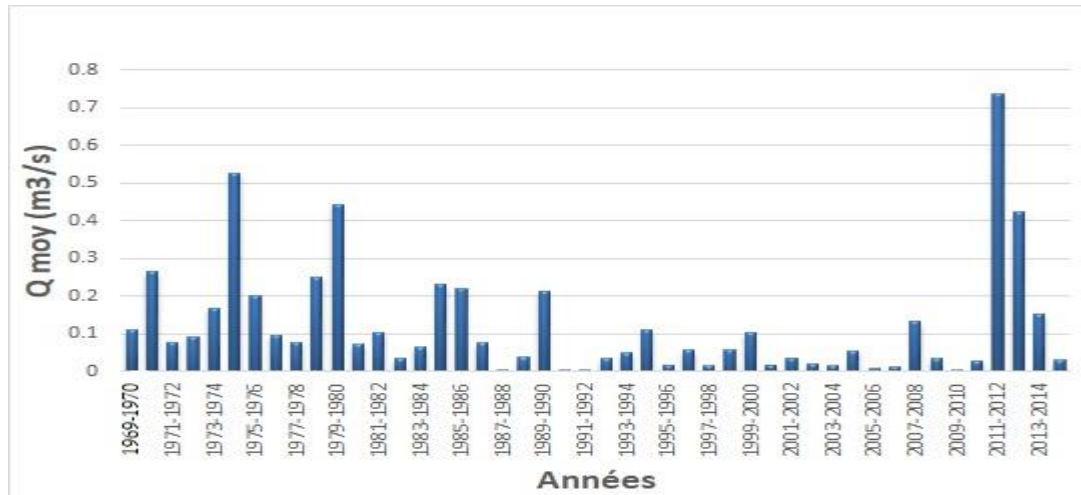


Figure .II.13 évolution de débit au cours de période (1969-2015)

L'analyse du débit moyen annuel (Q_{moy}) de 1969 à 2015 révèle une forte variabilité interannuelle. Les premières années (1969–1985) présentent des valeurs relativement élevées, avec des pics notables en 1974–1975 ($\sim 0.526 \text{ m}^3/\text{s}$) et 1979–1980 ($\sim 0.443 \text{ m}^3/\text{s}$), suggérant des périodes plus humides. Une rupture est observable à partir du milieu des années 1980, caractérisée par une baisse généralisée du débit, avec de nombreuses années enregistrant des valeurs extrêmement faibles, comme en 1991–1992 ($\sim 0.00026 \text{ m}^3/\text{s}$), 1990–1991 et 1987–1988, traduisant une phase prolongée de sécheresse, potentiellement accentuée par le changement climatique. Cette tendance s'inverse brutalement en 2011–2012, où le débit atteint un maximum historique de $\sim 0.735 \text{ m}^3/\text{s}$, suivi de $0.422 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2012–2013, ce qui reflète probablement un épisode pluvieux intense ou un événement de crue exceptionnel. L'ensemble de la série suggère une tendance générale à la diminution des ressources en eau de surface, soulignant la vulnérabilité croissante du bassin face aux aléas climatiques et à la pression humaine, et appelle à une gestion durable intégrant les effets du changement climatique et de l'occupation du sol.

II.7 Conclusion :

Une analyse approfondie a permis de caractériser les propriétés climatologiques, morphométriques et hydrodynamiques du bassin versant de l'Oued Fekan. Ce dernier se distingue par une topographie globalement plane, encadrée de reliefs atteignant 1200 m d'altitude. Il couvre une superficie de 1205 km² pour un périmètre de 194,3 km, ce qui correspond à un coefficient de compacité de 1,57, traduisant une forme modérément allongée.

Cette morphologie, associée à une pente moyenne relativement faible, favorise un écoulement lent des eaux de surface, impliquant un temps de concentration élevé.

Le réseau hydrographique est structuré autour de l'Oued Fekan, cours d'eau principal du bassin. La densité de drainage, estimée à 1,1 km/km², reflète un développement modéré du réseau hydrographique par unité de surface, caractéristique d'un substrat à perméabilité moyenne.

Le climat semi-aride de la région, fortement influencé par la position géographique et le relief, se caractérise par une forte variabilité interannuelle des précipitations. L'analyse des données enregistrées sur la période 1969–2015 met en évidence une alternance saisonnière marquée, avec une période humide (d'octobre à avril) et une période sèche (de mai à septembre).

Chapitre III

Évolution de l'occupation du sol et impacts sur les ressources en eau

III.1 Introduction

L'occupation et la couverture du sol (*Land Use and Land Cover – LULC*) résultent de l'interaction complexe entre facteurs naturels et anthropiques, tels que les conditions environnementales, les dynamiques géographiques, les pressions socio-économiques et les décisions politiques (Koko et al., 2022 ; Hassan et al., 2016 ; Minallah et al., 2016 ; Pijanowski et al., 2002). Ces transformations influencent profondément les écosystèmes, la disponibilité des ressources naturelles et les activités humaines, faisant de cette thématique un enjeu majeur aux échelles mondiale et régionale (Alsharif et al., 2022 ; Kurniawan et al., 2014). Leur importance s'accroît dans le contexte actuel de changement climatique et de réchauffement global (Aghajani et al., 2024).

Les activités humaines, telles que la déforestation, l'expansion agricole ou encore l'urbanisation, exercent des effets significatifs sur la biodiversité, la chimie des sols, les cycles hydrologiques et la qualité des ressources en eau (Sharma et al., 2022 ; Son et al., 2022 ; Yao et al., 2022 ; Ashaolu et al., 2019). Comprendre ces dynamiques est essentiel pour mettre en place des stratégies de gestion durable des territoires (Sampath et Radhakrishnan, 2022 ; Daba et You, 2022).

Les avancées en télédétection (TS) et en systèmes d'information géographique (SIG) ont considérablement amélioré le suivi et l'analyse de ces changements. Ces outils permettent une collecte, une analyse et une modélisation spatiale de plus en plus précises, appuyant ainsi une gestion plus éclairée des ressources naturelles (Guidigan et al., 2018). L'intégration TS-SIG permet d'identifier les tendances passées et actuelles de l'occupation du sol, tout en simulant des scénarios futurs à partir de données géospatiales (Mishra et al., 2018).

Dans cette optique, les modèles d'automates cellulaires (CA) couplés aux réseaux de neurones artificiels (ANN), désignés par l'acronyme CA-ANN, se révèlent particulièrement efficaces pour modéliser les dynamiques spatiales non linéaires, notamment les processus d'urbanisation (He et al., 2006). Par exemple, une étude menée à Irbid, en Jordanie, a atteint une précision de 90,04 % en utilisant le modèle CA-MC pour prédire l'évolution de l'occupation du sol (Gharaibeh et al., 2020). Ces approches offrent une base solide pour anticiper les changements à venir et orienter la planification territoriale de manière durable (Hu et al., 2018).

En Algérie, bien que quelques études locales aient été réalisées, on constate un manque d'analyses globales à l'échelle nationale ou régionale. Cette lacune limite l'intégration des dynamiques d'occupation du sol dans les politiques de développement durable, en particulier dans le cadre de la stratégie *Algeria Vision 2035*.

La présente étude vise à améliorer la compréhension et la gestion des dynamiques d'occupation du sol dans le bassin versant d'Oued Fekan, une région semi-aride soumise à des mutations rapides sous l'effet des pressions humaines et climatiques. Les transformations observées ont un impact sur le climat local, la biodiversité, la fertilité des sols et la disponibilité en eau.

Les objectifs de ce chapitre sont les suivants :

- **Analyser l'évolution spatio-temporelle de l'occupation du sol** dans le bassin versant d'Oued Fekan entre 2001 et 2021, à partir de données satellitaires et de traitements issus de la télédétection et des SIG, afin d'identifier les dynamiques dominantes.
- **Simuler et projeter l'évolution future de l'occupation du sol** à l'horizon 2031, 2041 et 2051, à l'aide du modèle CA-ANN intégré au plugin MOLUSCE dans QGIS, dans le but d'anticiper les mutations territoriales futures.
- **Identifier les principaux facteurs de changement**, qu'ils soient environnementaux, démographiques, anthropiques ou liés aux politiques d'aménagement, afin de mieux comprendre les mécanismes sous-jacents des transformations du paysage.
- **Produire des cartes de transition de l'occupation du sol** et évaluer leurs impacts écologiques et hydrologiques, en particulier en matière d'érosion, de sécheresse et de désertification, grâce à l'analyse croisée de données géospatiales et d'indicateurs environnementaux.
- **Proposer des pistes pour la planification durable du territoire**, en formulant des recommandations fondées sur les résultats obtenus, afin de limiter les effets négatifs des changements d'usage des terres sur les ressources naturelles et les écosystèmes.

Cette approche intégrée constitue un cadre pertinent pour une gestion territoriale durable, en offrant des outils d'anticipation et d'aide à la décision adaptés aux zones en forte mutation, comme celle d'Oued Fekan. L'utilisation du modèle CA-ANN permet de mieux orienter les stratégies d'aménagement face aux enjeux croissants liés aux transformations de l'environnement.

III.2. Matériels et méthodes

Les données d'occupation et d'utilisation des terres ont été extraites à partir d'images satellites Landsat pour les années 2001, 2006, 2011, 2016 et 2021, avec un intervalle de cinq ans. Grâce aux techniques de télédétection, ces images ont permis d'identifier et de classifier les principaux types d'occupation du sol dans le bassin versant d'Oued Fekan. Six classes d'occupation du sol ont été définies pour analyser les dynamiques spatio-temporelles : zones bâties, forêts, zones arbustives, terres agricoles, prairies et sols nus.

Cette classification vise à évaluer les changements d'usage du sol dans un contexte de croissance urbaine, afin d'améliorer la gestion des ressources en eau et de guider la planification territoriale durable.

Les images satellitaires utilisées ont été téléchargées depuis le site officiel de l'USGS : <https://earthexplorer.usgs.gov>. Il s'agit des produits Landsat 5 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) et Landsat 8 Operational Land Imager (OLI), sélectionnés pour leur qualité radiométrique, leurs capacités spectrales étendues et leur résolution spatiale de 30 mètres (USGS, 2021 ; Vermote & Saleous, 2006 ; Chander et al., 2009 ; Roy et al., 2014 ; Gorelick et al., 2017).

Un résumé des images Landsat exploitées est présenté dans le Tableau III.1, en veillant à ce que l'ensemble couvre la même emprise géographique. Cette cohérence spatiale renforce la fiabilité de l'analyse des phénomènes d'urbanisation, de la dynamique de la végétation et des impacts environnementaux au sein du bassin versant.

Par ailleurs, les données topographiques ont été obtenues à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT) issu de la mission SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), avec une résolution spatiale également de 30 mètres. Ces données ont permis d'extraire des paramètres clés tels que l'altitude, la pente et l'orientation du bassin versant.

Les informations relatives au réseau routier proviennent de Open Street Map (OSM) et ont été vérifiées et complétées à l'aide de Google Earth, afin de garantir leur concordance avec les dates d'observation des images satellites.

Enfin, les données démographiques pour l'année 2019 ont été obtenues auprès du répertoire statistique de la Direction de la Planification et de l'Aménagement du Territoire. Elles ont été intégrées au processus de modélisation pour simuler les futurs scénarios d'occupation du sol.

Tableau III.1. Bases de données Landsat utilisées dans l'étude.

Type d'image	Date du fichier	Date d'acquisition	Rangée	Chemin	ID du capteur	% denuages
Landsat 5	06 Septembre 2020	06 Juin 2001	197	35/36	TM	<10
	31 Août 2020	02 July 2006	197	35/36	TM	<10
	22 Août 2020	14 Juin 2011	197	35/36	TM	<10
Landsat 8	06 Septembre 2020	29 Juillet 2016	197	35/36	OLI_TIRS	<5
	15 Septembre 2021	15 Juin 2021	197	35/36	OLI_TIRS	<5

III.2.1 Prétraitement et corrections des images satellitaires

Afin de garantir la fiabilité et la précision des analyses relatives à l'occupation et à l'utilisation des terres, les images satellitaires ont été soumises à plusieurs étapes de prétraitement. Certaines corrections sont automatiquement appliquées par la plateforme de téléchargement, tandis que d'autres ont été réalisées en complément afin d'optimiser la qualité des résultats.

Dans un premier temps, une correction atmosphérique a été effectuée à l'aide de méthodes telles que la soustraction d'objets sombres (Dark Object Subtraction - DOS) et le modèle de transfert radiatif 6S (Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum). Ces techniques permettent d'atténuer les effets des particules atmosphériques (aérosols, vapeur d'eau) et de restituer les valeurs de réflectance de surface, améliorant ainsi considérablement l'exactitude des données spectrales.

La correction géométrique vise à repositionner les images en fonction de coordonnées géographiques précises, en corrigeant les distorsions induites par les mouvements orbitaux du satellite, la courbure terrestre et les variations d'altitude du terrain. Cette étape repose sur l'utilisation de points de contrôle au sol (Ground Control Points - GCPs) et de modèles numériques de terrain (MNT), garantissant un géoréférencement précis dans un système de projection standard tel que UTM (Universal Transverse Mercator) / WGS84.

La correction radiométrique consiste à transformer les valeurs numériques brutes (Digital Numbers - DN) en radiance, puis en réflectance au sommet de l'atmosphère (Top-of-Atmosphere - TOA reflectance). Cette conversion s'appuie sur les paramètres d'étalonnage propres à chaque capteur, l'irradiance solaire incidente et l'angle d'élévation solaire au moment de l'acquisition.

Pour réduire l'influence des nuages et de leurs ombres, des algorithmes de masquage automatique, tels que Fmask (Function of mask), sont appliqués. Ces algorithmes permettent d'identifier et d'exclure les pixels perturbés, assurant ainsi une meilleure fiabilité dans les traitements ultérieurs.

Enfin, lorsque plusieurs scènes satellitaires couvrant une même période sont nécessaires, des opérations de mosaïquage et de normalisation radiométrique sont mises en œuvre. Ces traitements visent à assurer une homogénéité spectrale entre les différentes images, condition indispensable pour garantir la cohérence des classifications et la comparabilité des données à travers le temps.

III.3-Classification du maximum de vraisemblance

La classification par maximum de vraisemblance (*Maximum Likelihood Classification*, MLC) constitue l'une des méthodes les plus répandues pour la classification supervisée des images de télédétection, en raison de sa robustesse et de sa capacité à intégrer des caractéristiques statistiques complexes (Manandhar et al., 2009 ; Tan et al., 2010 ; Verma et al., 2020 ; Kumar et al., 2020).

Contrairement aux approches plus simples, telles que la classification par distance minimale, la méthode MLC prend en compte non seulement la variance mais également la covariance des classes spectrales. Cette prise en compte des relations entre les bandes spectrales permet d'effectuer une classification plus précise et plus nuancée (Bolstad et Lillesand, 1991 ; Ahmad et Quegan, 2012 ; Shivakumar et Rajashekararadhya, 2018).

Le principe de la MLC repose sur une approche probabiliste fondée sur la loi normale multivariée. Pour chaque pixel, l'algorithme calcule la probabilité conditionnelle d'appartenance à chaque classe, en fonction de la distance de Mahalanobis, qui intègre la moyenne, la variance et la covariance des pixels d'entraînement. Le pixel est ensuite affecté à la classe pour laquelle cette probabilité est maximale (Sisodia et al., 2014).

Selon Hailemariam et al. (2016) ainsi que Molla et al. (2018), la classification MLC permet également de mieux capturer les dynamiques spatio-temporelles des changements d'occupation du sol, en restituant de manière plus fidèle leur impact visuel ainsi que leur intensité. Cette capacité en fait un outil adapté aux études environnementales à fort enjeu spatial, notamment dans les contextes de croissance urbaine et de pression anthropique croissante sur les écosystèmes.

De plus, la classification bayésienne (MLC – *Maximum Likelihood Classification*) ne se limite pas à l'évaluation de la position centrale d'un groupe (ou *cluster*) ; elle prend également en compte sa forme, sa taille ainsi que son orientation dans l'espace des variables. Cette approche permet ainsi de mieux appréhender l'intensité des changements d'occupation du sol, ainsi que les contrastes visuels entre les différentes classes.

L'approche MLC repose sur le théorème de Bayes, formulé par l'équation suivante :

$$P_r\{A_i|B\} = P_r\{A_i\} \cdot P_r\{B|A_i\} \sum P_r\{A_i\} \cdot P_r\{B|A_i\} \quad (\text{III.1})$$

Où :

- A_i Représente la classe i ,
- B Représente les valeurs spectrales (ou les valeurs de réponse) du pixel,
- $P_r\{A_i|B\}$ Est la probabilité de la réponse B sachant que le pixel appartient à la classe A_i

Dans cette étude, la classification par maximum de vraisemblance (MLC) a été appliquée à l'ensemble des images Landsat à l'aide du logiciel ENVI 5.3. Pour chaque pixel, les fonctions discriminantes ont été calculées afin d'évaluer la probabilité d'appartenance à chacune des classes définies (Richards, 1999). Ce processus peut être représenté mathématiquement par l'équation (2) :

$$g_i(\mathbf{x}) = \ln * p(\omega_i) - \frac{1}{2} \ln |\Sigma_i| - \frac{1}{2} (\mathbf{x} - \mathbf{m}_i)^T \Sigma_i^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{m}_i) \quad (\text{III.2})$$

Où :

- $g_i(\mathbf{x})$: est la fonction discriminante associée à la classe ω_i
- $\mathbf{X}$: est le vecteur spectral du pixel à classer (contenant les valeurs des n bandes spectrales),
- $p(\omega_i)$: est la probabilité *a priori* que la classe ω_i apparaisse dans l'image (souvent supposée égale pour toutes les classes si aucune information préalable n'est disponible),
- $|\Sigma_i|$: est un facteur de la matrice de covariance lié aux données dans ω_i
- Σ_i : est la matrice de covariance des données spectrales appartenant à la classe ω_i
- $|\Sigma_i|$: est le déterminant de la matrice de covariance Σ_i
- Σ_i^{-1} : est l'inverse de cette même matrice.
- $\mathbf{m}_i$: est le vecteur moyen des valeurs spectrales pour la classe ω_i

La production d'une carte L'occupation et de la couverture du sol (*Land Use/Land Cover*, LULC) à partir de données de télédétection implique plusieurs étapes essentielles. L'une des plus importantes consiste à analyser les signatures spectrales des pixels afin de les affecter à des classes spécifiques d'occupation et d'utilisation des terres, selon des critères préétablis.

La sélection de ces classes repose sur des critères scientifiques rigoureux (Hardy et Anderson, 1973) et revêt une importance stratégique dans divers domaines d'application, tels que la planification des ressources naturelles, la modélisation hydrologique, l'évaluation des aléas et des risques environnementaux, ainsi que l'analyse des dynamiques écosystémiques.

Dans le cadre de cette étude, six classes d'occupation du sol ont été définies : zones bâties, forêts, zones arbustives, terres agricoles, prairies et sols nus.

La classification a été réalisée à l'aide d'une méthode supervisée, en utilisant l'algorithme du Maximum de Vraisemblance (Maximum Likelihood Classification, MLC) intégré dans le logiciel ENVI version 5.3.

La méthode MLC est largement reconnue dans le domaine du traitement des images satellitaires pour sa robustesse et sa capacité à exploiter efficacement des données provenant

de capteurs multispectraux (Roy et Roy, 2010 ; Congedo, 2016 ; Karlsson et al., 2016). Fondée sur le principe des probabilités bayésiennes, cette méthode assigne chaque pixel à la classe de l'occupation et de la couverture du sol pour laquelle la probabilité d'appartenance, sur la base de ses caractéristiques spectrales observées, est maximale (Seyam et al., 2023).

La MLC s'inscrit dans une approche d'apprentissage supervisé, dans laquelle des échantillons représentatifs sont sélectionnés pour chaque classe afin de modéliser leurs signatures spectrales typiques. Ces échantillons servent à définir les centroïdes des classes dans un espace spectral multidimensionnel, permettant de capter les variations fines entre les types de couvertures terrestres (Shivakumar et Rajashekararadhya, 2018 ; Alvarez, 2023).

L'évaluation de la performance de la classification a été effectuée à l'aide d'une matrice de confusion. Cette analyse a permis de calculer plusieurs indicateurs de précision, notamment la précision globale, la précision du producteur, la précision de l'utilisateur pour chaque classe, ainsi que le coefficient de Kappa, qui mesure le degré d'accord entre la classification réalisée et les données de référence, au-delà du simple hasard.

III.4-Le modèle de chaîne de Markov des automates cellulaires :

Grâce aux avancées des systèmes d'information géographique (SIG) et de la télédétection, le modèle de chaîne de Markov est devenu un outil essentiel pour l'analyse de la dynamique et de la stabilité des transformations anthropiques de l'occupation du sol.

Ce modèle permet de générer des prévisions fiables et précises des changements d'occupation du territoire. Il est largement utilisé pour simuler l'évolution des paysages, les schémas d'occupation du sol, ainsi que la croissance et l'étalement urbains (Memarian et al., 2012 ; Al-Sharif et Pradhan, 2013 ; Rahman et al., 2017 ; Satya et al., 2020 ; Alsharif et al., 2022).

Le modèle CA-Markov, qui combine une chaîne de Markov avec des automates cellulaires, s'avère particulièrement performant pour la simulation des dynamiques spatio-temporelles dans des zones caractérisées par des environnements urbains entourés de différentes formes d'occupation du sol.

Ce modèle repose sur deux principes complémentaires :

- **Les Chaînes de Markov (CM)**, qui permettent d'estimer les probabilités de transition entre différentes classes d'occupation du sol sur la base de deux images de dates distinctes ;
- **Les Automates Cellulaires (CA)**, qui intègrent les effets du voisinage spatial afin de modéliser les processus locaux d'expansion ou de contraction des classes de l'occupation et de la couverture du sol.

En combinant ces deux approches, le modèle CA-Markov fournit une simulation plus réaliste des changements futurs, tenant compte à la fois des tendances temporelles et des interactions spatiales.

L'expression mathématique suivante est utilisée pour prédire l'occupation du sol à une date future :

$$\mathbf{S}(t, t + 1) = \mathbf{P}_{ij} + \mathbf{S}(t) \quad (\text{III.3})$$

Où :

- $\mathbf{S}(t)$: est le vecteur d'état représentant la répartition des classes d'occupation du sol à l'instant t ;
- $\mathbf{S}(t + 1)$: Est le vecteur d'état prédit pour le temps $t+1$.
- $\mathbf{P}_{ij}$: Est la matrice de transition de Markov, contenant les probabilités de passage d'une classe à une autre (Mathanraj et al. 2021) :

$$\|\mathbf{P}_{ij}\| = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{1,1} & \mathbf{P}_{1,2} & \dots & \dots & \mathbf{P}_{1,N} \\ \mathbf{P}_{2,1} & \mathbf{P}_{2,2} & \dots & \dots & \mathbf{P}_{2,N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{P}_{N,1} & \mathbf{P}_{N,2} & \dots & \dots & \mathbf{P}_{N,N} \end{bmatrix} \quad (\text{III.4})$$

Dans ce contexte, $\mathbf{P}_{ij}$ représente la probabilité de transition de l'état i (état initial) vers l'état j (état futur). Selon Mathanraj et al. (2021) et Hamad et al. (2018), une probabilité de transition faible tend vers 0, traduisant une faible propension au changement, tandis qu'une probabilité élevée se rapproche de 1, indiquant une forte tendance à évoluer vers une autre classe d'occupation du sol.

Dans le cadre de cette étude, la matrice de probabilité de transition a été générée pour la période 2001–2021, afin d'évaluer les dynamiques de changement des classes. Cette matrice constitue une base essentielle pour la modélisation prospective, en permettant de projeter l'évolution des occupations du sol.

À partir de cette matrice, des simulations ont été réalisées pour trois horizons temporels successifs de dix ans, afin de prédire les scénarios possibles pour les années 2031, 2041 et 2051.

L'implémentation du modèle d'automates cellulaires (CA) repose sur l'équation suivante, telle que proposée par Mathanraj et al. (2021) :

$$\mathbf{S}(t, t + 1) = \mathbf{f}(\mathbf{S}(t), \mathbf{N}) \quad (\text{III.5})$$

Dans ce processus, l'état futur ($t+1$) d'un pixel est déterminé par la probabilité de transition entre états à tout moment donné. Les cartes d'occupation du sol pour les années 2001, 2006,

2011, 2016 et 2021 ont été extraites à partir des images satellites Landsat, et ont servi de base pour l'analyse spatio-temporelle.

Les cartes de l'occupation et de la couverture du sol des années 2001 et 2021 ont été utilisées comme données d'entrée pour l'entraînement du modèle, les probabilités de conversion étant dérivées du modèle de chaîne de Markov (MC) (Figure III.1).

L'étape suivante a consisté à générer une matrice de transition, utilisée pour produire des cartes de probabilités conditionnelles, conformément à l'approche de Sarkar et Chouhan (2019). Ces cartes traduisent, à l'échelle du pixel, la probabilité de transition d'une classe d'occupation du sol à une autre.

La carte de l'occupation et de la couverture du sol de 2021 a été considérée comme carte de base, combinée à la matrice de transition et aux cartes de probabilités conditionnelles établies sur la période 2001–2021 (Figure III.1), afin de modéliser les états futurs.

Par ailleurs, plusieurs couches d'information spatiale ont été intégrées dans un modèle de type perceptron multicouche (MLP), pour améliorer la précision des prédictions des cartes de l'occupation et de la couverture du sol pour les années 2031, 2041 et 2051. Ces variables explicatives comprenaient (Figure III.7)

- Le modèle numérique de terrain (MNT).
- La carte des pentes.
- La carte d'exposition (orientation des versants).
- La densité de population.
- La distance aux routes.
- La distance aux rivières.

La matrice de transition, élaborée à partir des cartes de l'occupation et de la couverture du sol des différentes périodes d'analyse, permet de quantifier les probabilités de transition entre les diverses classes d'occupation du sol. Ces probabilités ont été calculées en déterminant le pourcentage de pixels ayant changé de classe entre deux dates spécifiques. Par exemple, la probabilité de transition des terres agricoles vers les sols nus a été estimée à partir de la comparaison des cartes de l'occupation et de la couverture du sol de 2001 et 2006.

Les valeurs obtenues ont été intégrées dans la matrice de transition, laquelle a ensuite été ajustée à l'aide d'une expertise locale afin de corriger certaines transitions spécifiques. Ces ajustements ont notamment concerné les changements influencés par l'expansion urbaine, les dynamiques démographiques ou encore les modifications des politiques d'aménagement du territoire. Cette phase d'ajustement, fondée sur une connaissance fine du terrain, a permis d'améliorer la représentativité des processus de transformation réellement observés.

La matrice de probabilités de transition ainsi affinée a été intégrée dans le modèle Cellulaire Automate–Chaîne de Markov (CA-MC) pour simuler les évolutions futures de l'occupation du sol aux horizons 2031, 2041 et 2051.

III.5. Architecture du perceptron multicouche (MLP) des réseaux de neurones artificiels (ANN)

La technique du perceptron multicouche (MLP), fondée sur les réseaux de neurones artificiels (ANN), a été mobilisée pour modéliser les potentiels de transition et simuler les cartes d'occupation du sol aux horizons 2031, 2041 et 2051. Cette approche s'appuie sur la capacité du MLP à apprendre des relations non linéaires complexes entre les variables d'entrée et les sorties attendues.

Lors de l'entraînement du modèle, un échantillon de 106 pixels, sélectionnés aléatoirement, a été utilisé. Ces données ont été réparties en deux ensembles : 80 % pour l'apprentissage du réseau et 20 % pour sa validation.

Outre les cartes de l'occupation et de la couverture du sol historiques, six variables explicatives spatiales ont été intégrées au processus d'apprentissage.

Le modèle MLP a été entraîné via un algorithme de rétro propagation du gradient, implémenté à l'aide du module MOLUSCE (Modules for Land Use Change Simulation) dans le logiciel QGIS. Cette méthode ajuste les poids synaptiques du réseau en fonction de l'erreur commise, à l'aide d'un facteur d'impulsion (momentum) afin d'accélérer la convergence et d'éviter les minima locaux.

L'ajustement des poids au cours de l'apprentissage repose sur l'équation suivante :

$$\mathbf{w}(n + 1) = \mathbf{r} * \mathbf{d}_w(n) + \mathbf{m} * \mathbf{d}_w(n - 1) \quad (\text{III. 6})$$

Où :

- w : Est le vecteur de poids de neurones.
- d_w : Est le Vecteur de changements de poids.
- n : Est le numéro d'itération.
- r : Est le taux d'apprentissage.
- m : Est l'impulsion.

Dans cette étude, le modèle a été calibré à partir des données historiques d'occupation du sol couvrant la période de 2001 à 2021, et les règles de transition ont été dérivées de ces données. De plus, le composant Automates Cellulaires (AC) a été intégré aux Réseaux de Neurones Artificiels (RNA) afin d'améliorer la précision des prévisions, en générant des cartes de

potentiel de transition et de certitude de transition. Ces cartes indiquent non seulement la probabilité des transitions de couverture terrestre, mais aussi les niveaux de confiance associés à ces prédictions.

Trois éléments essentiels résument la relation entre le Perceptron Multicouche (MLP), les Automates Cellulaires (AC) et la Chaîne de Markov (MC) :

1. Cartes de potentiel de transition générées par le MLP : Ces cartes représentent, à une échelle spatiale fine, la probabilité qu'un pixel donné change de classe d'occupation du sol, en fonction de variables explicatives telles que l'altitude, la pente, l'exposition, la distance aux infrastructures et la densité de population. Elles constituent une composante essentielle du modèle CA-Markov.
2. Intégration du modèle CA-Markov : Le modèle CA-Markov combine les probabilités de transition temporelles issues de l'analyse markovienne avec les potentiels de transition spatiale générés par le MLP. Cette approche conjointe permet de simuler l'évolution de l'occupation du sol à la fois selon une logique probabiliste temporelle et selon une distribution spatiale déterminée par les conditions locales, renforçant ainsi la capacité prédictive du modèle.
3. Interaction entre le MLP et le modèle CA-Markov : Cette interaction permet d'améliorer la robustesse et la précision des prévisions de changement d'occupation du sol. Elle prend en compte à la fois les dynamiques passées (2001–2021) et les facteurs spatiaux explicatifs, offrant une approche intégrée qui est particulièrement efficace pour simuler les trajectoires futures de l'occupation et de la couverture du sol aux horizons 2031, 2041 et 2051.

La Figure III.1 illustre la méthodologie complète d'analyse de l'utilisation et de la couverture des terres, intégrant des techniques avancées telles que les chaînes de Markov (MC), les automates cellulaires (CA) et les réseaux de neurones à perceptron multicouche (MLP). Elle retrace l'ensemble du processus, depuis l'acquisition des données (imagerie satellitaire, modèle numérique d'élévation) jusqu'à la classification supervisée par maximum de vraisemblance (MLC), la détection des changements, et la simulation prospective des scénarios de l'occupation et de la couverture du sol. L'intégration du modèle hybride MC–CA couplé au MLP améliore significativement la robustesse des prédictions en combinant l'analyse temporelle, les potentialités spatiales et les mécanismes locaux de transition. Enfin, l'évaluation de la précision, couplée à la validation croisée à l'aide des cartes réelles, garantit la fiabilité des résultats et soutient l'élaboration de stratégies durables de gestion du territoire et des ressources naturelles.

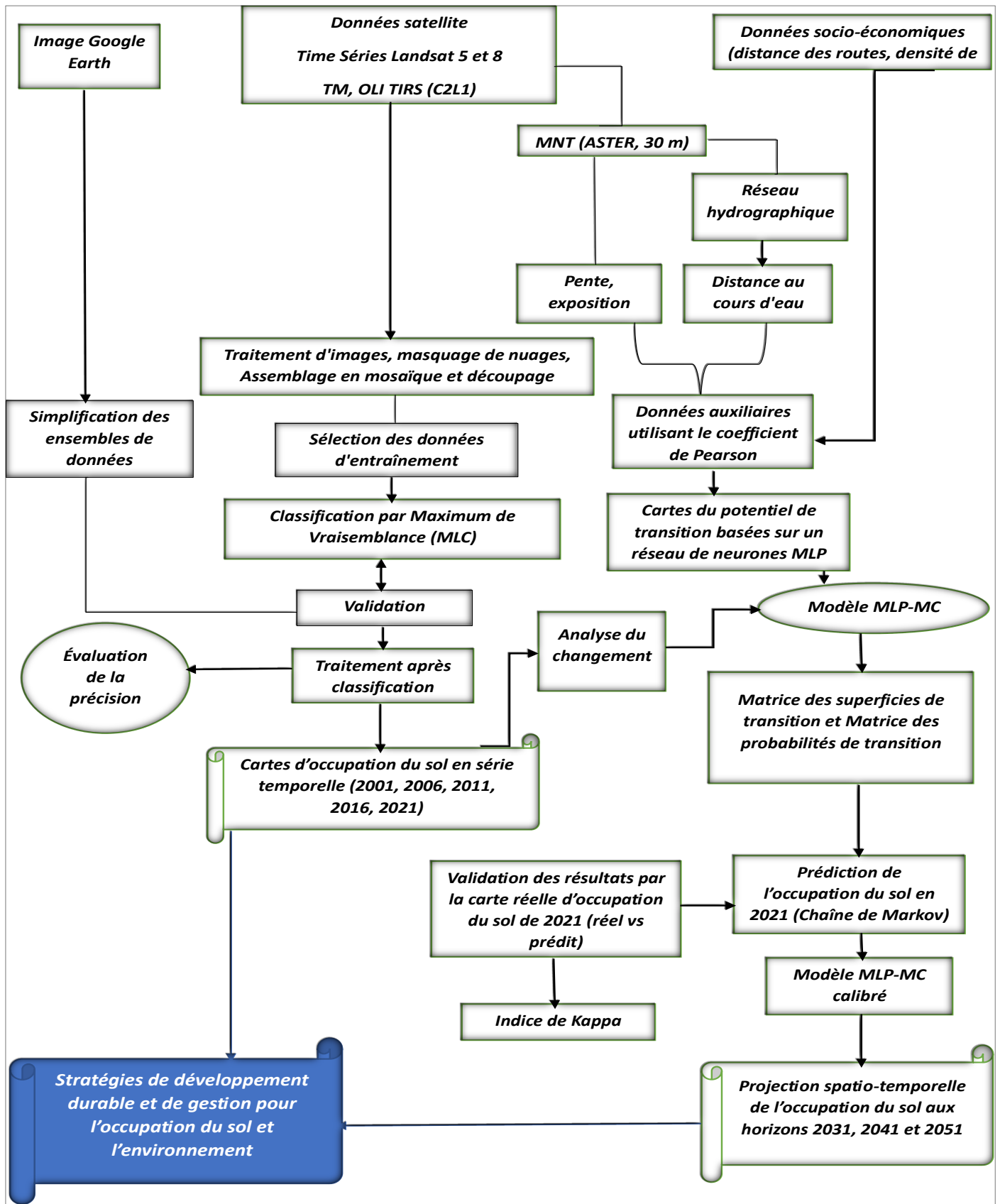


Figure III.1. Schéma conceptuel représentant la méthodologie adoptée pour la prévision des changements d'occupation du sol.

III.6 Évolution spatio-temporelle de l'occupation du sol dans le bassin versant étudié

Les classes d'occupation du sol décrites dans cette étude couvrent plusieurs catégories distinctes, chacune correspondant à un type spécifique d'usage des terres :

- La classe bâtie englobe les unités industrielles et commerciales, les zones résidentielles, ainsi que les espaces urbains à usage mixte.
- La classe forestière regroupe l'ensemble des terres boisées, incluant aussi bien les forêts denses que les formations arborées clairsemées.
- La zone arbustive est dominée par une végétation basse composée principalement d'arbustes.
- Les terres agricoles correspondent aux surfaces cultivées, utilisées pour des cultures annuelles ou pérennes à vocation agricole.
- Les prairies désignent des zones herbacées naturelles ou semi-naturelles, constituant des habitats importants pour la biodiversité.
- Enfin, les sols nus font référence aux surfaces de sol dépourvues de couverture végétale significative, généralement sableuses ou rocailleuses, et considérées comme improductives.

La Figure 2 présente les cartes de classification supervisée de l'utilisation et de la couverture des sols pour les années 2001, 2006, 2011, 2016 et 2021. Élaborées à l'aide de la méthode de classification par maximum de vraisemblance (*Maximum Likelihood Classification*, MLC), ces cartes couvrent l'ensemble de la zone d'étude et offrent une représentation spatiale détaillée de l'occupation du sol. Chaque classe y est quantifiée à la fois en superficie (km²) et en pourcentage de la superficie totale, permettant une analyse rigoureuse des dynamiques spatio-temporelles de l'évolution du territoire sur les deux dernières décennies.

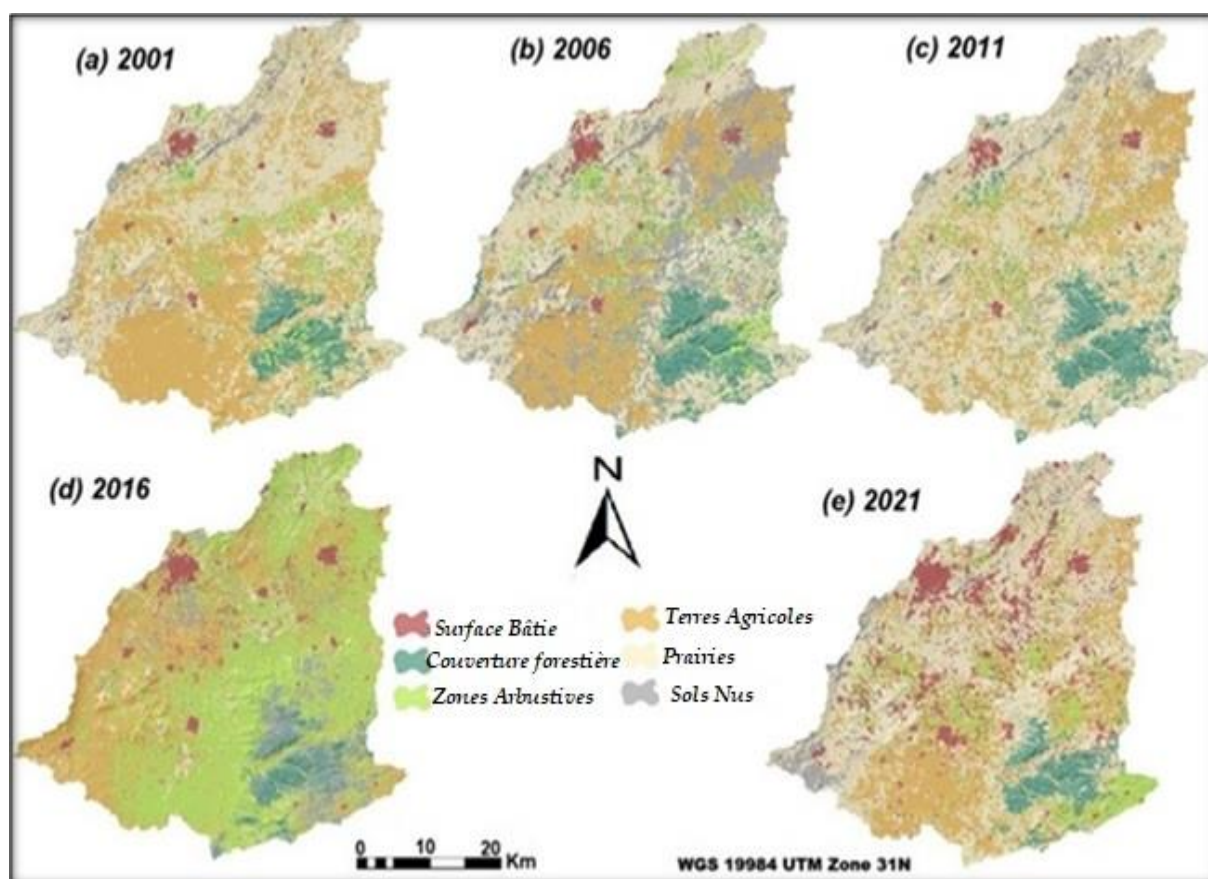


Figure III.2.Cartes de classification supervisée de l'occupation et de l'utilisation des terres dans la zone d'étude pour les années : (a) 2001, (b) 2006, (c) 2011, (d) 2016 et (e) 2021.

L'évaluation de la précision des classifications de l'occupation et de la couverture du sol réalisées entre 2001 et 2021 met en évidence la performance globale du processus de classification supervisée. La précision du producteur (Fig. III.3.a) révèle une forte capacité du modèle à identifier correctement les différentes classes d'occupation du sol, notamment pour les zones bâties, qui ont atteint jusqu'à 98,25 % en 2011, et les zones forestières, dont la précision a culminé à 99,35 % en 2011 et 2021. Les terres arbustives et agricoles ont montré des performances variables, avec des baisses notables en 2006 (87,55 % et 83,80 % respectivement), tandis que les prairies ont maintenu une stabilité autour de 96 %. Les sols nus ont, quant à eux, connu une nette amélioration de leur détection, passant de 87,96 % en 2001 à 95,32 % en 2021. La précision des utilisateurs (Fig. III.3.b) confirme ces tendances, soulignant une excellente fiabilité des classes forestières (jusqu'à 99,84 % en 2016) et bâties (98,49 % en 2016), malgré quelques fluctuations pour les terres agricoles et arbustives. La précision globale des classifications (Fig. III.3.c) varie entre 93,60 % (2006) et 98,06 % (2016), témoignant de la robustesse de l'approche adoptée. Le coefficient de Kappa (Fig.

III.3.d), oscillant entre 0,92 et 0,97, confirme une très bonne concordance entre les classifications générées et les données de référence terrain.

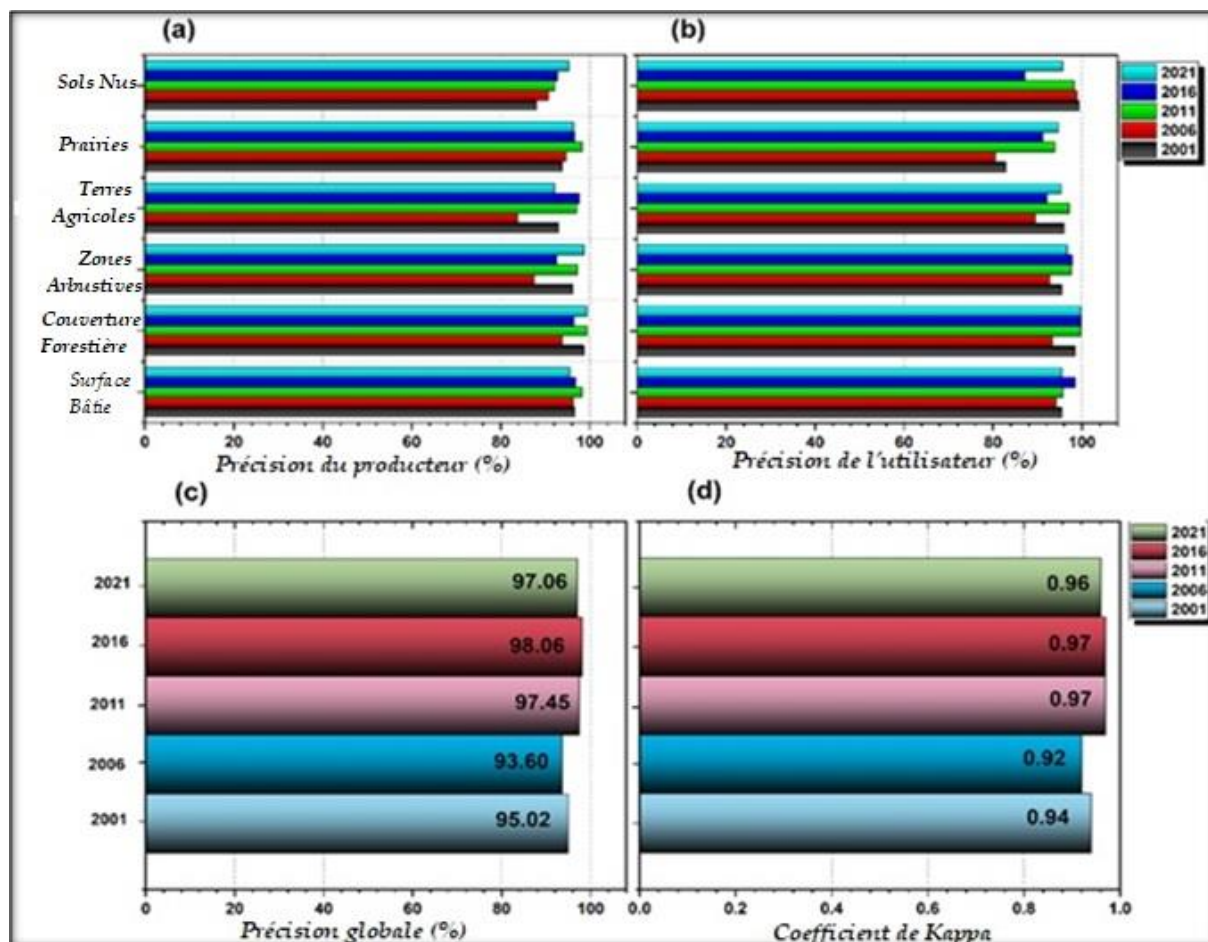


Figure III.3. Évaluation de la précision des classifications de l'occupation et de la couverture du sol pour les années 2001, 2006, 2011, 2016 et 2021, obtenues par la méthode de classification supervisée par maximum de vraisemblance (Maximum Likelihood Classification – MLC).

La représentation quantitative (Figure III.4) permet d'appréhender de manière rigoureuse les dynamiques d'évolution de l'occupation et de la couverture du sol au cours de la période étudiée. Elle met en évidence des transformations significatives de l'occupation spatiale, notamment l'expansion progressive des zones anthropisées, la diminution des terres agricoles et forestières, ainsi que les altérations touchant les écosystèmes naturels, telles que les prairies et les formations arbustives.

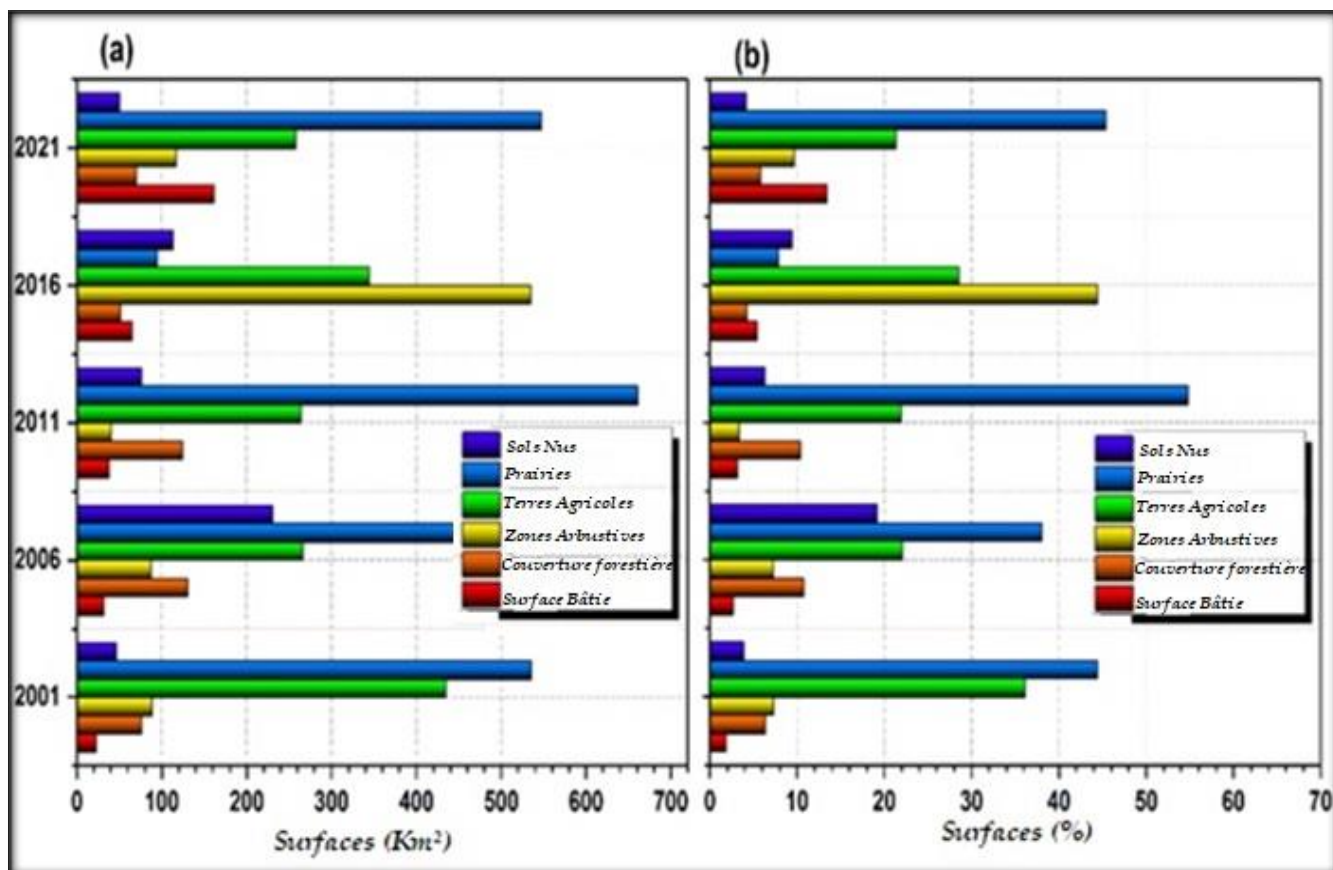


Figure III.4. Superficie des différentes classes d'occupation et de couverture du sol pour les années 2001, 2006, 2011, 2016 et 2021, exprimée en (a) kilomètres carrés (km²) et en (b) pourcentage de la superficie totale de la zone d'étude.

L'analyse de l'évolution de l'occupation et de la couverture du sol au sein du bassin versant d'Oued Fekan révèle des dynamiques variées et complexes, influencées par des facteurs environnementaux et anthropiques :

a) Surface Bâtie

En 2001, l'emprise des zones bâties était relativement modeste (Figure III.5), avec une superficie de 22,61 km², représentant seulement 1,87 % de la surface totale du bassin. Toutefois, cette proportion a connu une croissance soutenue au fil des deux décennies suivantes, atteignant 32,01 km² (2,66 %) en 2006, puis 162,21 km² (13,47 %) en 2021. Cette augmentation exponentielle traduit un processus accéléré d'urbanisation, induit par la pression démographique, l'extension des infrastructures et une intensification progressive de l'occupation anthropique du territoire.

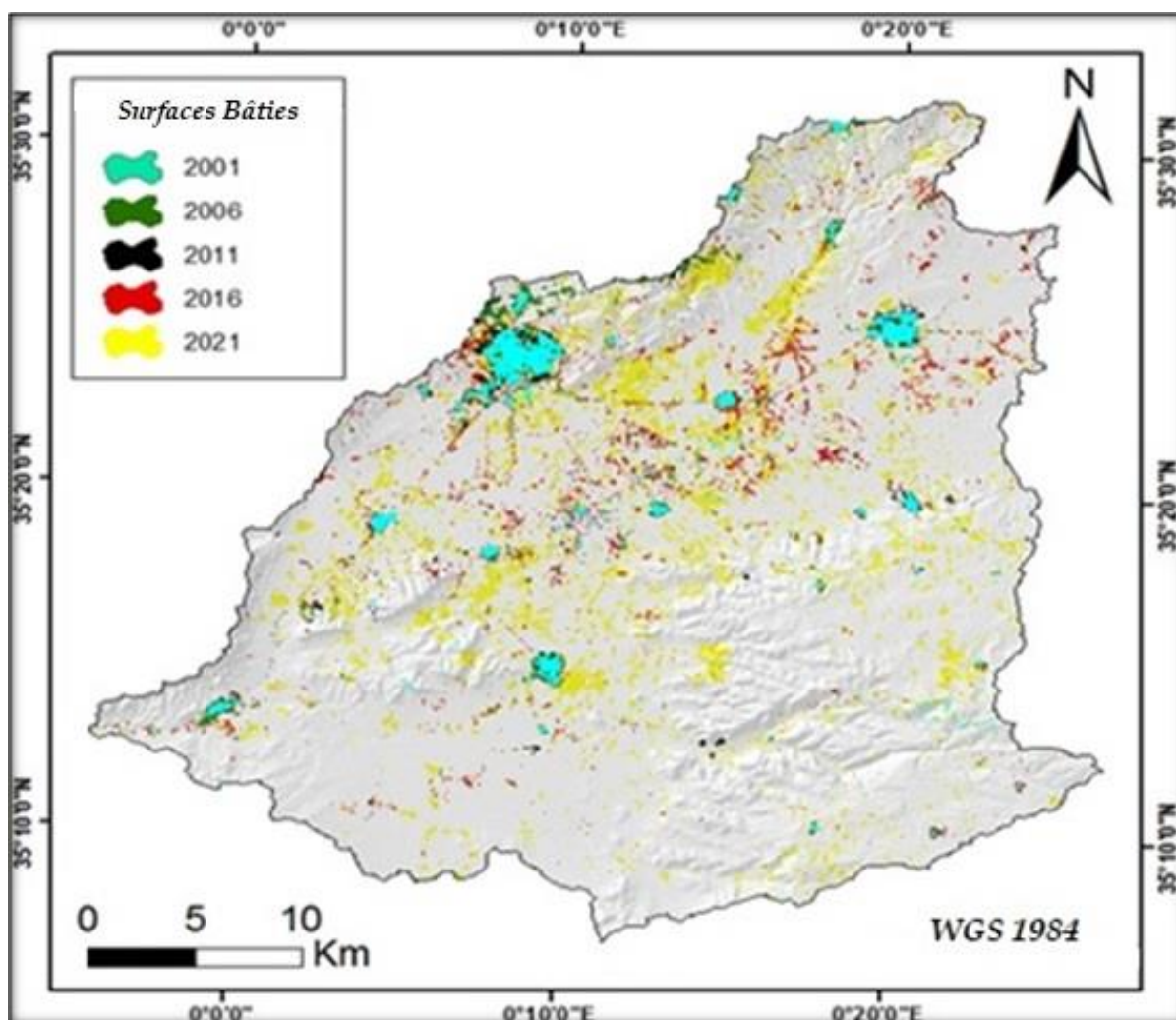


Figure III.5. Évolution spatio-temporelle de la surface bâtie entre 2001 et 2021 du bassin versant étudié.

b. Couverture forestière

En 2001, les formations forestières s'étendaient sur 76,69 km² (6,36 % de la superficie du bassin versant). Cette couverture a connu une hausse significative en 2006, atteignant 130,16 km² (10,80 %). Toutefois, une régression importante a été observée en 2016, où la superficie forestière s'est réduite à 51,22 km² (4,25 %). Une reprise modérée est notée en 2021, avec 70,55 km² (5,85 %).

c. Zones arbustives

En 2001, cette classe couvrait 88,28 km² (7,33 % du territoire). Une stabilité relative a été observée en 2006 avec 88,01 km² (7,30 %). Cependant, une expansion remarquable a été enregistrée en 2016, où la superficie a atteint 535,26 km² (44,42 %). En 2021, une régression notable a eu lieu, avec une superficie de 116,91 km² (9,70 %), ce qui indique une

requalification de ces zones vers d'autres types d'occupation, tels que les cultures ou les zones bâties.

d. Terres agricoles

Les terres agricoles, historiquement dominantes dans l'occupation du bassin versant, représentaient 435,11 km² (36,11 %) en 2001. Toutefois, cette classe a connu un déclin progressif, chutant à 266,18 km² (22,08 %) en 2006, puis à 257,60 km² (21,37 %) en 2021. Cette diminution est le résultat d'une urbanisation accrue, d'une dégradation des terres cultivables, et d'une reconversion vers d'autres usages du sol.

e. Prairies

Les prairies occupaient une surface particulièrement importante en 2001, avec 535,76 km² (44,45 %). Une forte variabilité est cependant observée sur la période étudiée. En 2016, la superficie des prairies a diminué de manière drastique, atteignant seulement 94,91 km² (7,88 %). Cette contraction a été suivie d'un rebond significatif en 2021, où la superficie a atteint 547,11 km² (45,39 %).

f. Sols nus

En 2001, les sols nus couvraient une surface relativement limitée de 46,66 km² (3,88 %). Cependant, une croissance marquée a été observée en 2006, atteignant 230,54 km² (19,14 %), ce qui pourrait témoigner de la dégradation des terres, de phénomènes érosifs ou d'un abandon des terres agricoles. Toutefois, cette tendance s'est inversée en 2021, où les sols nus représentaient seulement 50,73 km² (4,22 %).

III.7 Changement des classes d'occupation du sol dans le bassin versant entre 2001 et 2021

L'analyse diachronique de l'occupation du sol entre 2001 et 2021, illustrée par la figure III.6, met en lumière des changements significatifs au sein du bassin versant étudié. Exprimées à la fois en kilomètres carrés et en pourcentages de la superficie totale, ces évolutions reflètent l'impact combiné des dynamiques anthropiques (urbanisation, agriculture, infrastructures) et des facteurs naturels (climat, érosion, incendies). Cette section vise à détailler l'évolution quantitative des principales classes d'occupation du sol, tout en identifiant les processus sous-jacents ayant influencé ces transformations.

a. Surface bâtie

La surface bâtie a connu une progression spectaculaire au cours des deux dernières décennies. Entre 2001 et 2006, elle a augmenté de 9,4 km², soit +41,57 %. Cette croissance s'est accélérée : +15,84 km² (+70,06 %) en 2011, +42,92 km² (+189,83 %) en 2016. En 2021, l'extension cumulée atteint 139,6 km² supplémentaires par rapport à 2001, soit une hausse remarquable de +617,43 %.

b. Couverture forestière

La forêt a connu une évolution moins linéaire. Une première phase d'expansion a été enregistrée entre 2001 et 2006 (+53,47 km², soit +69,72 %) puis entre 2006 et 2011 (+48,26 km², +62,93 %). À partir de 2011, la tendance s'inverse avec une régression de -25,47 km² (-33,21 %) en 2016, suivie d'une nouvelle baisse de -6,14 km² (-8,01 %) en 2021. Ces variations sont le résultat d'activités telles que le défrichement, les incendies, la reconversion des forêts en terres agricoles et urbanisées, ou encore des modifications méthodologiques dans la classification des couvertures végétales.

c. Zones arbustives

La classe des formations arbustives montre une évolution très contrastée. Une baisse marginale de -0,27 km² (-0,31 %) est observée entre 2001 et 2006, suivie d'une chute significative de -47,58 km² (-53,90 %) en 2011. Toutefois, une inversion spectaculaire s'est produite entre 2001 et 2016, avec une augmentation de +446,98 km² (+506,32 %), prolongée par une croissance modérée de +28,63 km² (+32,43 %) jusqu'en 2021.

d. Terres agricoles

Les surfaces agricoles ont connu un déclin continu et prononcé. Entre 2001 et 2006, elles ont diminué de -168,93 km² (-38,82 %), puis de -171,04 km² (-39,31 %) en 2011. La tendance s'est poursuivie en 2016 avec -90,53 km² (-20,81 %) et a culminé en 2021 avec une perte totale de -177,51 km² (-40,80 %) par rapport à 2001. Cette régression est attribuée à la pression de l'urbanisation, à l'abandon des terres agricoles et à la dégradation des sols.

e. Prairies

Les prairies ont présenté une évolution très instable. Une baisse initiale de -77,55 km² (-14,47 %) est observée entre 2001 et 2006, suivie d'une remontée de +124,83 km² (+23,30 %) en 2011. Toutefois, la période 2001-2016 est marquée par une forte contraction de -440,85 km² (-82,28 %). En 2021, une légère reprise a été notée avec +11,35 km² (+2,12 %),

suggérant un retour partiel de cette occupation. Ces variations sont liées à la variabilité climatique et aux pratiques de pâturage.

f. Sols nus

Les sols nus ont connu une expansion considérable au début de la période. Entre 2001 et 2006, leur surface a bondi de +183,88 km² (+394,08 %), puis de +29,69 km² (+63,63 %) en 2011. La progression s'est poursuivie en 2016 (+66,95 km², soit +143,48 %), avant de ralentir en 2021 avec une hausse modeste de +4,07 km² (+8,72 %). Cette dynamique pourrait traduire une dégradation des terres due à la désertification, à l'érosion, ou à l'abandon des terres agricoles.

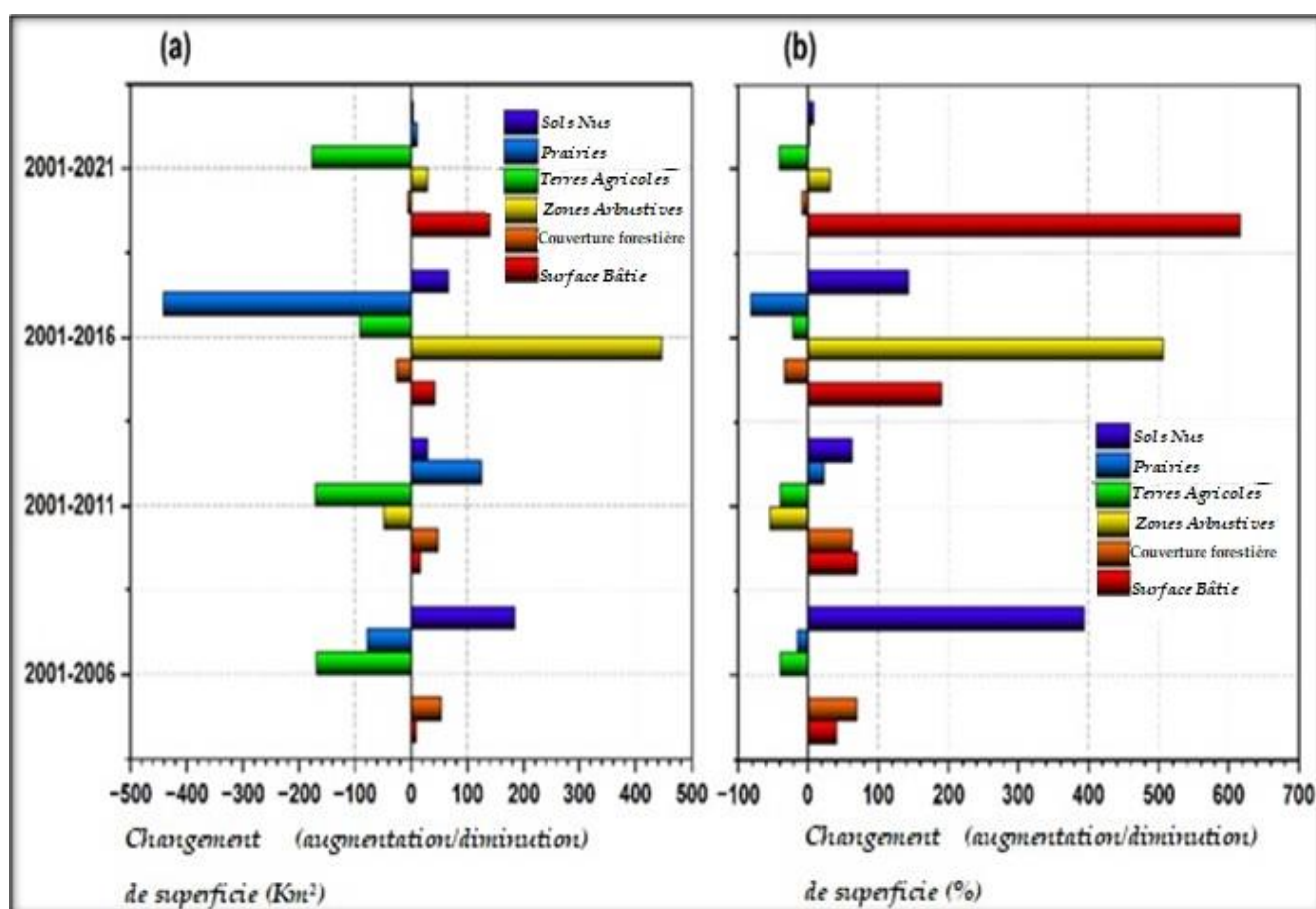


Figure III.6. Évolution spatio-temporelle des différentes classes d'occupation du sol dans la zone d'étude entre 2001 et 2021, exprimée en (a) superficie (km²) et (b) pourcentage (%) de la superficie totale.

III.8 Corrélations spatiales entre variables environnementales et anthropiques dans la dynamique territoriale

Le tableau III.2 présente les coefficients de corrélation de Pearson entre les variables spatiales, permettant d'explorer les relations linéaires entre les facteurs environnementaux et anthropiques influençant la dynamique territoriale de la zone d'étude.

a) Facteurs environnementaux :

Le Modèle Numérique de Terrain (MNT), la pente, la distance aux cours d'eau, l'exposition (aspect). Ces facteurs sont liés aux caractéristiques naturelles du terrain, telles que l'altitude, le relief, la proximité des ressources en eau et les conditions climatiques liées à l'orientation du terrain.

b) Facteurs anthropiques :

La densité de population, la distance à la route. Ces facteurs reflètent l'impact des activités humaines sur le territoire, notamment l'implantation humaine et l'infrastructure de transport.

Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) montre une corrélation négative notable avec la densité de population ($-0,4625$), suggérant que les zones situées à des altitudes plus élevées tendent à être moins densément peuplées. Cela peut être attribué à l'accessibilité réduite, aux contraintes topographiques, ou à des conditions climatiques moins favorables dans les régions en altitude.

En revanche, le MNT présente des corrélations positives avec la distance aux cours d'eau ($0,4098$) et la pente ($0,3986$), ce qui implique que les zones situées en altitude sont généralement plus éloignées des principaux cours d'eau et caractérisées par un relief plus accidenté. La corrélation avec l'exposition (aspect) est plus faible ($0,1092$), tandis qu'une corrélation modérément positive est observée avec la distance à la route ($0,2657$), ce qui peut refléter la moindre densité du réseau routier en zones de haute altitude.

La densité de population, quant à elle, est négativement corrélée à la distance aux cours d'eau ($-0,1595$) et à la pente ($-0,2357$), indiquant que les populations se concentrent préférentiellement dans des zones proches des ressources hydriques et caractérisées par un relief relativement plat. La corrélation avec l'exposition est légèrement négative ($-0,0926$), tandis qu'une corrélation plus marquée est observée avec la distance à la route ($-0,2819$), ce qui traduit une tendance à l'implantation humaine à proximité des axes de transport.

Concernant la distance aux cours d'eau, une corrélation positive est observée avec la pente ($0,2779$), suggérant que les terrains plus éloignés des rivières sont souvent situés en zones plus escarpées. La corrélation avec l'exposition est négligeable ($-0,0106$), tandis que la

relation avec la distance à la route demeure faible mais positive (0,1114), traduisant une certaine indépendance spatiale entre ces deux variables.

La pente est également corrélée positivement à la distance à la route (0,2845), ce qui laisse supposer que les infrastructures routières sont moins développées ou moins accessibles dans les zones à relief prononcé. Quant à l'exposition, elle n'affiche qu'une corrélation très faible avec la distance à la route (0,0290), traduisant une influence marginale sur l'organisation spatiale de l'infrastructure.

Ces résultats mettent en évidence des interdépendances spatiales complexes entre les facteurs physiques du terrain et les dynamiques d'occupation humaine, soulignant l'importance d'intégrer ces facteurs dans les modèles de prévision de l'occupation du sol et dans les stratégies de planification territoriale.

Tableau III.2. Coefficients de corrélation de Pearson entre les variables spatiales du bassin versant d'étude.

	MNT	Densité de population	Distance aux cours d'eau	Pente	Exposition	Distance à la route
MNT	1	-0.4625	0.40976	0.39861	0.10917	0.26566
Densité de population		1	-0.1595	-0.2357	-0.0926	-0.2819
Distance aux cours d'eau			1	0.2779	-0.0106	0.11143
Pente				1	0.02432	0.28451
Exposition					1	0.02896
Distance à la route						1

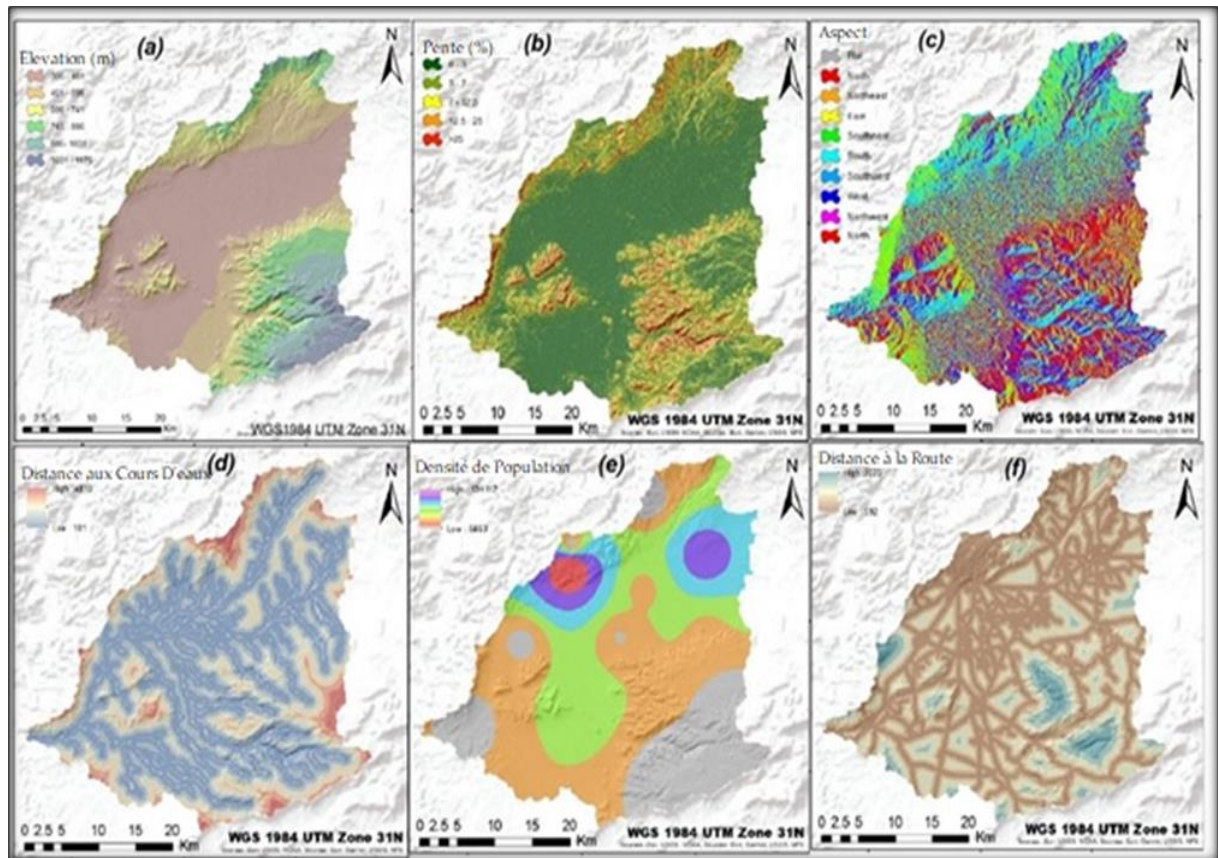


Figure III.7. Représentations spatiales des facteurs explicatifs : (a) Modèle Numérique de Terrain (MNT), (b) Pente, (c) Exposition, (d) Distance aux Cours d'Eau, (e) Densité de Population et (f) Distance aux Routes.

III.9 Évaluation de la Précision du Modèle MLP-MOLUSCE pour la Simulation de l'occupation du Sol en 2021

Le modèle MLP intégré au plugin MOLUSCE s'est révélé particulièrement efficace pour modéliser des relations complexes et non linéaires entre les variables explicatives et les changements d'occupation du sol. En s'appuyant sur les données historiques de l'occupation et de la couverture du sol, il permet la prédiction de scénarios futurs de manière spatialement explicite, en tenant compte de dynamiques telles que l'expansion urbaine, la déforestation ou la régression des terres agricoles.

L'évaluation de la précision de la simulation réalisée pour l'année 2021 démontre la robustesse du modèle. En effet, la précision globale atteint 96,49 %, ce qui indique une forte concordance entre les prévisions du modèle et les observations réelles. Par ailleurs, le coefficient kappa global de 0,68 révèle une cohérence modérée. Les valeurs kappa spécifiques

à la simulation — 0,98 pour l'histogramme, 0,97 pour la localisation, et 0,95 pour l'ensemble — confirment la capacité du modèle à reproduire fidèlement les tendances spatiales.

Les figures III.8 et III.9 offrent une comparaison entre les données réelles (carte d'occupation de sol de l'année 2021) et les projections du modèle de l'occupation et de la couverture du sol pour l'année 2021.

Le modèle MLP (Perceptron Multicouche), intégré dans le module MOLUSCE de QGIS, est particulièrement adapté pour traiter des relations complexes et non linéaires entre les facteurs explicatifs et les dynamiques de l'occupation du sol. Ce modèle permet de générer des projections spatiales de l'évolution future de l'utilisation des terres, en tenant compte des dynamiques de changement telles que l'expansion urbaine, la déforestation, ou encore les transformations agricoles. En se basant sur des séries temporelles de données historiques sur l'occupation du sol, le modèle MLP permet de simuler des scénarios futurs détaillés et réalistes des changements à l'échelle spatiale.

L'évaluation de la précision de la simulation pour l'année 2021 a révélé une correspondance remarquable avec les données observées sur le terrain. La précision globale du modèle a été estimée à 96,49 %, un chiffre indiquant une excellente correspondance entre les cartes projetées et les cartes réelles de l'occupation du sol. Ce résultat souligne la capacité du modèle à prédire les changements dans l'utilisation des terres avec une grande fidélité.

En outre, le Coefficient de Variation Kappa (CVK), une mesure standardisée de la concordance entre les cartes simulées et observées, a atteint une valeur de 0,68. Ce score indique une concordance modérée à substantielle entre les projections du modèle et les données réelles. Il est important de souligner que ce coefficient permet d'évaluer la précision globale du modèle, en tenant compte de la répartition spatiale des différentes classes d'occupation du sol.

Les indices Kappa spécifiques à la simulation fournissent également des informations détaillées sur la qualité de la simulation pour chaque aspect du modèle. Le score Kappa pour l'histogramme (quantité globale) a atteint 0,95, ce qui indique que le modèle a bien prédit la quantité totale de chaque classe d'occupation du sol. Le score Kappa pour la localisation (répartition spatiale) a été de 0,98, ce qui montre que les zones où les changements d'occupation du sol ont eu lieu sont très bien représentées dans la simulation. Enfin, le Kappa pour la concordance combinée, qui mesure l'exactitude globale, a atteint 0,97, confirmant que le modèle a bien reproduit les tendances spatiales des changements observés.

Ces résultats montrent la robustesse et la fiabilité du modèle MLP-MOLUSCE dans la simulation des évolutions de l'occupation du sol, et en particulier sa capacité à intégrer des

facteurs complexes dans la modélisation spatiale des dynamiques de changement. De plus, cette évaluation confirme que le modèle peut être un outil précieux pour la planification territoriale et la gestion durable des ressources naturelles, en fournissant des prévisions fiables qui peuvent guider les décisions sur l'utilisation future des terres dans le bassin versant étudié.

Tableau III.3. Indicateurs de performance du modèle MLP pour la simulation de l'occupation du sol

%de correction	CVK	Valeurs de Kappa de simulation		
		Global	Histogramme	Localisation
96.49	0.68	0.95	0.98	0.97

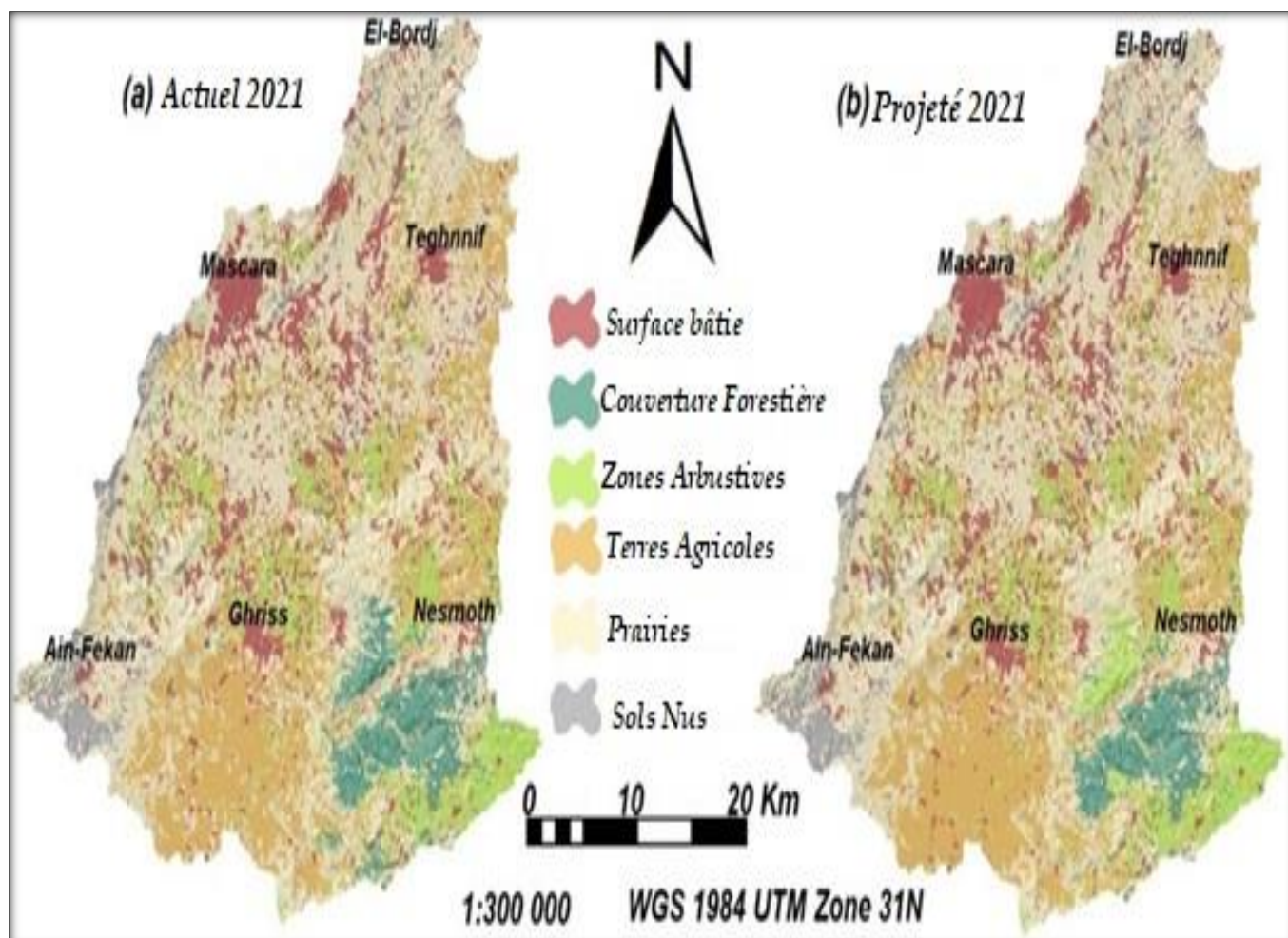


Figure. III.8. Représentation cartographique de l'occupation du sol : (a) classification réelle et (b) projection simulée des différentes classes d'occupation et d'utilisation des terres au sein de la zone d'étude.

La comparaison entre les cartes simulées et les observations réelles pour l'année 2021 permet de dégager plusieurs tendances marquantes dans l'évolution de l'occupation et de l'utilisation des terres au sein du bassin versant étudié.

La surface bâtie réelle en 2021 était estimée à 162,21 km², soit 13,47 % de la superficie totale. La projection du modèle indique une valeur légèrement inférieure de 160,73 km² (13,33 %), traduisant une forte concordance entre les observations et les prévisions. En revanche, la couverture forestière présente un écart notable : elle est estimée à 70,55 km² (5,85 %) dans les données réelles, contre 50,51 km² (4,19 %) dans la simulation. La catégorie des zones arbustives montre une tendance inverse, avec une superficie observée de 116,91 km² (9,70 %) contre 132,82 km² (11,02 %) dans les prévisions. Les terres agricoles affichent une progression marquée, passant de 257,60 km² (21,37 %) à 345,22 km² (28,64 %) selon la projection. À l'inverse, les prairies montrent une régression significative, passant de 547,11 km² (45,39 %) à 504,31 km² (41,84 %). Les sols nus, quant à elles, sont appelées à diminuer fortement, de 50,73 km² (4,22 %) à 11,52 km² (0,98 %).

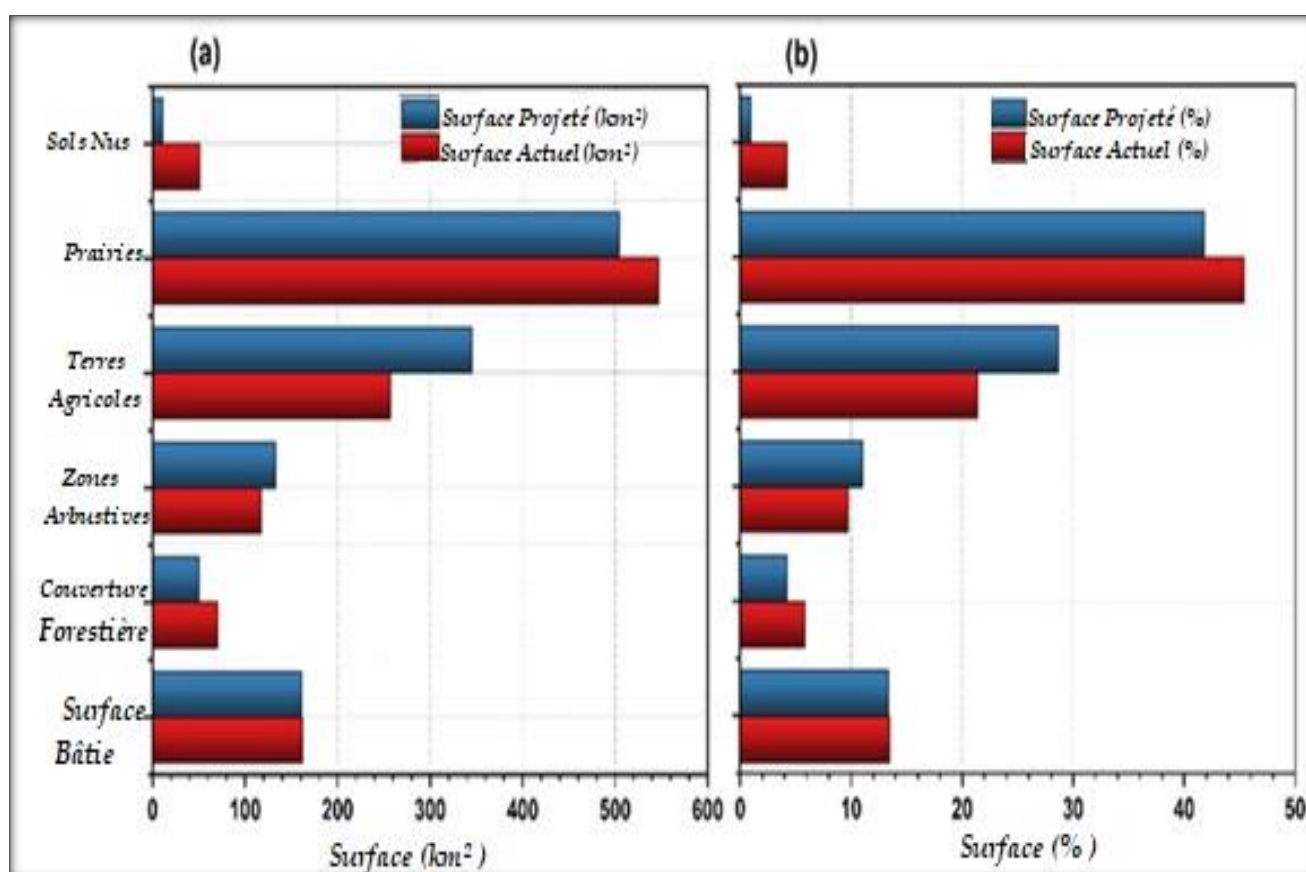


Figure. III.9. Comparaison entre l'occupation du sol observée et simulée pour l'année 2021, exprimée en (a) superficie (km²) et (b) proportion relative (%) par rapport à la superficie totale de la zone d'étude.

III.10 Validation et analyse des performances du modèle CA-ANN dans la simulation spatio-temporelle des changements d'occupation du sol

Dans cette étude, le modèle a été calibré à partir des données historiques d'occupation et d'utilisation des sols sur la période 2001–2021. Les règles de transition spatiale ont été extraites à partir de l'analyse diachronique des changements survenus au cours de cette période. L'approche hybride combinant Réseaux de Neurones Artificiels (RNA) et Automates Cellulaires (AC) a permis de générer deux types de cartes fondamentales pour l'analyse prospective :

- Des cartes de potentiel de transition, représentant la probabilité de changement d'affectation du sol,
- Et des cartes de certitude, traduisant le niveau de confiance attribué à chaque prévision spatiale.

Tableau III.4. Paramètres du modèle et indicateurs de performance pour la prévision des changements d'occupation et d'utilisation des sols par l'approche CA-ANN sur la période 2021–2051.

Occupation du sol (LULC)	LULC 2021	LULC 2031	LULC 2041	LULC 2051
Raster en entrée de l'occupation du sol	LULC 2011, 2016 et les six variables spatiales	LULC 2011, 2021 et les six variables spatiales	LULC 2021, 2031 et les six variables spatiales	LULC 2011, 2031 et les six variables spatiales
Voisinage (px)	25	25	25	25
Taux d'apprentissage	0.001	0.001	0.001	0.001
Nombre maximal d'itérations	100	100	100	100
Couches cachées	12	20	25	20
Moment	0.001	0.001	0.001	0.001
CVK	0.68	0.65	0.93	0.73

L'interprétation des cartes de certitude issues des simulations (Fig. III.10.a à d) met en évidence une évolution progressive du niveau de fiabilité du modèle selon les horizons temporels.

- **2021 (Fig. III.10.a) :** Cette carte constitue un **outil de validation** comparatif avec les données réelles. Elle présente un **niveau de certitude globalement élevé**, indiquant une bonne adéquation entre les prévisions et les observations. Quelques zones à faible certitude soulignent toutefois des secteurs instables, nécessitant un suivi particulier.

- **2031 (Fig. III.10.b) :** Une **augmentation de la variabilité spatiale** est observée, avec des valeurs de certitude allant de 0 à 97. Cette dispersion reflète l'émergence de zones où les transitions sont moins bien appréhendées par le modèle, en raison d'incertitudes structurelles, de changements rapides ou de perturbations non anticipées.
- **2041 (Fig. III.10.c) :** Une **amélioration significative** des performances est notée, avec une certitude maximale atteignant 99 et une minimale de 2. Cette tendance suggère une **stabilisation des dynamiques d'occupation du sol**, traduisant une meilleure corrélation entre les variables explicatives et les évolutions spatiales.
- **2051 (Fig. III.10.d) :** La **consolidation du modèle** se confirme avec un niveau de certitude toujours élevé (max. 99). Cependant, la réapparition de **zones à très faible certitude** (proches de 0) interpelle sur de possibles influences externes ou des facteurs non intégrés dans le modèle (changements climatiques, politiques publiques, migration, etc.), qui pourraient affecter la validité des prévisions à long terme.

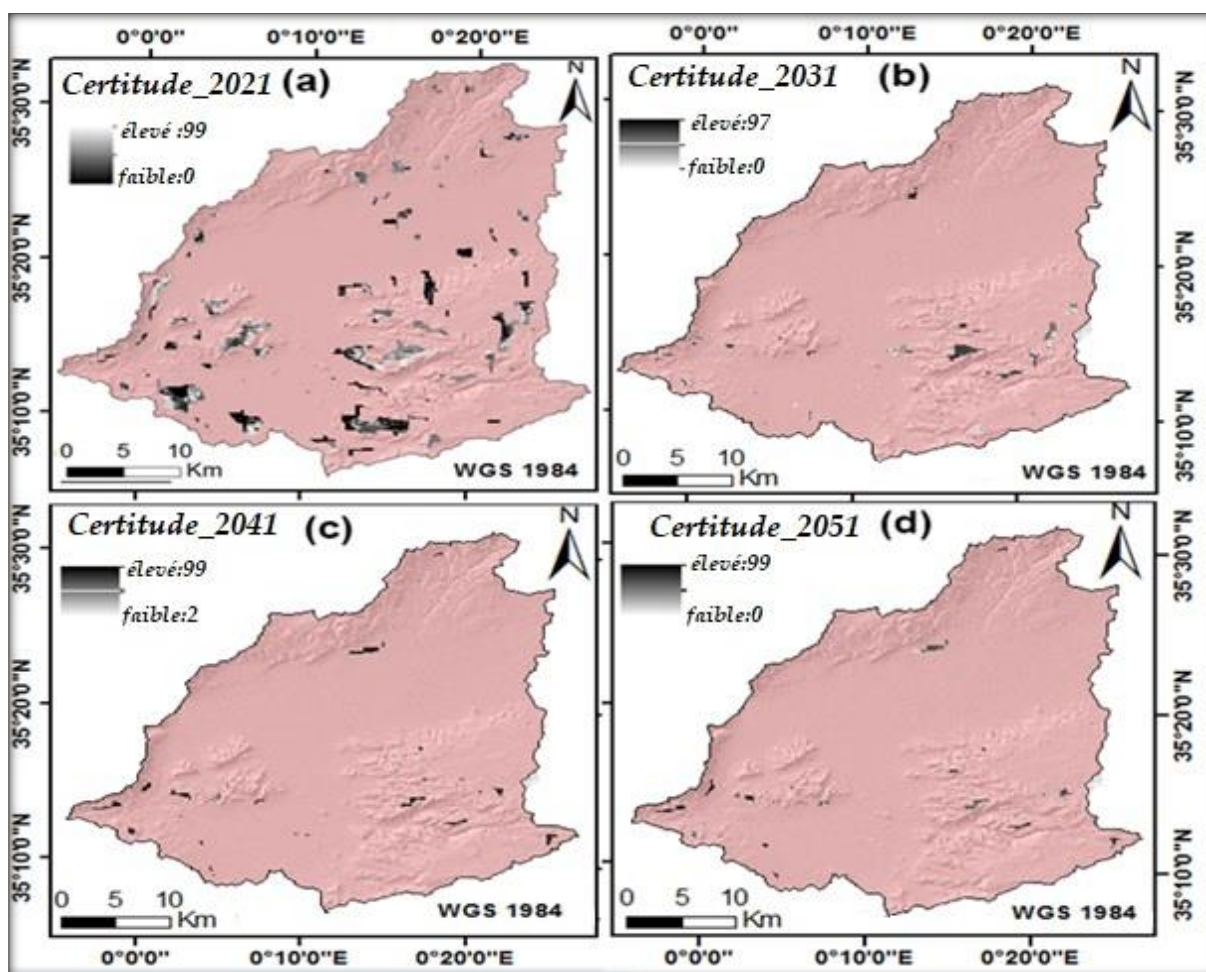


Figure III.10. Cartes de probabilité de validation du modèle de transition spatiale pour les années : (a) 2021, (b) 2031, (c) 2041 et (d) 2051, à l'échelle du bassin versant étudié

III.11 Les dynamiques de transition des classes d'occupation du sol entre 2001 et 2021

Afin de mieux comprendre les processus spatio-temporels à l'œuvre dans l'évolution de l'occupation et de l'utilisation des sols, une matrice de transition a été établie sur une période de cinq ans, couvrant la période 2001–2021. Cette matrice met en évidence les flux de conversion entre les différentes classes d'occupation du sol, en exprimant les proportions de surface ayant changé d'affectation. L'analyse de ces transitions permet de caractériser les niveaux de stabilité, de réversibilité et de transformation des différentes unités paysagères.

III.11.1 La matrice de transition pour la période 2001–2006 (Fig. III.11.a)

Elle met en lumière les dynamiques spatio-temporelles de l'occupation et de l'utilisation des terres dans le bassin versant de l'Oued Fekan, en révélant les probabilités de transformation des différentes classes de couverture terrestre sur un intervalle de cinq ans :

- Les zones bâties se caractérisent par une forte inertie spatiale, avec un taux de persistance atteignant 80 %. Toutefois, une faible proportion (7 %) subit une reconversion en formations arbustives.
- Les formations forestières affichent une relative stabilité (70 %), bien que l'on observe une conversion non négligeable (15 %) vers les zones arbustives.
- Les espaces arbustifs, quant à eux, témoignent d'une grande variabilité, avec seulement 26 % de surfaces maintenues en l'état ; près d'un tiers (30 %) évolue vers des formations forestières, tandis que d'autres portions se transforment en terres agricoles (14 %) ou en prairies (25%).
- Les terres agricoles, elles conservent 43 % de leur emprise initiale mais subissent d'importantes conversions, notamment vers les prairies (28 %) et, dans une moindre mesure, vers des sols dégradés ou nus (19 %).
- Les prairies, relativement stables (54 % de persistance), enregistrent néanmoins une transition significative (22 %) vers des sols nus, indicatrice d'un risque de dégradation écologique sur certaines zones du bassin.
- Enfin, les sols nus, bien qu'ils conservent 49 % de leur superficie initiale, présentent une dynamique de reconversion intéressante, avec 44 % de leurs surfaces évoluant en prairies.

III.11.2 La matrice de transition relative à la période 2006–2011 (Fig. III.11.b)

Elle révèle une évolution marquée de l'occupation du sol dans le bassin versant de l'Oued Fekan :

- Les zones bâties connaissent une baisse significative de leur taux de persistance, avec seulement 55 % de leur superficie initiale maintenue en état urbanisé, tandis qu'une proportion importante (38 %) est reconvertie en prairies.
- Les formations forestières, quant à elles, témoignent d'une stabilité relative avec un taux de rétention de 60 %, bien que l'on note des transitions vers les zones arbustives (4 %) et les terres agricoles (7 %).
- Les espaces arbustifs, caractérisés par une faible inertie spatiale, ne conservent que 24 % de leur surface initiale, près de la moitié (48 %) étant convertie en terres agricoles, ce qui reflète une intensification de l'occupation agricole.
- Les terres cultivées, de leur côté, ne préservent que 47 % de leur étendue d'origine, tandis qu'une part considérable (72 %) est absorbée par l'expansion des zones urbaines, révélant une dynamique soutenue d'urbanisation au détriment des terres productives.
- Les prairies se distinguent par une certaine stabilité (70 %), mais les conversions vers les terres agricoles (15 %) et les formations forestières (6 %) laissent entrevoir une pression croissante sur ces écosystèmes liée à l'évolution des pratiques agro-pastorales.
- Enfin, les sols nus affichent un très faible taux de persistance (15 %), mais leur reconversion majoritaire (60 %) en prairies suggère un potentiel de régénération écologique.

III.11.3 La matrice de transition correspondant à la période 2011–2016 (Fig. III.11.c)

Elle met en évidence que :

- Les zones bâties présentent un taux de persistance particulièrement élevé (90 %).
- En revanche, les formations forestières connaissent une régression marquée, ne conservant que 37 % de leur superficie initiale. Les faibles mais significatives transitions vers les zones arbustives (1,19 %) et les sols nus (0,37 %) suggèrent une pression croissante.
- Les espaces arbustifs, quant à eux, montrent une stabilité modérée avec 46 % de rétention, tandis que d'importantes conversions sont observées vers les terres agricoles (33 %) et, dans une moindre mesure, vers les sols nus (12 %).
- Les terres agricoles subissent également des mutations notables, avec une reconversion de plus de la moitié de leur superficie (56 %) en formations arbustives.

- Les prairies, relativement instables, conservent 47 % de leur surface d'origine, mais sont progressivement converties en terres agricoles (31 %) et en sols nus (7 %), soulignant des processus de dégradation des sols ou une reconversion agro-pastorale.
- Enfin, les sols nus révèlent une faible dynamique de régénération, avec seulement 1,17 % de reconversion vers les formations forestières ; en revanche, des transitions notables vers les terres agricoles (30 %) et les prairies (28 %) sont observées.

III.11.4 La matrice de transition entre 2016 et 2021 (Fig. III.11.d)

Elle a mis en évidence que :

- Les zones bâties présentent un taux de rétention de 67 %, témoignant d'une urbanisation continue. Toutefois, une transition de 28 % vers les prairies a également été observée.
- Les forêts affichent un taux de stabilité élevé de 80 %, avec des transitions marginales vers d'autres types d'occupation du sol. Ce constat reflète l'efficacité des efforts de conservation et la mise en œuvre de pratiques de gestion durable dans ces zones.
- Les formations arbustives montrent un faible taux de rétention (10 %) et se transforment en grande partie en terres agricoles (30 %) et en prairies (43 %).
- Les terres agricoles conservent 20 % de leur superficie d'origine. Elles subissent d'importantes transitions vers les prairies (57 %) et, dans une moindre mesure, vers les zones arbustives (7 %).
- Les prairies présentent un taux de stabilité modéré de 46 %, avec des transitions notables vers des sols nus (18 %) et les terres agricoles (13 %).
- Les sols nus, quant à eux, affichent un faible taux de persistance (20 %), avec des conversions significatives vers les prairies (43 %) et, dans une moindre mesure, vers les forêts (0,2 %).

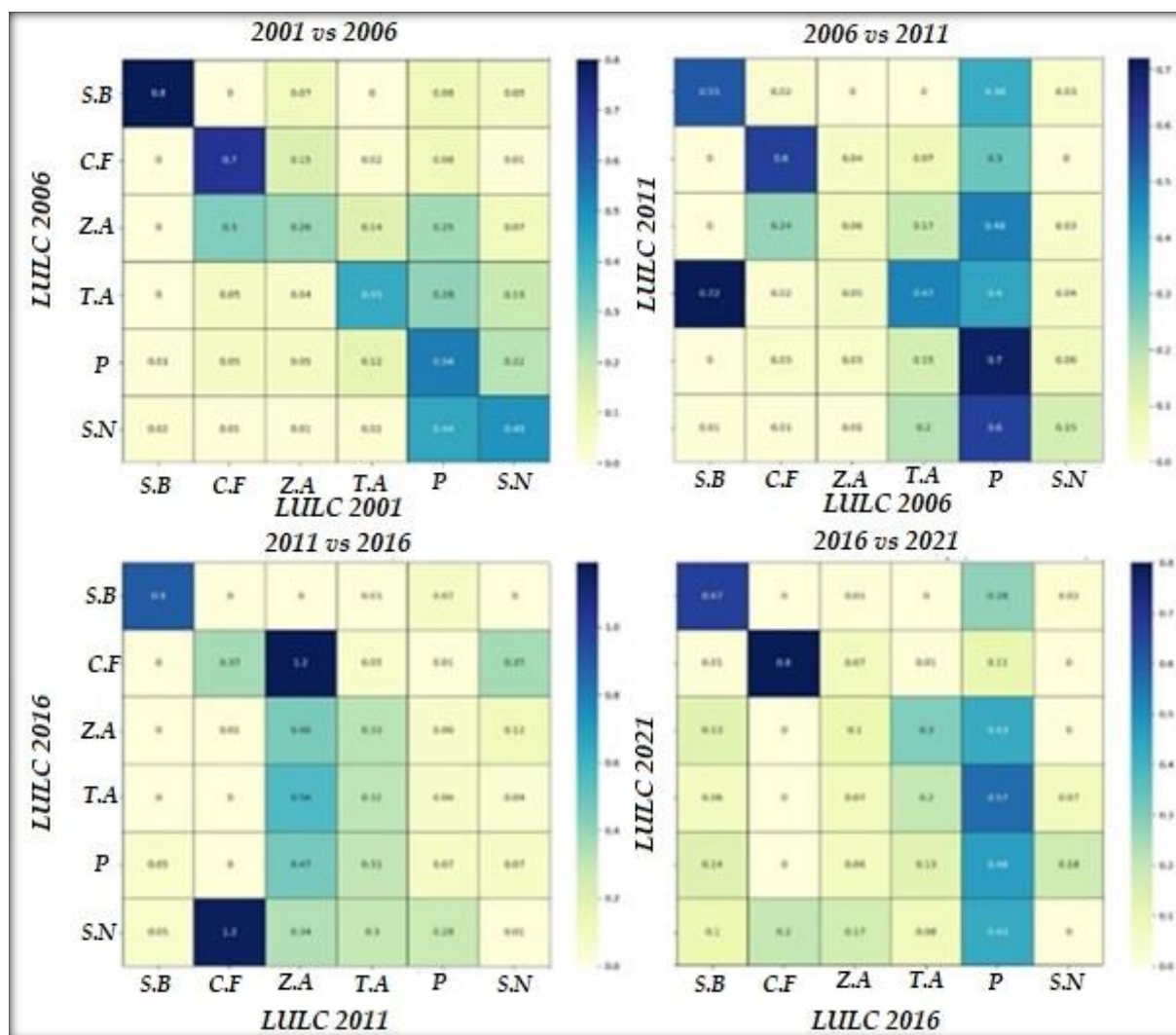


Figure III.11. Matrices de transition de l'occupation du sol pour les périodes 2001–2006, 2006–2011, 2011–2016 et 2016–2021 du bassin versant d'Oued Fekan.

III.12 Évolution projetée de l'occupation du sol aux horizons 2031, 2041 et 2051

Les figures III.12 et III.13 illustrent les projections de l'occupation du sol dans le bassin versant d'Oued Fekan pour les années 2031, 2041 et 2051. Elles présentent les superficies estimées en kilomètres carrés, les pourcentages relatifs à la surface totale, ainsi que les coefficients de Kappa issus du tableau III.4 et de la figure III.10. Ces derniers constituent des métriques de validation quantifiant le degré de concordance entre les simulations et les observations de référence, et permettent d'apprécier la précision et la robustesse du modèle prédictif.

a. Zones bâties

En 2031, les surfaces urbanisées sont estimées à 165,58 km², soit 13,75 % du territoire étudié, avec un coefficient Kappa de 0,65 indiquant une concordance modérée. À l'horizon 2041, une

légère progression porte cette superficie à 166,11 km² (13,82 %), tandis que le coefficient Kappa atteint 0,93, traduisant une fiabilité élevée de la simulation. En 2051, l'emprise urbaine s'étendrait à 200 km² (16,64 %), accompagnée d'un indice Kappa de 0,73, suggérant une dynamique soutenue d'urbanisation.

b. Formations forestières

La superficie forestière est projetée à 69,25 km² (5,74 %) en 2031, avec une stabilité apparente en 2041 (70 km², soit 5,80 %). En revanche, un recul est anticipé à l'échéance 2051, ramenant cette couverture à 60,48 km² (5,01 %), ce qui peut traduire une vulnérabilité accrue face aux pressions anthropiques et aux changements environnementaux.

c. Formations arbustives

Les espaces arbustifs affichent une relative constance, avec 117,07 km² (9,71 %) en 2031 et 117 km² (9,70 %) en 2041. Une légère augmentation à 120,11 km² (9,96 %) est attendue en 2051. Cette évolution modérée pourrait refléter une certaine résilience des milieux semi-naturels ou un effet des pratiques de reconversion ou de restauration des terres.

d. Terres agricoles

Les superficies agricoles montrent une remarquable stabilité sur l'ensemble de la période. Elles s'établissent à 257,02 km² (21,32 %) en 2031, se maintiennent à 257 km² en 2041, pour atteindre 257,16 km² (21,33 %) en 2051. Cette constance témoigne de la pérennité des systèmes agricoles et de leur importance stratégique dans l'aménagement du territoire.

e. Prairies

La couverture herbacée est estimée à 547,15 km² (45,41 %) en 2031, légèrement réduite à 546 km² (45,30 %) en 2041. En 2051, une baisse plus marquée est anticipée, portant cette classe à 517,11 km² (42,90 %). Cette régression pourrait affecter négativement les fonctions écosystémiques associées, notamment la biodiversité et la régulation hydrologique.

f. Sols nus

Ils demeurent relativement stables, avec 49,06 km² (4,07 %) en 2031, 49 km² (4,06 %) en 2041, et une légère hausse à 50,25 km² (4,16 %) en 2051. Cette faible dynamique traduit une inertie spatiale de ces zones, souvent liées à des contraintes édaphiques ou à des processus de dégradation peu réversibles.

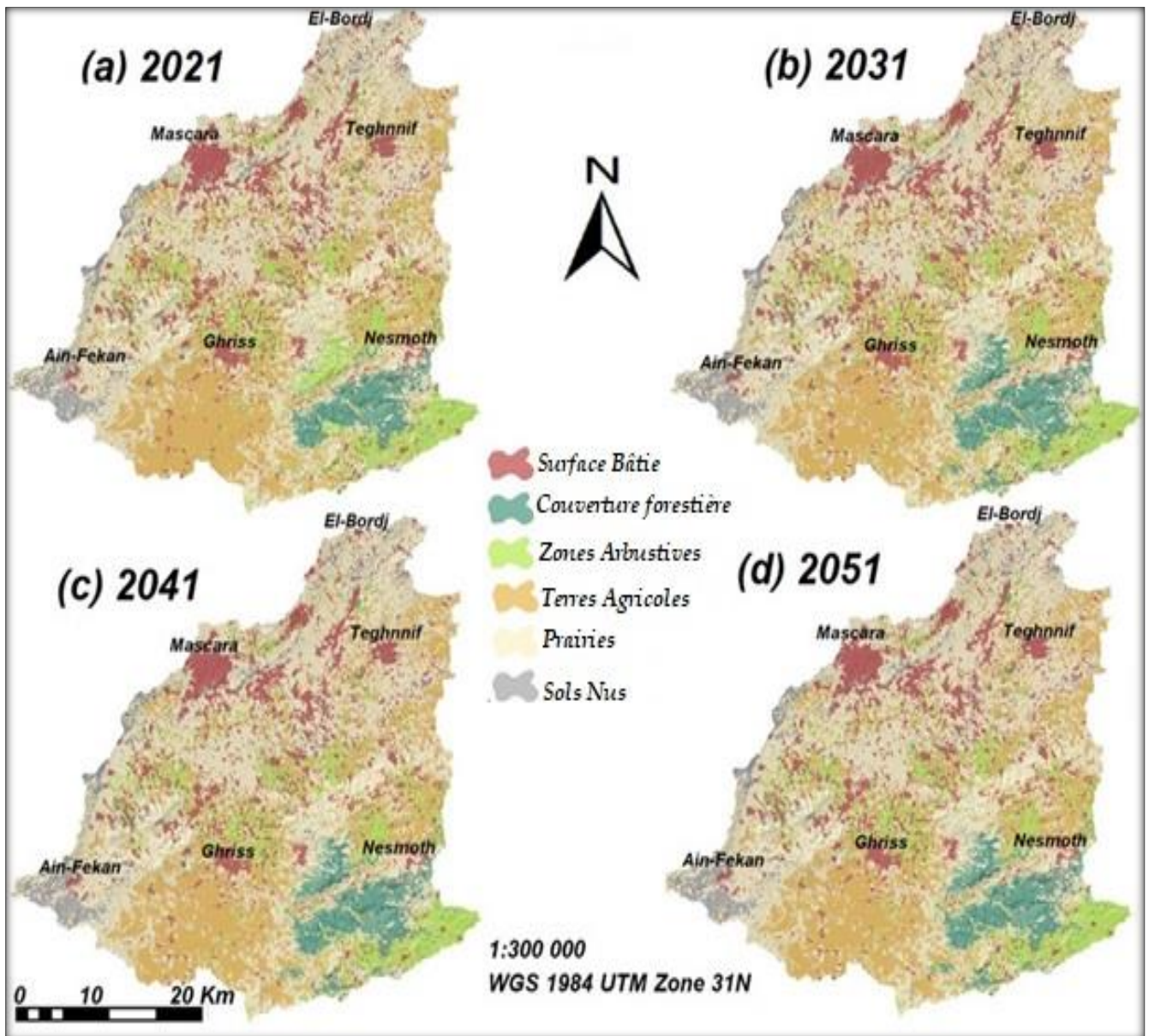


Figure III.12. Cartographie des dynamiques spatio-temporelles de l'occupation et de la couverture du sol dans le bassin versant d'Oued Fekan pour les années de référence et de projection : (a) 2021 (état actuel), (b) 2031, (c) 2041 et (d) 2051.

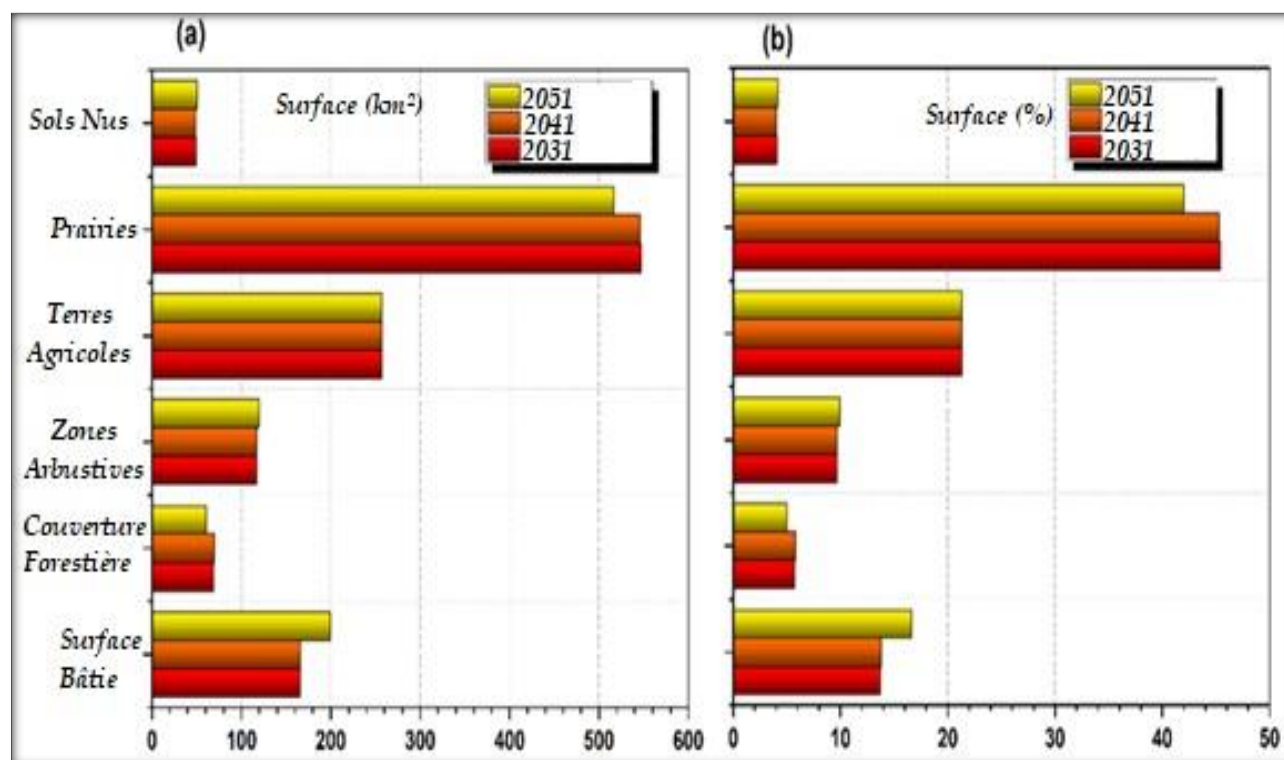


Figure III.13.Évolution prospective des classes d'occupation du sol à l'horizon 2031, 2041 et 2051, exprimée en : (a) superficie absolue (km²) ;
(b) proportion relative à la surface totale du bassin versant (%).

III.13 Analyse prospective de la dynamique de transition de l'occupation du sol à l'horizon 2051

L'analyse de la matrice de transition sur la période 2021–2051 permet de mettre en lumière les principales dynamiques d'évolution des usages du sol au sein du bassin versant étudié. Cette évaluation diachronique constitue un outil essentiel pour anticiper les mutations futures et guider les stratégies de gestion territoriale durable.

La figure III.14.a illustre les principaux flux de transition entre classes d'occupation du sol, permettant d'identifier les tendances dominantes et les zones de vulnérabilité écologique ou de transformation anthropique.

III.13.1 La matrice de transition pour la période 2001–2021

Elle met en évidence des dynamiques marquées au sein de la zone d'étude, traduisant des évolutions significatives sur deux décennies :

- Les zones bâties témoignent d'une remarquable inertie spatiale, avec un taux de persistance de 87 %, traduisant une urbanisation stable et durable sur la période analysée. Cependant, environ 9 % de ces surfaces ont été reconverties en prairies, ce qui pourrait

refléter des processus localisés de désurbanisation, de désaffectation ou de requalification des espaces construits.

- Les formations forestières présentent une rétention de 58 %, indiquant une relative efficacité des efforts de conservation. Toutefois, 10 % de ces surfaces ont évolué vers des zones arbustives, traduisant potentiellement des pressions anthropiques, une exploitation sylvicole accrue ou des altérations écologiques perturbant la régénération naturelle des couverts forestiers.
- Les zones arbustives affichent une stabilité limitée, avec seulement 21 % de leur surface conservée. Elles sont majoritairement reconverties en terres agricoles (20 %) et en prairies (26 %), ce qui reflète à la fois l'intensification des pratiques agropastorales et un potentiel de reconversion écologique favorable à la restauration des espaces herbacés.
- Les terres agricoles montrent une rétention significative de 41 %, mais subissent également une reconversion importante en prairies (37 %). Cette dynamique peut signaler une diversification des systèmes d'exploitation, une mise en jachère progressive et une transition vers des formes d'agriculture plus extensives.
- Les prairies se caractérisent par une forte stabilité (60 %), bien que 10 % de leur superficie aient été converties en terres cultivées, témoignant de pressions locales pour l'expansion agricole dans certaines zones du bassin.
- Enfin, les sols nus affichent un taux de persistance de 35 %, mais montrent une dynamique positive de reconversion, avec 46 % de leur superficie évoluant vers des prairies. Ce changement suggère un potentiel réel de régénération naturelle dans les zones anciennement dégradées.

III.13.2 La matrice de transition simulée pour la période 2021–2031

Elle met en évidence des mutations marquantes au sein du bassin versant, préfigurant un avenir fortement influencé par les processus d'urbanisation et les politiques de conservation environnementale (Fig. III.14.b). Chaque classe d'occupation du sol révèle des dynamiques propres, détaillées comme suit :

- Les espaces urbains présentent une remarquable inertie spatiale, avec un taux de rétention atteignant **99 %**. Cette stabilité traduit une consolidation des surfaces déjà urbanisées, laissant entrevoir une croissance maîtrisée et centralisée des zones bâties, sans reconversion notable vers d'autres formes d'occupation.
- Les couverts forestiers affichent également un taux de rétention de **99 %**, traduisant l'efficacité des mesures de préservation en place.

- Contrairement aux classes précédentes, les zones arbustives connaissent une forte régression, avec seulement 10 % de leur surface maintenue. Cette dynamique traduit une fragilité importante, liée à l'expansion des activités agricoles.
- Les terres cultivées conservent une stabilité remarquable avec un taux de rétention également de 99 %. Ce maintien suggère la persistance des pratiques agricoles traditionnelles et une faible propension à la reconversion. Toutefois, une transition marginale vers les sols nus (environ 0,75 %) est observée, pouvant signaler des processus localisés d'abandon ou de dégradation des terres.
- Les prairies présentent également un niveau élevé de conservation (99 %), ce qui indique une résilience écologique notable. Néanmoins, une très faible reconversion vers les sols nus est perceptible, laissant présager des risques de dégradation ponctuelle dans certaines zones.
- Les sols nus maintiennent une stabilité quasi totale (99 %), avec très peu de transitions observées vers d'autres types d'occupation. Cela reflète l'inertie écologique de ces espaces dégradés, qui ne montrent pas de dynamique de régénération ou de transformation significative à court terme.

III.13.3 La matrice de transition simulée pour la période 2021–2041

Elle prolonge les tendances observées lors des décennies précédentes, traduisant un paysage de plus en plus structuré autour de deux dynamiques majeures : l'expansion urbaine stabilisée et la préservation accrue des écosystèmes forestiers (Fig. III.14.c). Chaque classe d'occupation révèle les évolutions suivantes :

- Les surfaces urbanisées conservent une stabilité remarquable, avec un taux de rétention atteignant 99 %. Cette permanence traduit une phase de consolidation des espaces urbains existants, sans reconversion notable vers d'autres catégories d'usage.
- Les forêts maintiennent également un niveau élevé de rétention (99 %), avec une conversion marginale de 1 % vers les zones arbustives. Ce léger glissement peut être interprété comme une réponse à des dynamiques naturelles ou anthropiques, mais il reste limité.
- Les zones arbustives apparaissent en forte régression, avec une quasi-disparition du couvert arbustif à l'échelle du bassin. L'absence de rétention significative soulève des préoccupations quant à la perte de ces habitats intermédiaires, essentiels pour la biodiversité, la régénération forestière et l'atténuation des effets du changement climatique.
- Les surfaces cultivées conservent une stabilité élevée, avec un taux de rétention de 99 %. La transition vers les sols nus reste extrêmement marginale (0,0002 %).
- Les prairies conservent également un haut niveau de résilience, avec 99 % de rétention. Les reconversions vers les sols nus sont négligeables.

- Les sols nus restent largement stables (99 %), avec toutefois quelques transitions vers les prairies et les terres agricoles.

III.13.4 La matrice de transition projetée pour la période 2021–2051

Elle met en lumière un paysage futur dominé par la persistance des dynamiques d'urbanisation et la consolidation des efforts de conservation écologique, traduisant une configuration spatiale globalement stabilisée à long terme (Fig. III.14.d) :

- Les espaces urbanisés conservent une stabilité avec un taux de rétention de 99 %. Cette continuité traduit une saturation ou une stabilisation des zones urbaines dans leurs limites actuelles, où aucune reconversion significative vers d'autres formes d'occupation du sol n'est observée.
- Les forêts maintiennent un taux de rétention constant de 99 %.
- Contrairement à leur régression observée dans les scénarios précédents, les zones arbustives montrent une résurgence marquée, avec un taux de rétention également évalué à 99 %.
- Les surfaces cultivées conservent une grande stabilité (99 %). La conversion vers des sols nus demeure très marginale.
- Les prairies affichent également un haut niveau de résilience (99 %), avec des conversions très limitées vers les terres agricoles.
- Les sols nus conservent une stabilité notable (99 %), avec de faibles transitions vers l'agriculture (0,008 %) et les prairies.

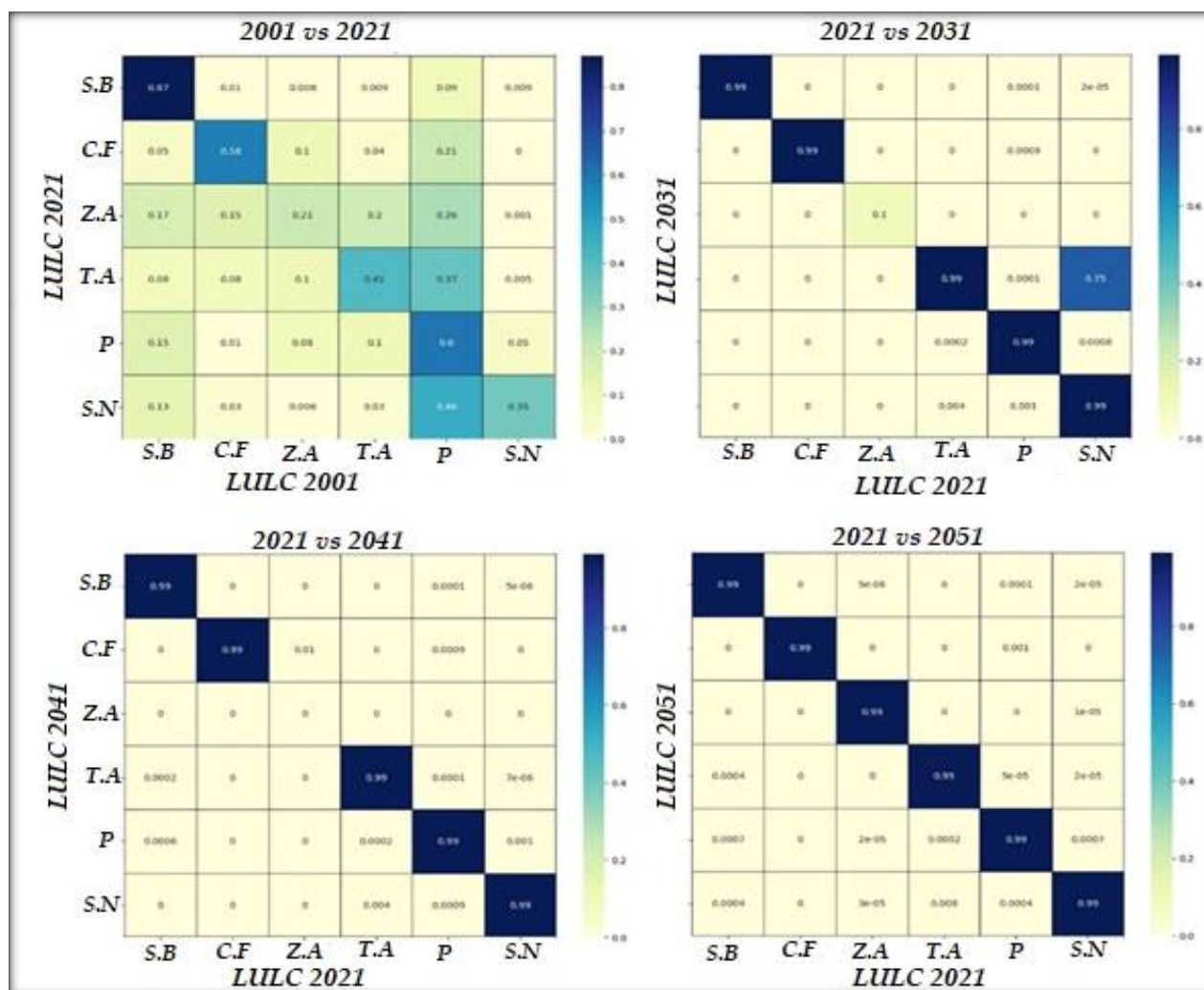


Figure III.14. Matrices de transition de l'occupation du sol pour les périodes : a) 2001–2021, b) 2021–2031, c) 2021–2041 et d) 2021–2051.

III.14 Analyse spatio-temporelle multi-décennale des dynamiques d'occupation du sol dans le bassin versant de l'Oued Fekan (2001–2051)

L'analyse des conversions d'occupation du sol dans le bassin versant de l'Oued Fekan met en évidence des dynamiques contrastées entre les périodes passées (2001–2021) et projetées (2021–2051). La figure III.15 illustre la répartition spatiale des changements survenus et anticipés, tandis que la figure III.16 retrace l'évolution temporelle des différentes classes d'occupation du sol entre 2021 et 2051, en exprimant les variations à la fois en kilomètres carrés et en pourcentage.

a. Expansion des zones bâties

La dynamique d'urbanisation se confirme tout au long de la période de simulation. Entre 2021 et 2031, les zones bâties devraient s'étendre de 3,37 km² (+2,08 %). Cette tendance s'accroît

à l'horizon 2041 avec un gain supplémentaire de 3,9 km² (+2,40 %), avant de s'intensifier de façon significative d'ici 2051, atteignant un total cumulé de 37,79 km² (+23,30 %). Cette forte progression traduit une urbanisation soutenue, vraisemblablement liée à la croissance démographique et au développement des infrastructures.

b. Régression de la couverture forestière

La couverture forestière, quant à elle, connaît une régression continue. Une perte de 1,3 km² (-1,84 %) est attendue entre 2021 et 2031, suivie d'un recul de 0,55 km² (-0,78 %) à l'horizon 2041. D'ici 2051, la perte cumulée atteindrait 10,07 km² (-14,27 %), ce qui soulève des préoccupations majeures en matière de conservation des ressources forestières et de biodiversité.

c. Reprise modérée des zones arbustives

Les zones arbustives affichent une reprise modérée, avec une augmentation de 0,16 km² (+0,14 %) prévue entre 2021 et 2031, puis de 0,09 km² (+0,08 %) à l'horizon 2041. À l'échéance 2051, leur superficie totale pourrait croître de 3,2 km² (+2,74 %), suggérant une forme de reconversion écologique ou de résilience naturelle des écosystèmes.

d. Stabilité relative des terres agricoles

Les terres agricoles montrent une tendance à la stagnation, avec une diminution modérée de 0,58 km² (-0,23 %) entre 2021 et 2031, suivie d'une baisse similaire de 0,6 km² (-0,23 %) en 2041, et d'une perte finale de 0,44 km² (-0,17 %) d'ici 2051. Ces faibles variations traduisent une stabilité relative du paysage agricole, malgré les pressions exercées par l'urbanisation.

e. Déclin marqué des prairies

Les prairies évoluent de manière plus contrastée. Après une légère progression de 0,04 km² (+0,01 %) entre 2021 et 2031, elles subissent un recul de 1,11 km² (-0,20 %) à l'horizon 2041, suivi d'une diminution drastique de 30 km² (-5,48 %) en 2051. Ce repli pourrait avoir des répercussions importantes sur les services écosystémiques associés, notamment la biodiversité et la régulation hydrique.

f. Réduction progressive des terres nues

Enfin, les terres nues montrent une tendance à la réduction progressive, passant de -1,67 km² (-3,29 %) entre 2021 et 2031, à -1,73 km² (-3,41 %) en 2041, puis à -0,48 km² (-0,95 %) à l'horizon 2051. Cette dynamique pourrait être le signe d'une amélioration de la couverture

végétale ou des effets positifs de politiques de gestion environnementale mises en place dans le bassin.

Remarque : L'ensemble des données sources et les résultats détaillés de cette analyse sont disponibles en ANNEXE.

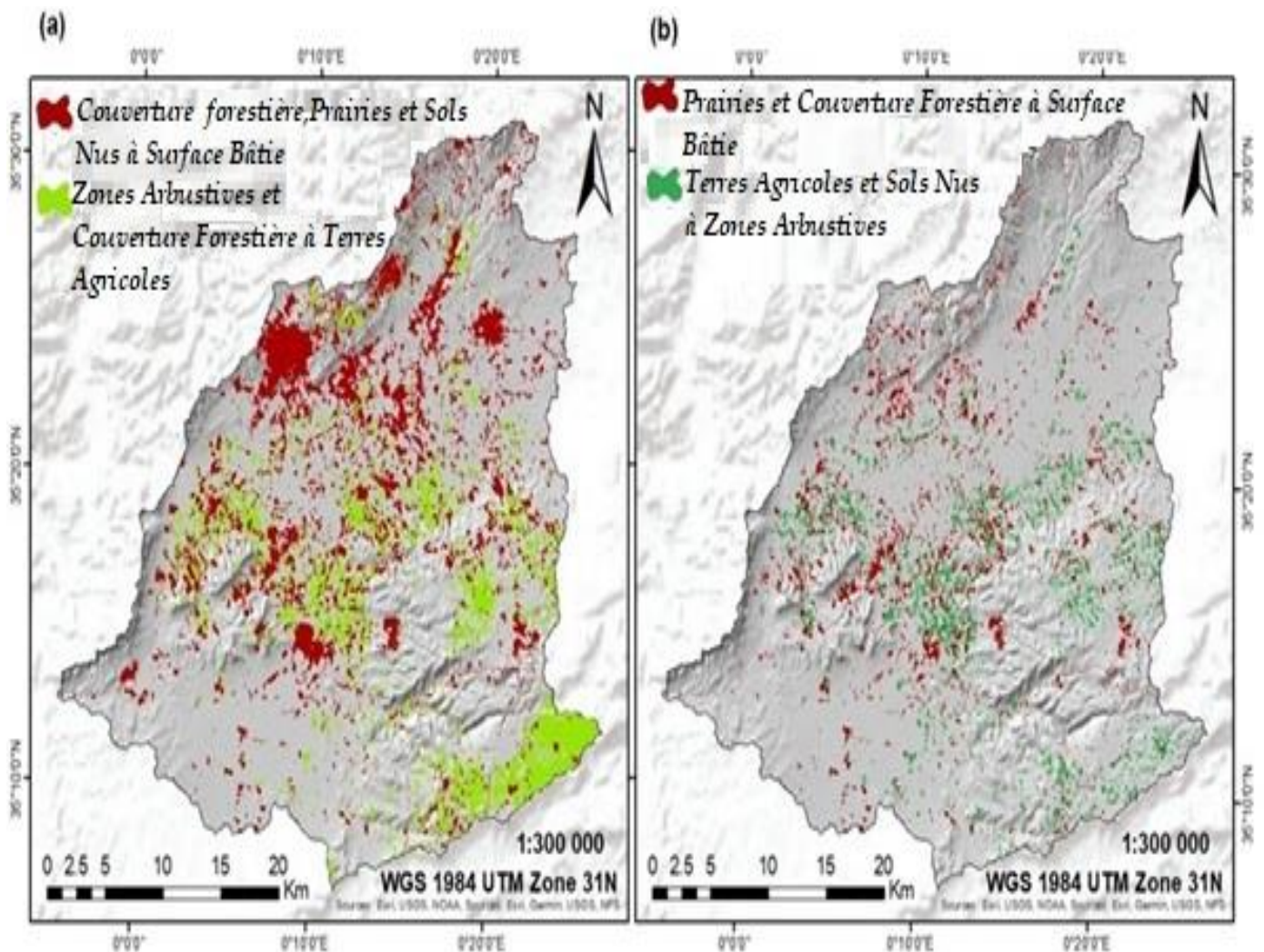


Figure III.15. Cartographie des conversions d'occupation du sol dans la zone d'étude entre (a) 2001–2021 et (b) 2021–2051.

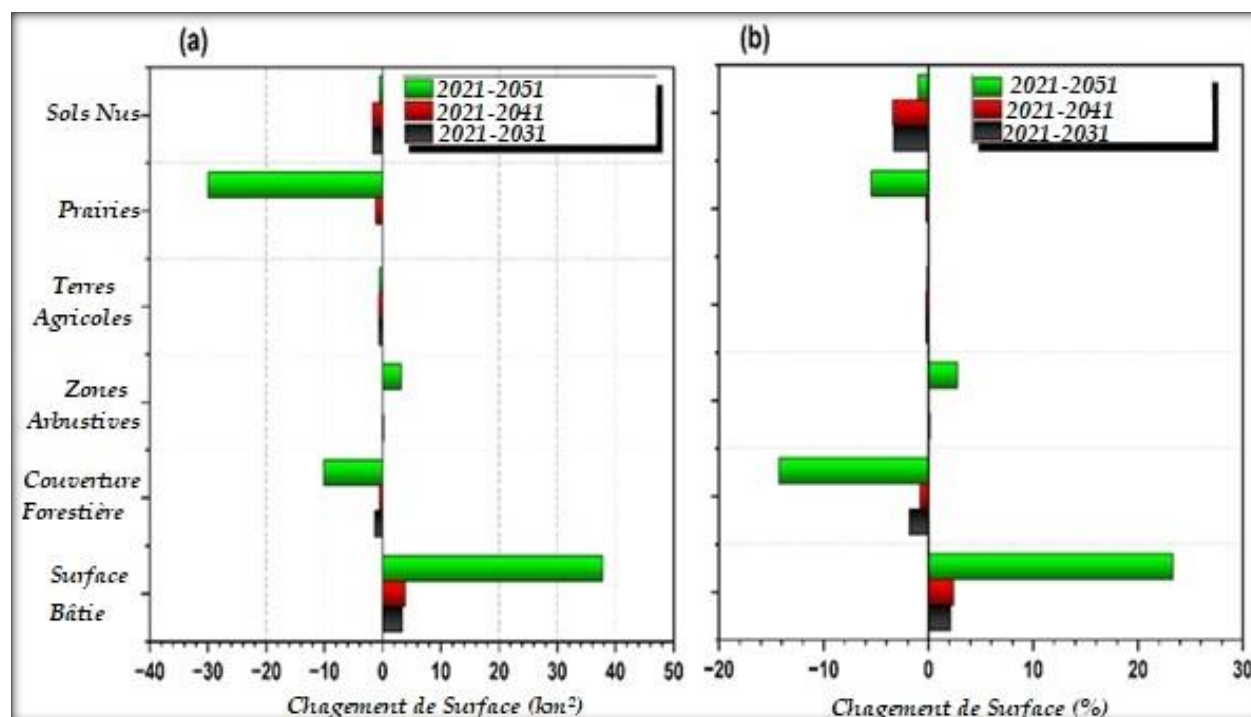


Figure III.16. Évolution temporelle des classes d'occupation du sol pour les périodes 2021–2031, 2021–2041 et 2021–2051, exprimée en (a) superficie (km²) et (b) pourcentage (%).

III.15 Enjeux socio-économiques et environnementaux des dynamiques d'occupation du sol dans le bassin versant de l'Oued Fekan

Les transformations de l'occupation et de l'occupation du sol dans le bassin versant de l'Oued Fekan engendrent des répercussions socio-économiques et environnementales majeures. L'urbanisation croissante et l'intensification agricole participent au développement économique et à l'amélioration des infrastructures, tout en générant des opportunités d'emploi. Toutefois, ces dynamiques entraînent également des effets négatifs tels que la perte de terres agricoles, la pression accrue sur les ressources naturelles, le déplacement des populations locales et l'accentuation des inégalités sociales.

Les changements d'usage du sol affectent directement la sécurité alimentaire et les moyens de subsistance, notamment en compromettant l'accès aux terres fertiles et en fragilisant les pratiques agricoles traditionnelles. À l'horizon 2051, la surface urbanisée devrait dépasser 23 %, au détriment des écosystèmes naturels, accentuant le ruissellement, les risques d'inondation et la dégradation des sols.

La régression de 14,27 % des forêts (soit une perte estimée à 10,07 km²), associée à la fragmentation des habitats, illustre les menaces qui pèsent sur la biodiversité locale. Ces tendances sont aggravées par le changement climatique, les incendies récurrents et l'expansion des usages agricoles. Par ailleurs, la dégradation des prairies et la saturation des

terres cultivables compromettent la productivité agricole et affaiblissent la résilience socio-économique des communautés rurales.

L'approche de modélisation adoptée, basée sur l'intégration des automates cellulaires (CA) avec le modèle de Markov et le réseau de neurones MLP (Multi-Layer Perceptron) a permis d'anticiper les tendances futures à travers les années 2031, 2041 et 2051. Les indices de Kappa (0,65, 0,93, 0,72) confirment la robustesse globale du modèle, tout en révélant certaines incertitudes liées à la classification, aux hypothèses stationnaires ou au surapprentissage. Les analyses ont également mis en évidence des corrélations spatiales importantes, notamment entre la densité de population, la topographie et l'accessibilité.

Face à ces défis, une gestion intégrée des ressources en eau s'impose, combinant infrastructures (barrages, forages), technologies alternatives (dessalement, récupération d'eau de pluie), et réutilisation des eaux usées. Il est essentiel d'accompagner ces initiatives d'évaluations environnementales rigoureuses.

III.16 Conclusion

Cette recherche a analysé l'évolution passée et future de l'utilisation et de la couverture des terres dans le bassin versant de l'Oued Fekan, en s'appuyant sur les données satellitaires Landsat et sur une modélisation basée sur la chaîne de Markov couplée à un réseau de neurones MLP. L'étude s'est articulée autour de deux périodes clés : la période historique 2001–2021 et la projection prospective à l'horizon 2051.

Les principaux résultats mettent en évidence les points suivants :

- **Entre 2001 et 2021**, le paysage a subi une transformation profonde, portée par un développement socio-économique rapide. Les zones bâties ont connu une croissance spectaculaire de 617 %, passant de 22 km² à 162 km², illustrant une urbanisation soutenue. Les zones arbustives et les sols nus ont également progressé, respectivement de 32 % (de 88 km² à 116 km²) et de 8,7 % (de 46 km² à 50 km²).
- **À l'inverse**, des pertes importantes ont été enregistrées pour les forêts et les terres agricoles, qui ont diminué de 8 % (de 76 km² à 70 km²) et de 40 % (de 435 km² à 257 km²), révélant une pression accrue sur les écosystèmes naturels et une menace pour la durabilité environnementale.
- **Pour la période 2021–2051**, les projections indiquent la poursuite de l'expansion urbaine, avec une augmentation estimée des zones bâties de 23,30 % (soit +37,79 km²). Une légère augmentation des zones arbustives est également prévue (+2,74 %, soit +3,2 km²), pouvant traduire des dynamiques de reconversion écologique ou de résilience des milieux.

- En revanche, les forêts et les prairies devraient continuer à régresser, avec des pertes anticipées de 14,27 % (soit 10,07 km²) pour les forêts, et de 5,48 % (soit 30 km²) pour les prairies. Ces tendances traduisent un déséquilibre croissant entre les pressions anthropiques et la préservation des milieux naturels.

L'évaluation de l'occupation du sol constitue un levier essentiel pour une gestion intégrée et durable des ressources en eau. Cette étude a permis de cartographier les dynamiques spatio-temporelles de l'occupation des terres dans le bassin versant d'Oued Fekan, en identifiant les zones sensibles à la pression anthropique.

Dans une optique opérationnelle, cette approche constitue un outil d'aide à la décision pour la planification territoriale et environnementale, notamment dans le suivi de la variabilité spatiale des ressources et l'évaluation des impacts sur les processus hydrologiques majeurs (crues, recharge, érosion).

Toutefois, pour affiner la compréhension des mécanismes sous-jacents et améliorer la précision des projections, plusieurs pistes de recherche méritent d'être explorées. L'intégration de données satellitaires à haute résolution, de variables biophysiques (température, humidité du sol, indice de végétation) et de données socio-économiques (densité de population, infrastructures, politiques foncières) permettrait d'approfondir l'analyse contextuelle. De plus, le recours à des techniques de modélisation avancées, telles que les algorithmes d'apprentissage automatique (Random Forest, réseaux neuronaux profonds) ou les modèles hybrides combinant automates cellulaires et approches prédictives intelligentes, représenterait une voie prometteuse pour modéliser la complexité des processus spatio-temporels.

Enfin, l'élargissement du périmètre géographique aux bassins versants voisins permettrait d'identifier des dynamiques régionales cohérentes et de renforcer la coordination en matière de gestion intégrée. L'implication des parties prenantes dans l'élaboration des scénarios, ainsi que l'intégration de données climatiques fines, contribueraient à aligner les politiques d'aménagement sur les exigences de durabilité et de résilience.

Ainsi, cette étude apporte des éléments clés pour une meilleure compréhension des interactions entre dynamiques d'occupation du sol et gestion de l'eau, tout en ouvrant des perspectives méthodologiques et applicatives en faveur d'une planification territoriale durable, fondée sur des données probantes.

Chapitre IV

Analyse des interactions entre l'occupation du sol et les paramètres du bilan hydrique

Introduction générale : Impact des transformations de l'occupation du sol sur les composantes du bilan hydrologique :

L'analyse du comportement hydrologique du bassin versant de l'Oued Fekan constitue une problématique particulièrement complexe, en raison de l'interdépendance dynamique entre les différents processus du cycle de l'eau. Dans le cadre de ce travail, cette complexité est abordée de manière partielle à travers la construction d'indicateurs hydrologiques permettant de caractériser les relations entre les classes d'occupation du sol et trois processus clés : l'évapotranspiration, le ruissellement et l'infiltration.

L'analyse prend en compte les dimensions spatiales et temporelles, en couvrant la période 2001–2021, afin de restituer l'évolution des interactions entre l'occupation du sol et les processus hydrologiques à différentes échelles.

Bien que cette approche ne prétende pas englober l'ensemble des facteurs influençant le cycle de l'eau, elle permet néanmoins de proposer une première quantification des impacts induits par les dynamiques d'occupation du sol sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant étudié.

Il est postulé que les évolutions de l'occupation du sol influencent de manière significative les bilans hydriques, en modifiant les principales composantes du cycle de l'eau. Afin de tester cette hypothèse, des indicateurs spécifiques ont été élaborés à partir de scénarios de changement d'occupation du sol, construits selon des classes agrégées. Ces scénarios prospectifs sont considérés comme des facteurs explicatifs majeurs des variations futures du comportement hydrologique.

L'objectif de cette démarche est de fournir des outils d'aide à la décision en matière de gestion intégrée des ressources en eau et d'aménagement du territoire, en intégrant les impacts potentiels des mutations de l'occupation des sols.

Dans cette optique, il serait pertinent de promouvoir, d'une part, des politiques d'aménagement visant à atténuer l'augmentation du ruissellement en milieu urbanisé, notamment par la création d'infrastructures vertes telles que des parcs, des espaces verts ou des aires récréatives et, d'autre part, de favoriser des pratiques agricoles durables, limitant les prélèvements en période d'étiage, en particulier dans les zones où l'irrigation exerce une pression importante sur la ressource en eau.

***Modélisation du ruissellement de surface par
intégration d'un SIG et de la méthode SCS-CN***

IV.1. Modélisation du ruissellement de surface par intégration d'un SIG et de la méthode SCS-CN

La méthode SCS-CN (Soil Conservation Service – CurveNumber), largement utilisée dans de nombreuses études hydrologiques, a été développée par le Service de conservation des ressources naturelles (NRCS) du ministère de l'Agriculture des États-Unis (USDA). Elle est particulièrement adaptée à l'estimation du ruissellement de surface, en tenant compte de plusieurs facteurs tels que le type de sol, l'occupation des terres et les caractéristiques topographiques (Sjöman & Gill, 2014).

Grâce à la télédétection (TS) et aux systèmes d'information géographique (SIG), il est aujourd'hui possible de gérer à la fois des données spatiales et non spatiales, ce qui permet de mieux caractériser les propriétés hydrologiques d'un bassin versant (Pandey & Sahu, 2021). Comparativement aux méthodes traditionnelles, l'intégration des SIG et de la télédétection dans les modèles hydrologiques permet d'obtenir des résultats plus fiables et précis. Cette approche combinée a été largement employée dans la modélisation du ruissellement de surface (Zhan & Huang, 2004).

Par exemple, Shadeed et Almasri (2010) ont démontré que l'intégration du SIG avec la méthode SCS-CN constitue une technique efficace pour simuler les volumes de ruissellement, notamment dans les bassins versants arides à semi-arides. De même, Liu et Li (2008) ont appliqué un modèle SCS-CN basé sur SIG pour estimer le ruissellement sur le plateau de Loess en Chine, en observant une forte corrélation entre les valeurs simulées et mesurées. Vojtek et Vojteková (2019) ont également utilisé cette méthode dans une approche SIG pour étudier l'impact des changements d'occupation des sols sur le ruissellement de surface. Cette approche s'avère particulièrement pertinente pour modéliser spatialement les caractéristiques du ruissellement, même dans des contextes de données limitées.

Pour évaluer les effets des changements d'occupation du sol et de l'urbanisation croissante, l'intégration conjointe des données SIG et de télédétection dans la méthode SCS-CN représente une solution efficace et économique. Elle permet d'obtenir des résultats pertinents sans recourir à des données complexes ou difficilement accessibles (Jahan et al., 2021 ; Al-Juaidi, 2018).

Dans cette optique, le présent travail combine les approches SIG et SCS-CN pour analyser la variation spatio-temporelle du ruissellement de surface à l'échelle urbaine et évaluer l'impact des mutations de l'occupation des sols. En Algérie, le phénomène d'urbanisation se caractérise depuis plusieurs décennies par une croissance rapide et désorganisée, avec une expansion spatiale marquée (Ahmed et al., 2021). Cette dynamique non maîtrisée a engendré des inondations récurrentes, constituant un danger majeur pour les populations, comme en témoignent les événements survenus à Bab El Oued (2001), Adrar (2004), Bachar et Ghardaïa (2008), ou encore Tamanrasset (2015, 2018).

Dans ce contexte, des images satellites représentant les changements d'occupation du sol ont été analysées dans un environnement SIG. La profondeur du ruissellement de surface a ensuite été estimée à l'aide de la méthode SCS-CN. Cette méthodologie a été appliquée au bassin versant de l'Oued Fekan, situé dans le nord-ouest de l'Algérie, pour la période 2001–2021, à des intervalles de cinq ans.

L'objectif principal de cette étude est d'analyser l'impact des changements d'occupation des sols sur la distribution spatiale et temporelle du volume de ruissellement dans le bassin versant, en appliquant la méthode NRCS-CN. Les indicateurs issus de cette analyse peuvent par ailleurs servir de base aux décideurs et urbanistes pour élaborer des stratégies efficaces en matière de conservation des ressources en eau et de gestion des inondations urbaines.

IV 1.1 la méthode de NRCS-SCS-CN

Le modèle SCS-CN a été utilisé pour calculer le ruissellement de surface dans le bassin versant d'Oued Fekan. Il s'agit de l'un des modèles hydrologiques empiriques les plus couramment employés. Comparé aux modèles hydrologiques traditionnels, il nécessite un nombre réduit de paramètres et de données d'observation, ce qui le rend particulièrement adapté dans les contextes de données limitées (Ponce & Hawkins, 1996 ; Yang, 2016).

Ces dernières années, le modèle SCS-CN a été largement appliqué pour estimer le ruissellement à différentes échelles spatiales (Du et al., 2015 ; Wang, 2012). De nombreuses études ont également montré son efficacité dans des environnements urbains, où les données hydrologiques réelles sont souvent difficiles à obtenir (Ozdemir & Elbası, 2015 ; Yang et al., 2010). Son application repose sur la classification de l'occupation du sol, les groupes hydrologiques de sols (HSG) et les conditions d'humidité initiale (AMC).

Dans cette étude, la méthode SCS-CN a été mise en œuvre en intégrant des outils de systèmes d'information géographique (SIG) et de télédétection (RS), permettant ainsi une modélisation spatiale efficace du ruissellement.

Le modèle repose sur l'équation du bilan hydrique :

$$P = I_a + F + Q \quad (\text{IV. 1})$$

Les hypothèses de base du modèle sont exprimées par les équations suivantes :

$$\frac{Q}{P - I_a} = \frac{F}{S} \quad (\text{IV. 2})$$

$$I_a = \lambda \times S \quad (\text{IV. 3})$$

où :

P : hauteur des précipitations (mm),

I_a : précipitation initialement interceptée ou pertes initiales (mm),

F : infiltration (mm),

Q : ruissellement direct ou ruissellement de surface (mm),

S : rétention maximale potentielle du sol (mm),

λ : coefficient de pertes initiales, généralement compris entre 0,0 et 0,2 ; une valeur de 0,05 est souvent utilisée pour les milieux fortement urbanisés (Krajewski et al., 2020). Dans cette étude, une valeur de $\lambda = 0,2$ a été retenue.

Lorsque $P > I_a$:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (\text{IV. 4})$$

En remplaçant I_a par $0,2S$, on obtient la forme courante de l'équation :

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad \text{et si } P > I_a \quad (\text{IV. 5})$$

Sinon, $P \leq I_a$, alors $Q = 0$

La valeur de S (la rétention maximale potentielle) est liée au CN , paramètre sans dimension compris entre 0 et 100, représentant la capacité du sol et de l'occupation du sol à générer du ruissellement. Elle est calculée selon la formule :

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (IV.6)$$

$$CN = \frac{25400}{254 + S} \quad (IV.7)$$

Le numéro de courbe (CN) est déterminé en fonction du type de sol (groupe hydrologique), de l'occupation du sol et de l'état d'humidité initial. Des valeurs standardisées sont disponibles dans la littérature et les manuels techniques du NRCS (Rawat& Singh, 2017 ; Karunanidhi et al., 2020).

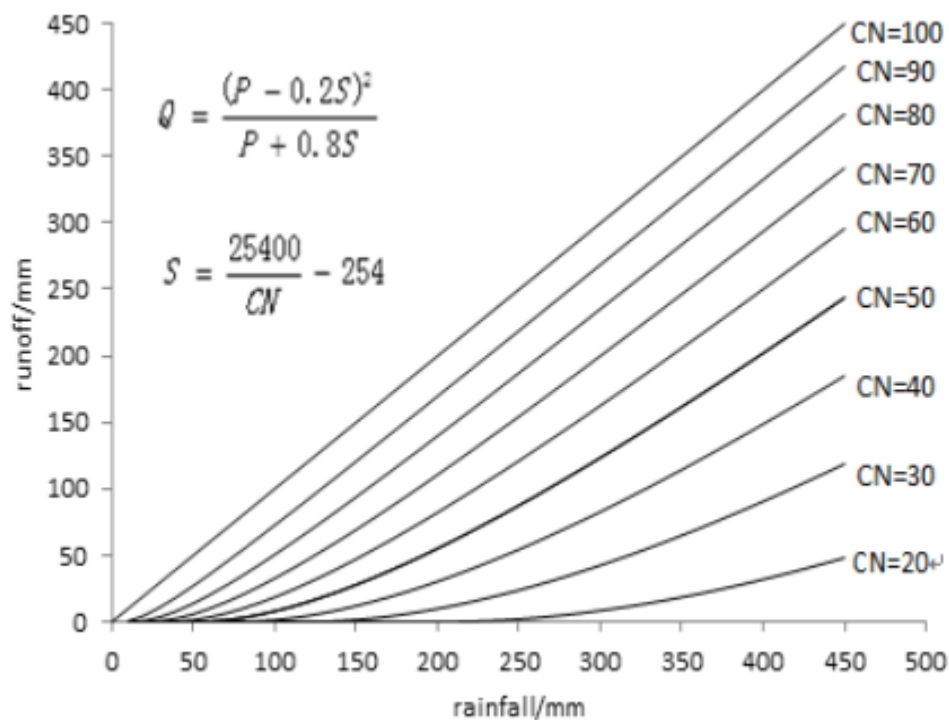


Figure.IV.1 Relation entre le ruissellement et les précipitations ((Source USDA-SCS).

IV.1.2. Conditions d'humidité antérieures (CAU)

Les conditions d'humidité antérieures (CAU) jouent un rôle déterminant dans le volume de ruissellement généré, car elles influencent directement l'humidité initiale du sol et, par conséquent, sa capacité à retenir l'eau avant un événement pluvieux (Rawat et al., 2017).

Dans le modèle **SCS-CN**, trois niveaux de CAU sont définis :

- **CAU I** : sol sec (faible humidité),
- **CAU II** : sol en conditions normales (référence),
- **CAU III** : sol humide (haute humidité).

Ces trois niveaux reflètent différents états d'humidité du sol et influencent la capacité d'infiltration ainsi que la valeur du numéro de courbe (CN), impactant directement le volume de ruissellement estimé. La classification des CAU est fondée sur la quantité totale de précipitations enregistrée au cours des cinq jours précédant l'événement pluvieux, en tenant compte de la saison (saison de croissance ou saison de dormance hivernale).

Dans le cadre de cette étude, la condition CAU II, représentant un niveau moyen d'humidité du sol, a été adoptée comme référence principale, conformément aux recommandations du SCS (Cronshey, 1986).

L'état initial du sol influence fortement la capacité d'infiltration et, par conséquent, les valeurs de CN utilisées dans les calculs. Pour ajuster les valeurs de CN en fonction de l'humidité du sol (conditions sèches ou humides), des équations empiriques permettent de dériver les indices de courbe de ruissellement (ICR) pour CAU I et CAU III à partir de la valeur standard pour CAU II.

Par ailleurs, l'Indice de Précipitation Antérieure (API) est un outil couramment utilisé pour évaluer l'état d'humidité du sol. Il est calculé comme la somme des précipitations des cinq jours précédant l'événement pluvieux, ce qui permet de classer les conditions d'humidité et d'affiner la précision de la simulation du ruissellement.

La formule de l'**API** est la suivante :

$$API = \sum_{i=1}^5 P_i \quad (IV.8)$$

Où :

P_i : quantité de précipitations (en mm) enregistrée lors du i jour précédant l'événement.

Tableau IV. 1 : Classification des conditions d'humidité antérieures (CAU)

Groupe CAU	Caractéristiques du sol	Précipitations antérieures de cinq jours en mm	
		Saison de dormance	Saison de croissance
I	Conditions sèches	< 13	< 36
II	Conditions moyennes	13-28	36-53
III	Fortes précipitations/conditions humides	> 28	> 53

IV.1.3. Détermination des valeurs CN

Les valeurs du numéro de courbe de ruissellement (CN) varient en fonction des conditions d'humidité antérieures (CAU) du sol. Le modèle SCS-CN utilise généralement comme référence la valeur CN(II), correspondant à un état d'humidité moyen. Toutefois, pour simuler les conditions sèches (CAU I) ou humides (CAU III), il est nécessaire d'ajuster cette valeur à l'aide de formules de conversion empiriques.

Selon Gao (2006), les relations suivantes permettent de convertir CN(II) en CN(I) et CN(III) :

$$CN(I) = \frac{4.2 \, CN(II)}{10 - 0.058 \, CN(II)} \quad (IV.9)$$

$$CN(III) = \frac{23 \, CN(II)}{10 - 0.12 \, CN(II)} \quad (IV.10)$$

Ces équations permettent d'estimer les valeurs du CN en fonction du niveau d'humidité du sol :

- **CN(I)** correspond à un sol **sec**, présentant une forte capacité d'infiltration ;
- **CN(II)** est la valeur de **référence** pour des conditions **normales** d'humidité ;
- **CN(III)** est utilisé pour des conditions humides, où la capacité d'infiltration est réduite.

Une fois les valeurs de CN ajustées en fonction des conditions d'humidité (CAU), elles peuvent être utilisées dans l'équation du modèle SCS-CN pour estimer la hauteur de ruissellement de surface à partir des précipitations observées.

Remarque : L'exactitude des résultats dépend fortement de la qualité de la classification de l'occupation du sol, de la précision des données de précipitation, ainsi que de la sélection correcte de la condition d'humidité du sol.

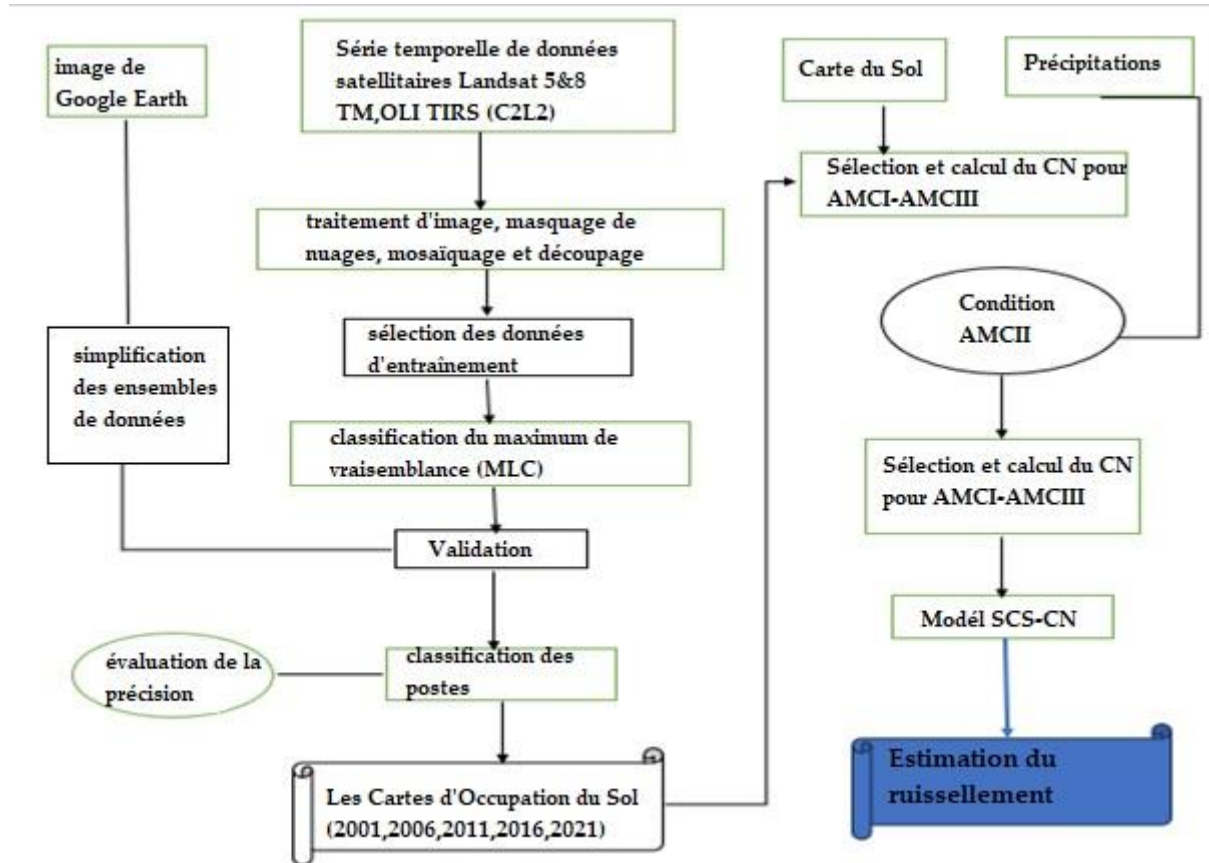


Figure IV.2. Organigramme du modèle SCS-CN

Dans cette méthode, fondée sur l'analyse de l'occupation du sol (LULC), détaillée dans le chapitre III, et intégrant la carte des précipitations présentée dans le chapitre II, l'aspect géologique est quant à lui abordé dans le présent chapitre.

Nous avons appliqué la méthode SCS-CN dans le cadre de cette étude, en identifiant quatre groupes hydrologiques de sols (HSG) présents dans la zone d'analyse : A, B, C et D. L'état hydrique du sol (AMC II) a été retenu comme référence, correspondant à une condition moyenne d'humidité et à un niveau moyen de ruissellement.

Une carte composite combinant l'occupation du sol, les groupes hydrologiques, les précipitations et le modèle numérique de terrain (MNT) a été générée à l'aide d'un SIG. À

partir de cette carte intégrée, les valeurs de CN ont été attribuées à chaque type d'occupation du sol en fonction des caractéristiques hydrologiques et des zones de ruissellement identifiées.

IV.1.4 Données géologiques

La perméabilité des sols et du substrat lithologique constitue un facteur déterminant dans les processus d'infiltration et de ruissellement de surface. Dans le bassin versant de l'Oued Fekan, les données pédologiques ont été extraites de la carte pédologique de l'Algérie.

Les groupes hydrologiques de sols (HSG) sont classés en quatre catégories (A, B, C et D), selon la capacité du sol à transmettre l'eau et son taux d'infiltration lorsque celui-ci est complètement saturé (NRCS, 1986) :

- **Groupe A** : sols très perméables, constitués principalement de sables ou de graviers, présentant un taux d'infiltration élevé et un potentiel de ruissellement très faible.
- **Groupes B et C** : sols à perméabilité modérée, caractérisés par une infiltration intermédiaire et un potentiel de ruissellement modéré.
- **Groupe D** : sols peu perméables, formés essentiellement de limons argileux ou d'argiles compactes, affichant le taux d'infiltration le plus bas et le potentiel de ruissellement le plus élevé.

En fonction de la texture et du type de sol, la zone d'étude a été classée dans les quatre groupes HSG (A, B, C, D), comme illustré à la Figure 1. Ces classifications permettent d'évaluer les conditions d'infiltration et le comportement hydrologique du bassin.

Chapitre IV : Analyse des interactions entre l'occupation du sol et les paramètres du bilan hydrique

Tableau IV.2: Groupes hydrologiques des sols selon les différentes textures de sol (USDA-SCS).

HSG	Texture du sol	Type de sol	Potentiel de ruissellement	Remarques
A	Sable, sable limoneux ou limon sableux	Sables et graviers profonds et bien drainés	Faible	Taux de transmission d'eau élevé
B	Loam limoneux ou limoneux	Modérément profond, bien drainé, textures moyennement fines à grossières	Modéré	Transmission d'eau modérée
C	Loam argilo-sableux	Loam argileux, loam sableux peu profond, sols à texture moyennement fine à fine	Modérément élevé	Taux de transmission d'eau modéré
D	Argilo-limoneux, argileux sableux, ou argileux	Sols argileux gonflant fortement à l'humidité, sols fortement plastiques et sols présentant une nappe phréatique élevée en permanence	Élevé	Faible taux de transmission de l'eau

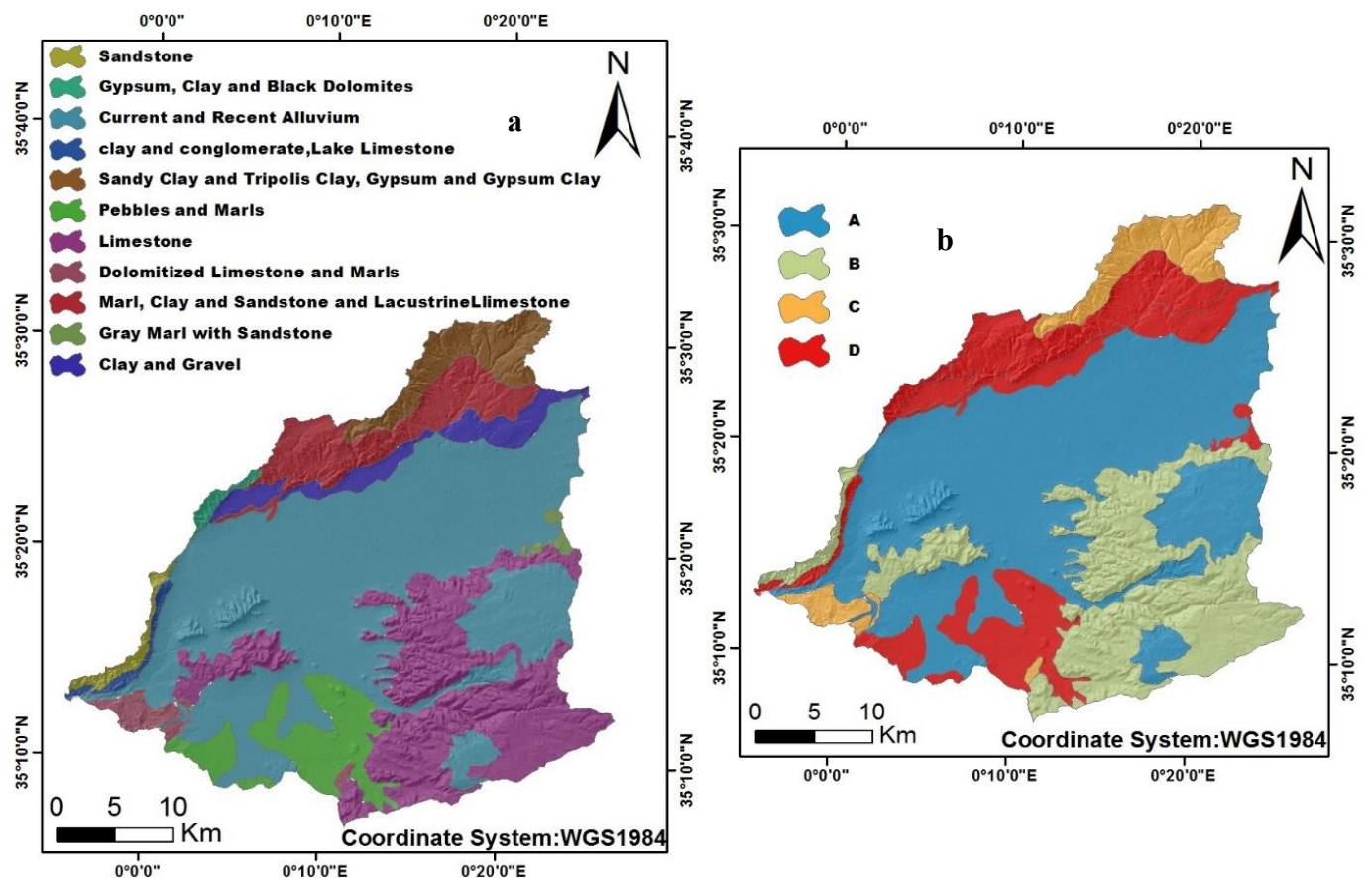


Figure IV.3:(a) carte pédologique (b)Cartographie des groupes hydrologiques de sols (A, B, C, D) dans le bassin versant de l'Oued Fekan, selon la typologie pédologique de l'USDA-SCS.

IV.1.5 Méthode de la courbe pondérée par la surface

Les cartes spatiales des types de sols et de l'occupation des terres ont été superposées dans un environnement SIG. Cette superposition permet de générer de nouveaux polygones, appelés carte sols-occupation du sol, à partir desquels les valeurs du numéro de courbe (CN) sont attribuées en fonction des classes d'occupation du sol et des groupes hydrologiques de sols.

Les résultats ainsi obtenus ont été utilisés pour calculer le numéro de courbe pondéré global(CN) pour la condition d'humidité moyenne AMC II, en tenant compte des superficies respectives de chaque combinaison sol-occupation du sol.

La formule utilisée est la suivante :

$$CN_w = \frac{\sum_{i=1}^n (CN_i \cdot A_i)}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (IV. 11)$$

Où :

CN_w : Numéro de courbe pondéré,

CN_i : Valeur du numéro de courbe pour une superficie spécifique i,

A_i : superficie correspondant à CN_i ,

A : superficie totale du bassin versant.

Cette méthode est couramment utilisée dans les études hydrologiques pour représenter l'hétérogénéité spatiale d'un bassin versant de manière simplifiée, tout en conservant une bonne précision dans l'estimation du ruissellement (Karunanidhi et al., 2020 ; Tailor et al., 2016 ; Rawat et al., 2017).

Chapitre IV : Analyse des interactions entre l'occupation du sol et les paramètres du bilan hydrique

Tableau IV.3 : Numéros de courbe (CN) selon les types d'occupation et d'utilisation des terres (USDA-SCS).

Type LULC	Type de groupe de sol hydrologique			
	A	B	C	D
Surface bâtie	68	79	86	89
Couverture forestière	45	66	77	83
Zones arbustives	55	72	81	86
Terres agricoles	51	67	76	80
Prairies	49	39	30	48
Sols nus	77	86	91	94

Tableau IV.4 : Numéros de courbe (CN) pour la condition d'humidité moyenne (AMC II) en fonction de la classification de l'occupation du sol et des groupes hydrologiques de sols dans le bassin versant de l'Oued Fekan (période 2001-2021).

	SN	LULC	Type de groupe de sol hydrologique			
			A	B	C	D
2001	1	Surface bâtie	9.04	1.93	0.97	9.66
	2	Couverture forestière	10.75	62.21	0.56	2.62
	3	Zones arbustives	57.75	21.78	1.20	7.24
	4	Terres agricoles	253.78	74.33	8.56	104.00
	5	Prairies	263.86	131.45	55.69	110.53
	6	Sols nus	5.74	8.27	10.82	20.41
2006	1	Surface bâtie	11.58	1.11	2.53	14.72
	2	Couverture forestière	32.67	92.52	0.08	4.75
	3	Zones arbustives	48.77	19.87	8.52	9.09
	4	Terres agricoles	177.74	12.53	1.13	77.13
	5	Prairies	203.02	118.74	57.04	93.86
	6	Sols nus	116.67	55.35	8.67	55.05
2011	1	Surface bâtie	8.15	2.35	0.72	10.73
	2	Couverture forestière	28.83	92.42	0.34	5.64
	3	Zones arbustives	36.48	5.47	0.03	4.39
	4	Terres agricoles	178.36	26.40	2.00	61.55

Chapitre IV : Analyse des interactions entre l'occupation du sol et les paramètres du bilan hydrique

2016	5	Prairies	310.82	165.39	56.01	150.01
	6	Sols nus	28.86	8.46	18.90	22.48
	1	Surface bâtie	32.05	2.83	3.78	21.33
	2	Couverture forestière	1.78	49.22	0.12	0.11
	3	Zones arbustives	277.72	110.58	37.15	122.01
	4	Terres agricoles	196.33	59.18	20.48	78.08
2021	5	Prairies	43.86	11.63	14.21	25.79
	6	Sols nus	40.17	67.01	2.23	7.47
	1	Surface bâtie	11.58	1.11	2.53	14.72
	2	Couverture forestière	32.67	92.52	0.08	4.75
	3	Zones arbustives	48.77	19.87	8.91	9.09
	4	Terres agricoles	177.64	12.53	0.008	77.13
	5	Prairies	203.14	118.82	56.92	93.74
	6	Sols nus	116.68	55.35	8.67	55.04

Le tableau présente la répartition spatiale, en kilomètres carrés, des types d'occupation des sols (Land Use Land Cover – LULC) associés aux groupes hydrologiques de sols (Hydrological Soil Group – HSG : A, B, C et D) pour différentes années (2001, 2006, 2011, 2016 et 2021).

L'urbanisation progressive des surfaces bâties sur tous les types de sols, particulièrement marquée entre 2001 et 2016, traduit une expansion continue des zones urbaines, augmentant ainsi le potentiel de ruissellement du fait de la transformation de sols perméables en surfaces imperméables.

Les superficies forestières, relativement importantes en 2001 et 2006, ont diminué de manière significative après 2011, ce qui pourrait indiquer un processus de déforestation ou de dégradation des terres agricoles. Ces dernières sont converties en formations arbustives moins denses, comme en témoigne la forte augmentation des terres arbustives en 2016 sur l'ensemble des groupes.

Une diminution progressive des surfaces agricoles est également observée, traduisant un changement vers d'autres usages du sol.

Les prairies, bien que toujours couvrant une grande superficie, ont connu une forte réduction en 2016, après une légère augmentation en 2011, reflétant un transfert significatif vers d'autres classes telles que les zones urbaines ou les landes.

Enfin, les terres nues ont connu une augmentation particulièrement marquée entre 2001 et 2016 sur tous les groupes hydrologiques, signalant une forte dégradation des sols, une perte de couverture végétale et un risque accru d'érosion et de ruissellement.

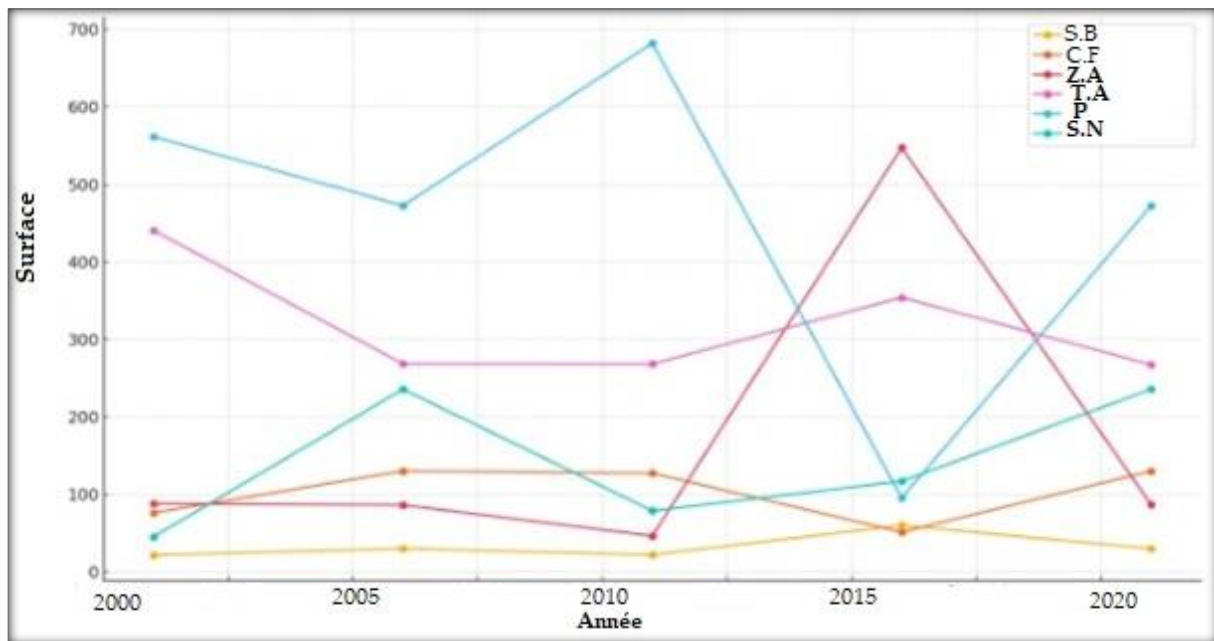


Figure IV.4 : Évolution des surfaces par type d'occupation du sol dans le bassin versant de l'Oued Fekan (2001-2021).

IV.2 Résultats de la modélisation du ruissellement de surface par intégration d'un SIG et de la méthode SCS-CN

La cartographie de l'utilisation des terres et des changements d'occupation du sol (LULCC) pour les années 2001, 2006, 2011, 2016 et 2021, réalisée à l'aide de la méthode de classification supervisée MLC, a été présentée au chapitre III. Dans ce chapitre, l'analyse se base sur la variation de l'occupation du sol afin d'estimer la profondeur de ruissellement pour chaque type d'occupation.

Tableau IV.5. Profondeur de ruissellement Q (en mm) selon les conditions d'humidité antérieures (sèches, moyennes, humides) pour les années 2001, 2006, 2011, 2016 et 2021.

		Max	Min	Moyenne
2001	<i>Sec</i>	381.2	1.8	97.3
	<i>Moyen</i>	406.8	57.2	187.7
	<i>Humide</i>	445.8	147.4	262.1
2006	<i>Sec</i>	380.7	1.8	119.3
	<i>Moyen</i>	433.03	57.2	203.9
	<i>Humide</i>	458.4	147.33	271.6
2011	<i>Sec</i>	381.4	1.8	90.4
	<i>Moyen</i>	406.8	57.2	180.8
	<i>Humide</i>	445.8	147.3	257.3
2016	<i>Sec</i>	380.5	1.8	149.6
	<i>Moyen</i>	433.2	57.4	232.8
	<i>Humide</i>	458.5	147.62	291.2
2021	<i>Sec</i>	380.6	1.8	119.2
	<i>Moyen</i>	433.03	57.2	203.9
	<i>Humide</i>	458.4	147.3	271.6

Le tableau (IV.5) présente les valeurs **maximales**, **minimales** et **moyennes** du ruissellement de surface Q (en mm), estimées à l'aide du modèle SCS-CN, en fonction de trois conditions d'humidité antérieure des sols (sol sec, moyen, humide) pour cinq années de référence. Ces résultats permettent d'analyser la sensibilité du ruissellement aux conditions initiales d'humidité et d'observer son évolution temporelle.

IV.3 Interprétation des résultats

Une comparaison des profondeurs de ruissellement Q au cours des années étudiées permet de dégager plusieurs tendances :

- **Valeurs maximales (Max) :** La profondeur maximale de ruissellement reste globalement stable entre 2001 et 2021, avec une légère augmentation en 2006 et 2016. Sous conditions humides (saturation des sols), elle atteint un pic de 458,5 mm en 2016. Cette stabilité relative suggère que, pour les événements extrêmes, la capacité de ruissellement du bassin reste comparable d'une année à l'autre.

- **Valeurs minimales (Min)** : Sous conditions sèches, les valeurs minimales sont très faibles et quasiment constantes (environ 1,8 mm), traduisant des épisodes de faibles précipitations où le ruissellement est quasi inexistant.
- **Valeurs moyennes (Moyen)** : Une tendance générale à l'augmentation du ruissellement moyen est observée entre 2001 et 2021, en particulier sous conditions moyennes et humides :
 - En conditions humides, le ruissellement moyen passe de 262,1 mm en 2001 à 271,6 mm en 2021.
 - En conditions moyennes, il progresse de 187,7 mm à 203,9 mm sur la même période.
 - En conditions sèches, bien que l'évolution soit moins marquée, le ruissellement moyen augmente également, passant de 97,3 mm en 2001 à 119,2 mm en 2021.

Cette évolution peut être interprétée comme une conséquence des transformations de l'occupation du sol, en particulier l'urbanisation croissante, qui réduit l'infiltration et accroît le ruissellement de surface.

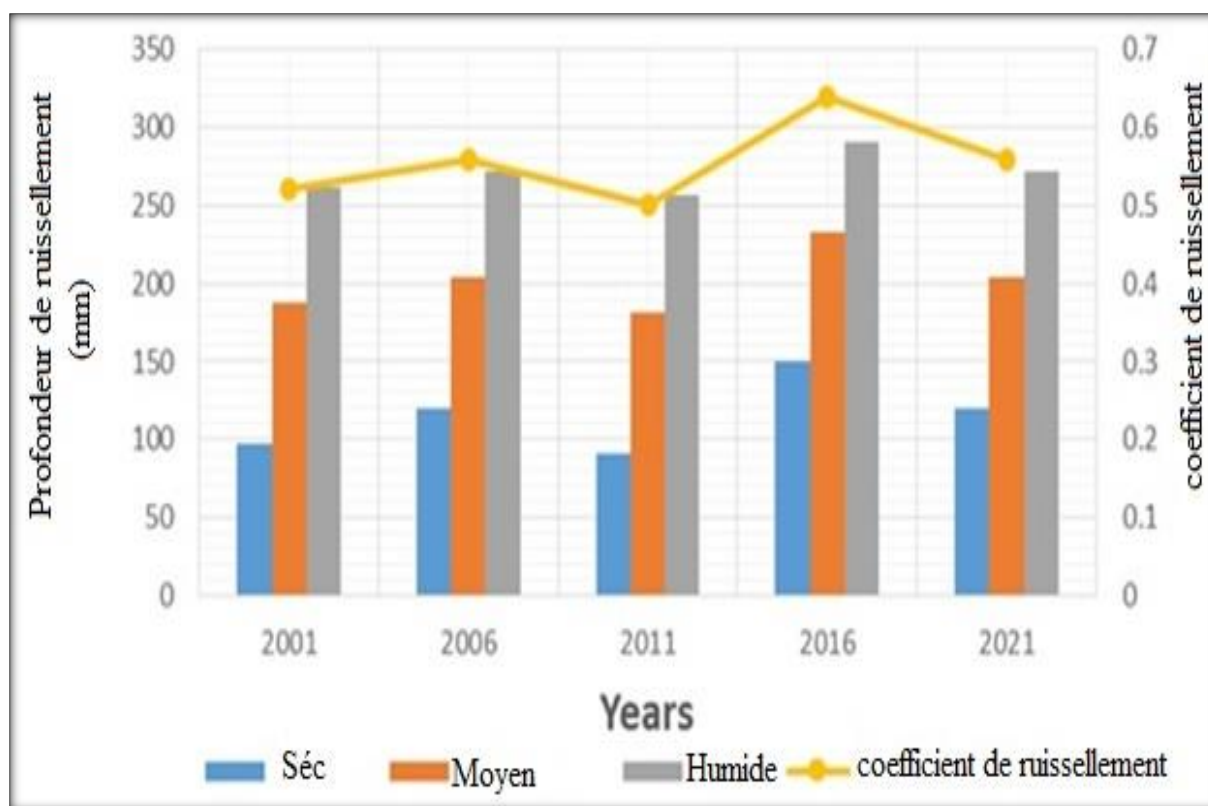


Figure IV.5. Profondeur de ruissellement Q (mm) et coefficient de ruissellement (CR) selon les conditions d'occupation des sols pour les années 2001, 2006, 2011, 2016 et 2021.

L'augmentation progressive des surfaces imperméabilisées dans le bassin versant de l'Oued Fekan a entraîné une hausse notable du ruissellement moyen entre 2001 et 2016, particulièrement en conditions humides. Le coefficient de ruissellement (CR) observé varie entre 0,50 et 0,65, traduisant une intensification progressive du ruissellement de surface au fil du temps (Figure IV.5).

La saturation des sols accentue considérablement le ruissellement, augmentant ainsi les risques d'inondation, notamment au cours des années récentes. Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés par Al Ghobari et al. (2020), qui soulignent que le modèle SCS-CN présente une performance de simulation plus fiable dans les contextes où le coefficient de ruissellement dépasse 0,5. Cela confirme que le CR constitue un indicateur pertinent pour représenter l'intensité de la réponse hydrologique du bassin versant en matière de production de ruissellement.

IV.3.1. Évolution des surfaces de ruissellement selon les classes LULC

Le tableau (IV.6) présente la surface de ruissellement par classe d'occupation des sols (LULC) pour les années 2001 à 2021, exprimée en km² et en pourcentage.

- **Surface bâtie :** Une augmentation significative des zones urbaines est observée, passant de 1,95 % en 2001 à 13,5 % en 2021. Cette croissance reflète l'urbanisation rapide du bassin versant, avec une augmentation de 138,91 km² sur la période. La progression des surfaces imperméables contribue ainsi à une augmentation du ruissellement.
- **Couverture forestière :** La superficie forestière diminue légèrement, de 6,45 % en 2001 à 5,95 % en 2021. Cette baisse résulte probablement de la déforestation ou de la conversion des terres forestières en zones agricoles ou urbaines, bien qu'une légère hausse ait été enregistrée entre 2001 et 2006.
- **Zones arbustives :** Cette classe connaît des variations importantes, passant de 7,4 % en 2001 à 9,84 % en 2021. Cependant, une chute spectaculaire est relevée entre 2011 et 2016, la surface passant de 43,03 km² à 539,94 km², probablement due à une conversion vers d'autres types de végétation ou usages des sols.
- **Terres agricoles :** La surface agricole diminue sensiblement, passant de 36,1 % en 2001 à 21,31 % en 2021, traduisant probablement une conversion des terres agricoles vers des zones urbaines ou d'autres usages.

Chapitre IV : Analyse des interactions entre l'occupation du sol et les paramètres du bilan hydrique

- **Prairies** : Les prairies restent majoritaires, représentant 44,3 % en 2001 et 45,32 % en 2021. Toutefois, une baisse notable est observée entre 2011 et 2016 (passant de 658,64 km² à 93,48 km²), suivie d'une reprise partielle après 2016.
- **Sols nus**: Cette classe a connu une forte augmentation entre 2001 et 2006, puis une légère diminution par la suite. La proportion est passée de 3,8 % en 2001 à 4,08 % en 2021, l'essentiel de cette croissance s'étant produit entre 2001 et 2006.

Tableau IV.6. Superficie de ruissellement de surface par classe LULC de 2001 à 2021 (en km² et en pourcentage).

LULC classeruisselleme nt de surface	2001		2006		2011		2016		2021	
	Surface (Km ²)	%	Surface (Km ²)	%	Surface (Km ²)	%	Surface (Km ²)	%	Surface (Km ²)	%
Surface bâtie	23.61	1.95	31.87	2.66	47.35	3.9	60.92	5.08	162.52	13.5
Couverture forestière	77.64	6.45	130.64	10.85	122.28	10.2	52.8	4.38	71.76	5.95
Zones arbustives	89.23	7.4	87.78	7.28	43.03	3.6	539.94	44.8	118.65	9.84
Terres agricoles	435	36.1	267.02	22.15	261.65	21.7	342.07	28.38	256.69	21.31
Prairies	533.81	44.3	458.9	38.07	658.64	54.6	93.48	7.75	546.22	45.32
Sols nus	45.82	3.8	228.9	18.99	72.16	6	115.89	9.61	49.26	4.08

Classes en augmentation :

- **Zones urbaines** : Le ruissellement dans les zones urbaines a fortement augmenté, avec une progression de 138,91 km² (+588,35 %) entre 2001 et 2021, reflétant une urbanisation rapide et une diminution de l'infiltration liée aux surfaces imperméables.
- **Arboriculture** : Bien que le ruissellement ait diminué entre 2001 et 2016, il a connu une forte hausse entre 2016 et 2021, avec une augmentation de 29,42 km² (+32,97 %). Cela

Chapitre IV : Analyse des interactions entre l'occupation du sol et les paramètres du bilan hydrique

pourrait résulter d'un changement dans la gestion des terres ou d'une expansion des zones arbustives.

- **Terres stériles** : Le ruissellement des terres stériles a augmenté significativement, notamment entre 2001 et 2006 (+183,08 km², soit +399,5 %), probablement lié à la dégradation des sols ou à un changement d'usage.

Classes en diminution :

- **Forêts** : La superficie de ruissellement liée aux forêts a diminué régulièrement, avec une perte totale de 5,88 km² (-7,57 %) entre 2001 et 2021, due à la réduction des surfaces forestières, vraisemblablement liée à la déforestation et à la conversion en autres usages.
- **Terres agricoles** : Forte diminution des surfaces agricoles, surtout entre 2001 et 2006 avec une perte de 167,98 km² (-38,6 %), liée à la conversion vers les zones urbaines ou d'autres usages.
- **Prairies** : Les prairies ont connu une importante réduction entre 2001 et 2016, avec une perte de 440,33 km² (-82,48 %), probablement due à l'urbanisation, à la conversion en terres agricoles ou autres changements d'usage.

Tableau IV.7. Évolution des différentes classes LULC du ruissellement de surface dans la zone d'étude, en km² et en pourcentage (%).

LULC classes	Changement (augmenter/diminuer) (2001-2006)		Changement (augmenter/diminuer) (2001-2011)		Changement (augmenter/diminuer) (2001-2016)		Changement (augmenter/diminuer) (2001-2021)	
Ruissellement de surface	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%
Surface bâtie	8.26	34.98	23.74	100.55	37.31	158.02	138.91	588.35
Couverture forestière	53	68.3	44.64	57.49	-24.84	-31.99	-5.88	-7.57
Zones arbustives	-1.45	-1.62	-46.2	-51.77	450.71	505.11	29.42	32.97
Terres agricoles	-167.98	-38.6	-173.35	-39.85	-92.93	-21.36	-178.31	-40.99
Prairies	-74.91	-14.03	124.83	23.38	-440.33	-82.48	12.41	2.32
Sols nus	183.08	399.5	26.34	57.48	70.07	152.92	3.44	7.50

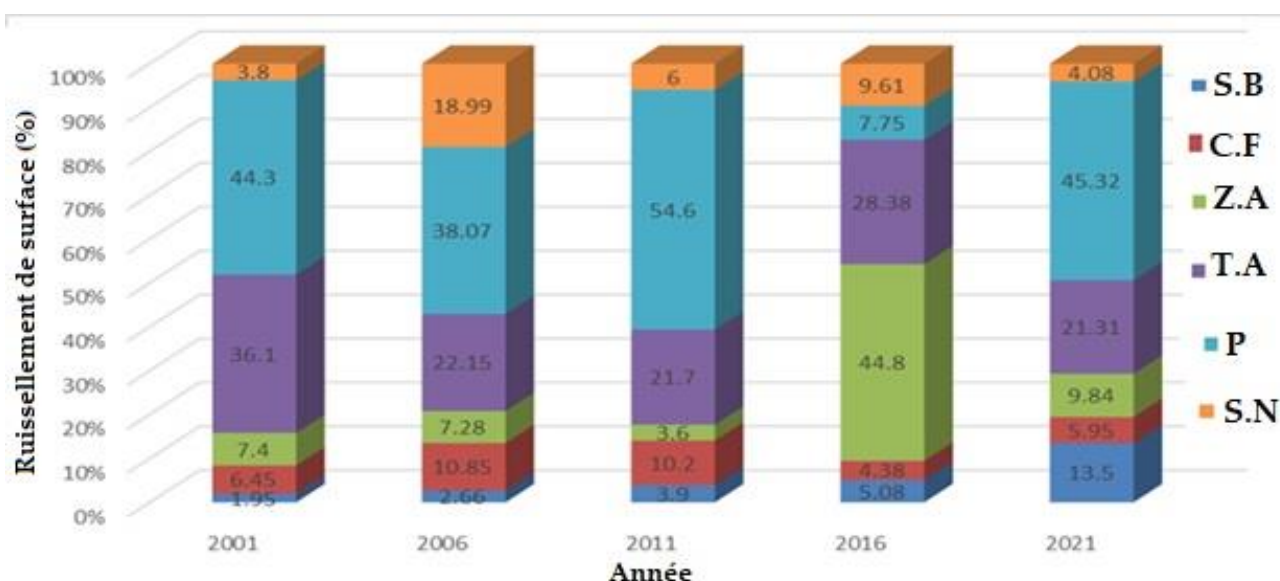


Figure IV.6 : Ruissellement de surface selon les différents types d'occupation du sol de 2001 à 2021.

Les données révèlent une transformation significative de l'occupation des sols et du ruissellement de surface entre 2001 et 2021 (Figure IV.6). L'urbanisation croissante a entraîné une augmentation notable du ruissellement dans les zones urbanisées, tandis que les superficies occupées par les terres agricoles et les forêts ont diminué, réduisant ainsi la capacité d'infiltration et modifiant l'équilibre du bilan hydrologique. Les variations observées dans les classes arboricoles et les prairies traduisent une dynamique complexe des usages du sol, marquée par une végétation plus ou moins persistante selon les périodes.

IV.3.2 Évolution spatiale du ruissellement dans le bassin versant de l'Oued Fekan (2001–2021)

La répartition spatiale de la profondeur du ruissellement, illustrée en Figure IV.7, varie entre 57 mm et 500 mm, avec une augmentation marquée en 2016. Cette hausse coïncide avec une évolution significative de l'occupation des sols dans le bassin versant, notamment une forte régression des terres agricoles au profit de zones bâties.

La ville de Mascara, l'une des agglomérations algériennes à urbanisation rapide, a été particulièrement touchée par la croissance démographique et l'exode rural, favorisant une expansion urbaine accélérée. Le principal changement dans le bassin de l'Oued Fekan réside dans la reconversion des terres agricoles en zones résidentielles, contribuant ainsi à l'augmentation du ruissellement de surface.

Cette urbanisation rapide a un impact hydrologique direct, en augmentant l'imperméabilisation des surfaces et en réduisant les capacités d'infiltration. Les valeurs de ruissellement ont ainsi progressé dans les zones fortement urbanisées. Selon Al-Juaidi (2018), cette augmentation est fortement corrélée à la hausse du coefficient CN dans les zones urbaines, tandis que les terres agricoles, forestières et prairies, à plus faible CN, génèrent moins de ruissellement.

Plusieurs études (Hu et al., 2020 ; Astuti et al., 2019 ; Chen et al., 2017 ; Gajbhiye et Mishra, 2012) confirment que l'urbanisation intensifie significativement le ruissellement. Zhou et al. (2013) précisent que cet impact dépend aussi de facteurs tels que l'échelle spatiale et temporelle, la géographie physique, la structure du paysage, ainsi que les caractéristiques climatiques et géologiques de la zone.

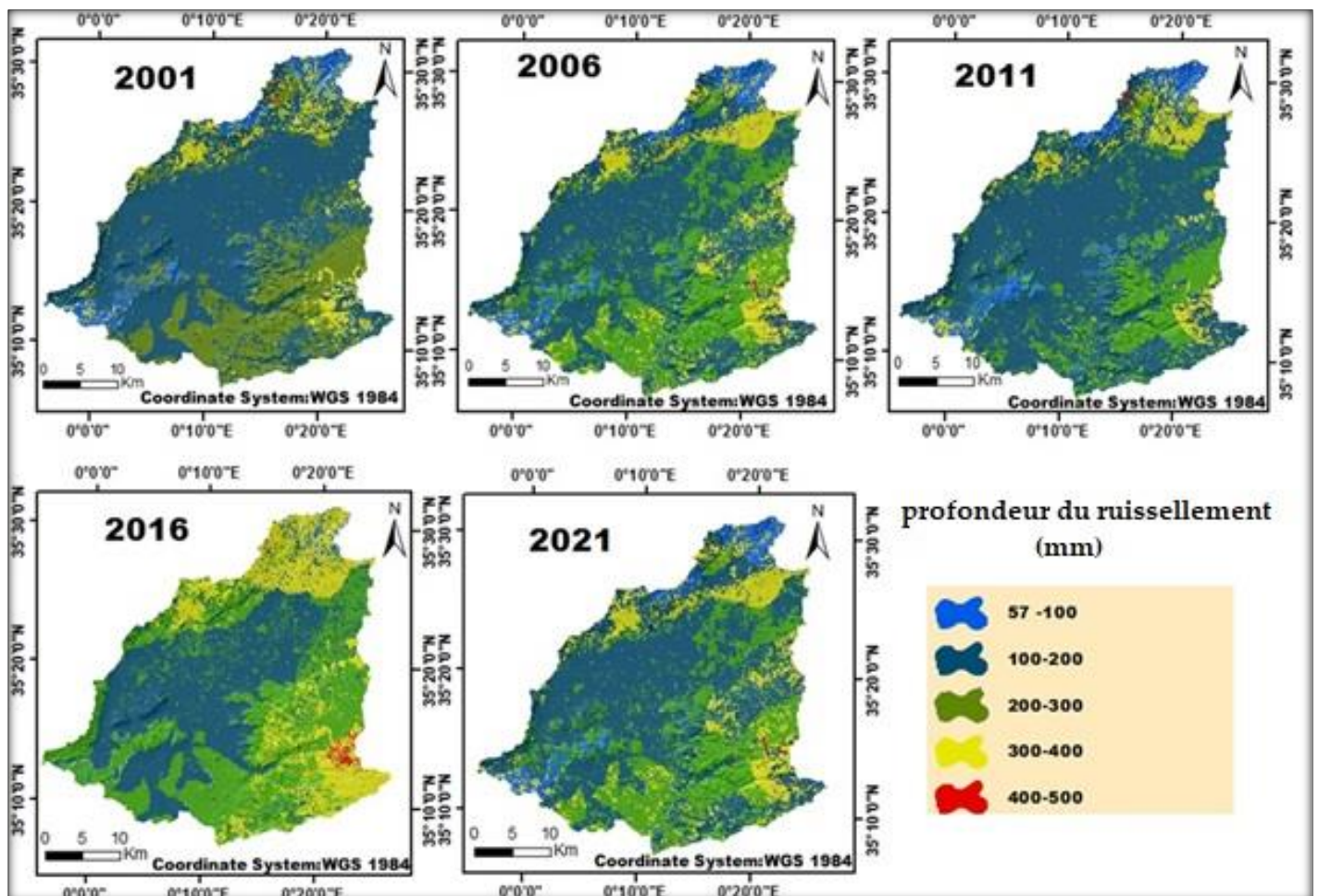


Figure IV.7. Profondeur du ruissellement dans le bassin versant de l'Oued Fekan entre 2001 et 2021

IV.4. Conclusion de la méthode NRCS-SCS-CN

Pour analyser l'impact des changements d'affectation des sols liés à l'urbanisation sur le ruissellement, nous avons utilisé le modèle SCS-CN intégré aux Systèmes d'Information Géographique (SIG). Ce modèle constitue un outil performant pour évaluer l'effet des changements d'occupation des sols sur le ruissellement à travers une analyse spatio-temporelle. L'évolution de l'occupation des sols a ainsi été corrélée aux variations du ruissellement entre 2001 et 2021.

Les principaux résultats sont les suivants :

- L'expansion progressive des zones urbaines a conduit à la conversion d'une large part des terres agricoles et forestières en surfaces bâties, réduisant l'infiltration et la capacité de stockage des sols, ce qui a fortement contribué à l'augmentation du ruissellement de surface dans la zone d'étude.
- Le ruissellement moyen est positivement corrélé à l'extension des zones bâties, l'urbanisation étant le facteur principal de cette hausse. Les zones à ruissellement élevé correspondent essentiellement aux secteurs fortement urbanisés.

Cette étude constitue une base importante pour les recherches futures, l'élaboration de solutions visant à atténuer le ruissellement et à réduire les risques de catastrophes urbaines induites par l'urbanisation. Elle est également un fondement solide pour la planification et la gestion urbaine à long terme, en particulier pour limiter les risques d'inondations en milieu urbain. Enfin, elle permet de cibler les zones prioritaires pour la mise en œuvre de mesures de conservation des sols et de gestion des ressources en eau.

Quantification mensuelle de l'évapotranspiration potentielle par type d'occupation des sols (LULC) à l'aide de la méthode de Penman-Monteith, basée sur les estimations des données TerraClimate.

IV.1 Introduction L'évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration potentielle (ETP) est un paramètre climatique clé représentant la quantité maximale d'eau pouvant être transférée de la surface terrestre vers l'atmosphère par évaporation et transpiration, sous des conditions d'humidité optimales.

Dans cette étude, l'ETP est extraite de la base de données TerraClimate, un ensemble de données climatiques haute résolution disponible à l'échelle mondiale, reposant sur la combinaison d'observations et de modélisations climatiques.

TerraClimate utilise la méthode Penman-Monteith FAO-56 standard pour le calcul de l'ETP, qui intègre plusieurs variables météorologiques essentielles : température de l'air, radiation solaire, humidité relative et vitesse du vent. Cette approche physiquement fondée est largement reconnue pour sa robustesse et sa précision dans divers contextes, notamment en climat semi-aride.

L'analyse porte sur différentes classes d'occupation des sols (LULC) issues des cartes de 2001 à 2021, en distinguant six classes principales. Pour chaque type d'occupation du sol, l'évolution temporelle moyenne de l'ETP a été extraite et analysée. Cette approche permet de mieux comprendre les différences d'évapotranspiration potentielle liées aux dynamiques d'occupation des sols et d'évaluer leurs impacts sur les bilans hydriques locaux.

IV.2 Principe de l'équation de Penman-Monteith FAO-56 pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle

De nombreuses méthodes empiriques ont été développées au cours des cinquante dernières années pour estimer l'évapotranspiration à partir de différentes variables climatiques. Certaines s'appuient sur la célèbre équation de Penman (1948), initialement conçue pour estimer l'évaporation des eaux libres, des sols nus et des surfaces herbacées, aujourd'hui regroupées sous le terme d'évapotranspiration.

Cette équation combine un bilan énergétique et une formulation aérodynamique, et s'exprime ainsi :

$$\lambda E = \frac{[\Delta(R_n - G)] + (\gamma \lambda E_a)}{(\Delta + \lambda)} \quad (\text{IV. 12})$$

où :

λE :flux de chaleur latente d'évaporation ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$)

E_a :flux de vapeur transportée par le vent (mm j^{-1}).

G :Flux de chaleur sensible dans le sol ($\text{MJ m}^{-2} \text{j}^{-1}$)

R_n :Flux de rayonnement net ($\text{MJ m}^{-2} \text{j}^{-1}$)

γ :constante psychrométrique ($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)

Δ : pente de la courbe de pression de vapeur saturante (e^0) par rapport à la température ($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$), calculée à partir de la température moyenne journalière.

Des extensions de cette équation ont intégré un terme de résistance de surface (Monteith, 1965). L'équation de Penman-Monteith journalière s'écrit alors :

$$ET_0 = \frac{\Delta(R_n - G) + \left[86400 \frac{p_a c_p (e_s^0 - e_a)}{r_{av}} \right]}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_{av}} \right)} \quad (\text{IV. 13})$$

avec :

p_a :densité de l'air ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

c_p :chaleur spécifique de l'air sec

e_s^0 :pression de vapeur saturante moyenne (kPa), calculée comme la moyenne des valeurs à la température minimale et maximale de l'air ($^\circ\text{C}$)

r_{av} :résistance aérodynamique moyenne de surface pour la vapeur d'eau ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)

e_a :pression de vapeur ambiante moyenne journalière (kPa)

r_s :résistance de surface du couvert végétal ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)

R_n :rayonnement net à la surface de la culture, $\text{MJ m}^{-2} \text{j}^{-1}$

G : densité de flux thermique du sol, $\text{MJ m}^{-2} \text{j}^{-1}$

γ :constante psychrométrique [$\text{kPa}/^\circ\text{C}$]

Δ :pente de la courbe de pression de vapeur de saturation [$\text{kPa}/^\circ\text{C}$]

La FAO (Allen et al., 1998) a recommandé une version simplifiée, connue sous le nom d'équation Penman-Monteith FAO-56, adaptée à une culture de référence (herbe tondue), caractérisée par une hauteur de 0,12 m, une résistance de surface fixe de $70 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$ et un albédo de 0,23 (Smith et al., 1992).

Cette version s'écrit :

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)} \quad (\text{IV. 14})$$

où :

ET_0 :taux d'évapotranspiration de référence ($\text{mm}\cdot\text{j}^{-1}$)

T :température moyenne de l'air ($^{\circ}\text{C}$)

u_2 :vitesse du vent ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) mesurée à 2 mètres au-dessus du sol.

Cette équation peut être utilisée à l'échelle horaire en adaptant les constantes et unités (notamment en divisant la constante 900 par 24 et en exprimant R_n et G en $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$).

En 1999, l'Association d'irrigation (IA) a demandé au comité ASCE-ET (Société américaine de génie civil) de développer une équation normalisée pour l'estimation de l'évapotranspiration. Deux équations ont été produites :

ET_0 : pour une culture courte

ET_{SZ} : pour une culture haute

Elles s'appliquent à des pas de temps journaliers et horaires :

$$ET_{SZ} = \frac{0.408 (R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T+273} u_2 (e_s^0 - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + C_d u_2)} \quad (\text{IV. 15})$$

avec :

ET_{SZ} : l'évapotranspiration de référence standardisée

C_n, C_d :constantes dépendant du type de culture et du pas de temps

La méthode Penman-Monteith FAO-56 repose sur des bases physiques solides et intègre des paramètres physiologiques et aérodynamiques. Des procédures existent également pour estimer les données climatiques manquantes (Allen et al., 2005 ; Romero et al., 2009).

L'objectif est de présenter une méthode de calcul de l'évapotranspiration de référence, basée sur la méthode FAO-56, à partir des données météorologiques disponibles mesurées sur le site d'étude.

IV.3. Étapes pratiques du calcul de l'évapotranspiration de référence (PET_0) selon la méthode de Penman-Monteith (FAO-56)

IV.3.1. Collecte des données météorologiques nécessaires (pas de temps mensuel)

Pour l'application de la méthode Penman-Monteith (FAO-56) à un pas de temps mensuel, les données climatiques suivantes sont requises :

- Températures minimale (T_{min}) et maximale (T_{max}) [$^{\circ}\text{C}$]
- Humidité relative moyenne (RH_{moy}) [%] ou RH_{max} et RH_{min}
- Vitesse moyenne du vent à 2 m u_2 [m/s]
- Rayonnement solaire total mensuel (R_s) [$\text{MJ}/\text{m}^2/\text{mois}$]
- Latitude [$^{\circ}$] : nécessaire pour les calculs astronomiques (durée du jour, radiation extraterrestre)
- Altitude [m] : utilisée pour estimer la pression atmosphérique

IV.3.2. Calcul des variables intermédiaires

À partir de ces données, plusieurs variables intermédiaires doivent être calculées pour appliquer l'équation FAO-56, notamment :

- Pression de vapeur saturante et pression de vapeur réelle
- Pente de la courbe de pression de vapeur saturante (Δ)
- Constante psychrométrique (γ)
- Rayonnement net (R)
- Flux de chaleur dans le sol (G), supposé nul à l'échelle mensuelle

- Résistance aérodynamique et résistance de surface (paramètres standards pour une culture de référence)

IV. 4 Évapotranspiration potentielle mensuelle (ETP) selon l'occupation du sol (LULC)

L'évapotranspiration potentielle (ETP) a été évaluée pour différentes années de référence (2001, 2006, 2011, 2016 et 2021) à l'aide des données climatiques issues de la base TerraClimate et selon la méthode de Penman-Monteith.

Les résultats montrent une nette augmentation de la ETP pendant la période estivale (juin, juillet, août), ce qui est cohérent avec l'élévation des températures et l'augmentation du rayonnement solaire au cours de ces mois. Cette tendance est observable dans l'ensemble des types d'occupation du sol analysés, reflétant l'effet saisonnier marqué sur les besoins évaporatifs.

Tableau IV.8 : Évolution de l'évapotranspiration potentielle (ETP) moyenne mensuelle selon les types d'occupation du sol (2001–2021)

	mois	Janvier	Février	mars	Avril	mai	Juin	Juillet	août	Septembre	Octobre	Novembre	Decembre
2001	Surface bâtie	50.6	54.3	100.6	116.6	154	192.2	211.7	188.2	134.5	94.7	52.2	34.8
	Couverture forestière	51.1	54.7	100	116.9	155.4	198.2	218.4	189.6	135.7	96.1	51.6	34.7
	Zones arbustives	50.8	54.3	100.3	117.2	155.3	195	214.8	190	134.5	95.9	51.6	34.6
	Terres agricoles	50.7	54.4	100.6	118.7	156.6	195	213.7	188.9	134.8	95.5	52	34.6
	Prairies	50.8	54.4	100.9	117.3	155.1	193.9	213	189.6	134.5	95.2	52.03	34.8
	Sols nus	50.7	54.7	101	117.4	154.5	192.2	211.6	189.7	134.4	94.4	52.5	34.8
2006	Surface bâtie	39.12	48.8	91.6	119	153.6	183.9	211	197	136.6	98	61.2	40.8
	Couverture forestière	40.3	48.9	92.05	120.1	154.5	190.8	217.2	200.2	138.2	98.8	61.06	40.3
	Zones arbustives	39.4	48.5	91.5	119.5	154.3	186.9	213.8	199.3	136.6	98.5	60.6	40.3
	Terres agricoles	39.6	48.8	92.5	121.5	155.9	187.9	212	197.8	137.3	98.6	61.3	40.6
	Prairies	39.5	48.8	91.8	119.7	154.3	186.3	212.6	199.5	136.8	98.3	61	40.5
	Sols nus	39.5	48.8	92.3	120.6	155.6	187.5	212.7	199	137.2	98.6	61.2	40.6
2011	Surface bâtie	42.4	51.2	89.2	119.8	149.9	172.2	210.2	189.2	139.1	89.6	59.9	37.2
	Couverture forestière	42.9	51.3	89.5	119.8	150.6	176.7	216.8	190.8	139.2	89.7	59.3	36.7
	Zones arbustives	42.3	51	89.5	120.9	151.1	173.6	211.8	190.5	138.3	90.2	59.7	36.9
	Terres agricoles	42.4	51.3	89.9	121.2	151.9	174	211.6	189.8	138.6	90.2	59.9	37.1

	Prairies	42.5	51.3	89.6	120.7	150.9	173.8	212.2	190.4	138.8	89.8	59.8	37
	Sols nus	42.3	51.5	89.7	120.7	151.2	172.8	210.6	190.2	138.8	89.7	60.2	37.2
2016	Surface bâtie	50	66	87.8	114	154.4	184	212.8	194.6	142.8	99.2	66.3	39.7
	Couverture forestière	50.2	65.8	88.5	114.9	155.5	190.9	218.8	195.6	144.8	99.9	65.6	39.5
	Zones arbustives												
	Terres agricoles	50.1	66.1	88.4	115.7	155.6	185.4	212	194.8	142.9	99.5	66.3	39.8
	Prairies	49.9	65.9	87.8	114.3	154.8	184.6	213.6	195.7	142.7	99.2	66.3	39.6
	Sols nus	49.9	65.6	88.1	114.5	154.8	188.3	216.5	195.6	143.8	99.6	65.5	39.4
2021	Surface bâtie	47	76.3	93.3	119.8	167.4	182.3	224.7	204.2	146.3	104.8	55.8	46.8
	Couverture forestière	48	77	93	121.3	167.7	188.4	231.4	208	150.8	106	54.7	47.2
	Zones arbustives	47.3	76.4	93.2	120.9	167.8	185.2	227.2	207.3	148.7	105.5	54.8	46.9
	Terres agricoles	47.2	76.4	93.9	121.9	169.3	184.9	225.6	205.5	148.4	105.2	56	47.3
	Prairies	47.3	76.5	93.7	120.6	167.9	183.1	225.2	205.1	147	104.8	55.9	46.9
	Sols nus	47.8	77.9	95.3	120.9	168.1	182	223.9	204.7	146.7	103.4	56.9	47.3

IV.4.1 Variation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) selon les types d'occupation du sol (LULC)

- **Couverture forestière** présentent généralement les valeurs de ETP les plus élevées parmi les différentes classes d'occupation du sol. Cela s'explique probablement par une canopée dense et une activité de transpiration végétale importante.
- **Les zones urbaines** montrent des valeurs de ETP inférieures à celles des forêts, mais avec une tendance à l'augmentation au fil des années, possiblement en raison de l'effet d'îlot de chaleur urbain.
- **Les terres agricoles et les prairies** présentent des valeurs intermédiaires de ETP, particulièrement élevées en été, ce qui reflète l'activité évaporative des cultures et des herbacées.
- **Les terres nues** enregistrent les valeurs de ETP les plus faibles, conformément à leur faible couverture végétale et à l'absence de transpiration.

IV.4.1.1 Comparaison interannuelle

- **2001** : La ETP reste modérée, avec des valeurs estivales n'excédant généralement pas 210 mm/mois.
- **2006** : On observe une légère baisse en début d'année, suivie d'une augmentation marquée en été.
- **2011** : La ETP diminue globalement par rapport à 2006, ce qui pourrait indiquer une année plus fraîche ou plus humide.
- **2016** : Hausse notable de la ETP estivale, notamment dans les classes forestières et agricoles.
- **2021** : Les valeurs atteignent des niveaux parmi les plus élevés de la période, dépassant 230 mm/mois en été dans certaines classes (forêts, broussailles).

IV.4.1.2. Analyse mensuelle

- **Janvier à mars** : La ETP est faible (<100 mm), ce qui correspond aux températures hivernales basses.
- **Avril à août** : Période de ETP maximale, en lien avec la saison chaude.

- **Septembre à décembre** : Diminution progressive de la ETP avec le recul des températures.

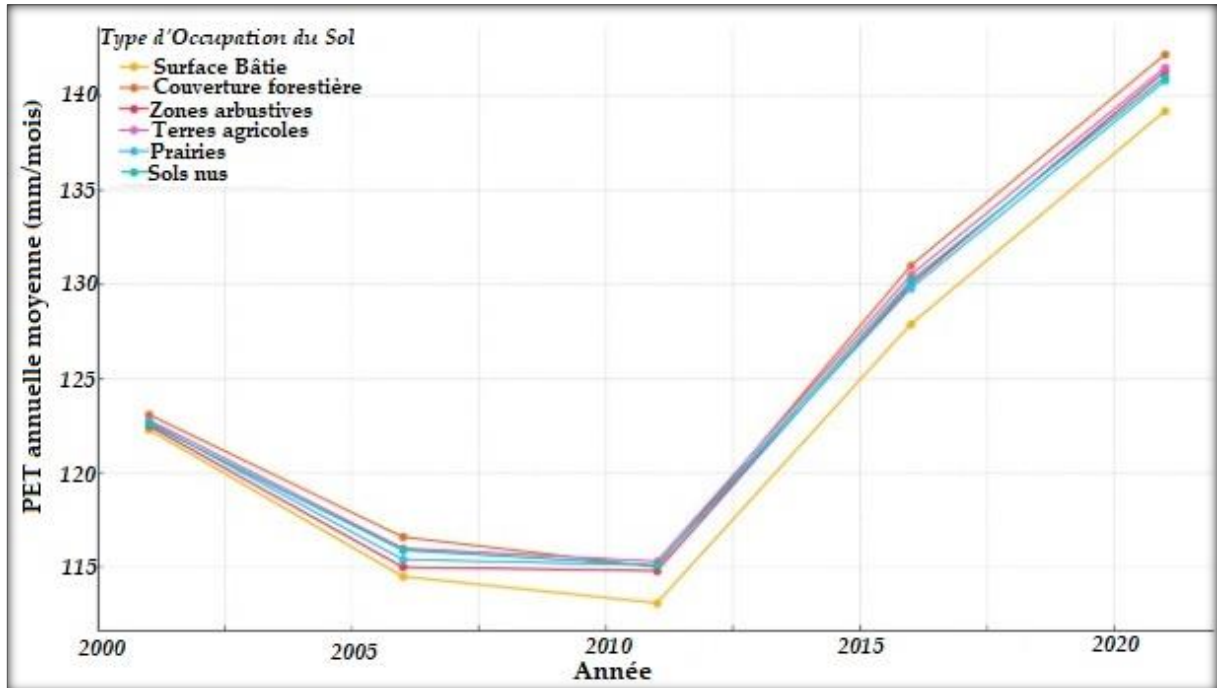


Figure IV.8. Évolution de l'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne (ETP) selon le type d'occupation du sol

Le graphique illustre la dynamique de la ETP annuelle moyenne selon les classes LULC pour les années 2001, 2006, 2011, 2016 et 2021, à partir des données TerraClimate et de la méthode Penman-Monteith.

Principales observations :

- ETP est systématiquement plus élevée dans les forêts, suivies des terres agricoles et des prairies.
- Les zones urbaines montrent une tendance haussière, probablement liée à l'accentuation de l'effet d'îlot de chaleur.
- Les terres nues conservent les niveaux de ETP les plus faibles, bien qu'une légère augmentation soit observée au fil du temps.
- Une augmentation générale de la ETP est constatée dans toutes les classes sur la période 2001–2021, en lien possible avec le réchauffement climatique régional.

Cette analyse souligne l'importance de la structure de l'occupation du sol dans la régulation des flux hydriques, en interaction avec les tendances climatiques.

IV.5. Conclusion sur l'application de la méthode de Penman-Monteith pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP)

Entre 2001 et 2021, la ETP a augmenté dans toutes les classes d'occupation du sol. Les valeurs les plus élevées sont observées dans les forêts et les terres agricoles, tandis que les zones urbaines, initialement peu évaporantes, enregistrent une hausse significative liée à l'effet d'îlot de chaleur. Les terres nues restent les moins productrices d'évapotranspiration.

Cette tendance reflète l'influence conjointe du changement climatique régional et de l'évolution de l'occupation des sols. Elle met en évidence la nécessité d'adapter les stratégies de gestion de l'eau en fonction des dynamiques environnementales actuelles et futures.

Conclusion générale du chapitre IV : Impact des transformations de l'occupation du sol sur les composantes du bilan hydrologique

L'évolution de l'occupation du sol dans le bassin versant de l'Oued Fekan entre 2001 et 2021 a profondément influencé les principales composantes du bilan hydrologique, notamment le ruissellement de surface et l'évapotranspiration potentielle (ETP). L'analyse, appuyée par des outils géospatiaux, des données climatiques et des modèles hydrologiques (SCS-CN et Penman-Monteith FAO-56), met en évidence les effets directs de ces transformations sur le fonctionnement hydrologique du bassin.

L'expansion urbaine survenue au cours des deux dernières décennies a significativement perturbé les équilibres naturels. La conversion des terres agricoles et forestières en surfaces bâties a entraîné une réduction marquée de la capacité d'infiltration des sols, parallèlement à une augmentation du ruissellement de surface. Les résultats montrent une corrélation nette entre l'intensification de l'urbanisation et la hausse du ruissellement, accentuant les risques d'inondation, particulièrement dans les zones à forte densité construite.

L'analyse de la ETP selon la méthode de Penman-Monteith, appliquée aux données mensuelles de TerraClimate, révèle une augmentation généralisée de l'évapotranspiration potentielle dans toutes les classes d'occupation du sol entre 2001 et 2021. Les forêts et terres agricoles enregistrent les valeurs les plus élevées, tandis que les zones urbaines, initialement peu évaporantes, présentent une hausse progressive, probablement liée à l'amplification de l'effet d'îlot de chaleur urbain combiné aux effets du changement climatique régional.

Ces dynamiques d'occupation du sol ont entraîné :

- Une augmentation significative du ruissellement, en lien avec l'imperméabilisation et la diminution de la couverture végétale ;
- Une réduction de l'infiltration effective, limitant la recharge des nappes souterraines ;
- Une hausse progressive de la ETP, accentuant les pertes en eau par évaporation et transpiration.

Ces évolutions traduisent un déséquilibre croissant du cycle hydrologique local, marqué par une intensification des flux de surface, une diminution des apports souterrains et une pression accrue sur la ressource en eau.

En résumé, les changements d'usage du sol apparaissent comme un facteur déterminant dans l'évolution des dynamiques hydrologiques du bassin. Ils renforcent la vulnérabilité du

territoire face aux risques d'inondation, à la baisse des ressources en eau souterraine et à la raréfaction globale de l'eau.

Ces constats soulignent l'importance d'adopter des stratégies d'aménagement intégrant la préservation des fonctions hydrologiques des sols, notamment à travers :

- Une planification urbaine durable,
- La protection des espaces naturels,
- Et la mise en œuvre d'une gestion intégrée des ressources en eau (GIRE).

Ainsi, une compréhension approfondie des impacts des transformations de l'occupation du sol sur le bilan hydrologique constitue un élément clé pour guider une gestion durable et résiliente de l'eau à l'échelle du bassin versant.

***Chapitre V : Analyse de la gestion intégrée de la
demande et de l'offre en eau à l'aide du modèle WEAP
dans le bassin versant d'Oued Fekan***

Introduction :

L'Algérie est confrontée à une pression croissante sur ses ressources en eau, aggravée par les effets du changement climatique, la rareté des eaux de surface, une croissance démographique soutenue et une urbanisation rapide. À ces facteurs s'ajoutent des pratiques de gestion inefficaces ainsi que des infrastructures hydrauliques vieillissantes, contribuant à accentuer le stress hydrique à l'échelle nationale. La situation est particulièrement critique dans les zones semi-arides, où la variabilité spatio-temporelle des précipitations complique davantage la planification et la gestion des ressources en eau.

Dans ce contexte, la mise en œuvre d'une approche de gestion intégrée et durable des ressources en eau s'avère indispensable. Celle-ci repose sur un équilibre entre les stratégies d'offre telles que la mobilisation de nouvelles ressources et les stratégies de demande, incluant l'optimisation des usages, la réduction des pertes et l'amélioration de l'efficacité des systèmes d'approvisionnement. La réussite de cette démarche suppose également une gouvernance renforcée du secteur et une coopération étroite entre l'État, les collectivités territoriales, les usagers économiques et la société civile.

Le bassin versant de l'Oued Fekan, situé dans la wilaya de Mascara, à l'ouest de l'Algérie, constitue un exemple représentatif de ces problématiques. La plaine de Ghriss, qui en fait partie, reçoit en moyenne entre 300 et 350 mm de précipitations annuelles, mais dépend majoritairement d'une nappe phréatique en situation de surexploitation. Le secteur agricole y représente de loin le principal consommateur d'eau. Selon les travaux de Bekkoussa et al. (2008), les prélèvements totaux dans cette plaine étaient estimés à 73,5 millions de m³ en 1972, dont 66 millions de m³ destinés à l'irrigation, 4,4 millions de m³ à l'alimentation en eau potable, et 3,1 millions de m³ à d'autres usages.

Face à ces enjeux, le recours à des outils d'aide à la décision devient essentiel pour analyser les interactions entre l'offre et la demande en eau, et pour identifier les leviers d'action en faveur d'une gestion plus efficiente. Le modèle WEAP (Water Evaluation and Planning System) constitue à cet égard un cadre méthodologique pertinent pour évaluer le bilan hydrique, simuler divers scénarios de gestion, et appuyer la planification stratégique des ressources en eau.

La présente étude vise à appliquer le modèle WEAP au bassin versant de l'Oued Fekan afin de mieux comprendre la dynamique hydrique actuelle et de proposer des options de gestion intégrée adaptées aux spécificités locales. Des recommandations concrètes et opérationnelles seront formulées à l'intention des décideurs, gestionnaires et chercheurs impliqués dans la

gestion des ressources hydriques, dans le but de répondre aux enjeux propres à ce bassin versant et de promouvoir des pratiques de gestion durable.

V.1 L'allocation des ressources en eau : enjeux et perspectives

L'allocation des ressources en eau est devenue une priorité mondiale face à l'augmentation constante de la pression exercée sur ces ressources limitées (Ren et al., 2017 ; Arthington et al., 2018). Alors que seulement 3 % de l'eau terrestre est douce, moins d'un quart de cette quantité est réellement accessible sous forme d'eaux de surface et souterraines (UNESCO, 2020). Aujourd'hui, près d'un tiers de la population mondiale vit dans des pays en situation de stress hydrique.

Cette pression est principalement alimentée par la croissance démographique, l'expansion agricole et industrielle, ainsi que par des pratiques de gestion souvent non durables (Cai, 2017 ; Hatamkhani, 2022). Par ailleurs, la disponibilité en eau est compromise par des facteurs aggravants tels que la dégradation des écosystèmes, la pollution des ressources, le changement climatique et la variabilité hydrologique (Arthington et al., 2018 ; Pettinotti, 2018).

Dans ce contexte, l'allocation équitable et optimale de l'eau s'impose comme un levier stratégique pour réduire le stress hydrique, préserver les écosystèmes et garantir un développement durable (Roozbahani et al., 2015). Elle constitue une composante essentielle de la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE), qui vise à concilier les objectifs sociaux, économiques et environnementaux au sein de cadres réglementaires cohérents, appuyés par des mécanismes de coopération adaptés (Hatamkhani, 2022). En période de rareté, l'allocation devient un mécanisme d'arbitrage entre usages concurrents, pouvant renforcer la coopération ou, au contraire, générer des tensions entre acteurs d'un même bassin (Kazemi, 2022).

V.1.1 Description de la région d'étude

La wilaya de Mascara illustre parfaitement les enjeux liés à l'allocation des ressources en eau dans un contexte semi-aride. Classée zone agropole en raison de l'importance de son activité agricole, la région subit une pression croissante sur ses ressources hydriques, exacerbée par l'irrégularité des précipitations, l'élévation des températures, la croissance démographique et les prélèvements excessifs dans les nappes souterraines (Djadouni, 2017).

Dans la zone d'étude, l'irrigation concerne 34 % du territoire de la wilaya et 56 % des terres irriguées à l'échelle provinciale, avec plus de 96 % de l'eau agricole provenant des eaux souterraines. La plaine de Ghriss, en particulier, représente une zone agricole stratégique, avec plus de 90 % de sa superficie totale dédiée à l'agriculture (Hamimed, 2017 ; Chraïr et al., 2020). Le secteur forestier y occupe également une place notable.

La rareté des eaux de surface, l'absence de barrages ou de réservoirs naturels ou artificiels (Bekkoussa et al., 2013), et la nature non pérenne des écoulements (Kenniche et al., 2022), font de la nappe souterraine — notamment l'aquifère de Ghriss — la principale source d'approvisionnement en eau potable, agricole et industrielle. Cet aquifère repose sur un substrat imperméable formé de marnes miocènes et bénéficie d'une recharge moyenne annuelle estimée à 65,3 millions de m³, issue de l'infiltration des précipitations, du retour des eaux d'irrigation et de la recharge latérale en provenance des aquifères jurassique, pliocène et gréseux environnants (Lakhdari, 2014).

Les caractéristiques pédologiques de la plaine, marquées par une perméabilité élevée (75 % des mesures supérieures à 3,9 cm/h ; moyenne de 7,93 cm/h selon l'ANRH), ne posent pas de contraintes majeures à l'irrigation. Toutefois, en dépit de ces potentialités, la surexploitation de la nappe engendre une baisse préoccupante du niveau piézométrique, variant entre -6 et -80 m, avec un cône de dépression identifié au centre de la plaine (Bekkoussa et al., 2017 ; Benadela et al., 2022).

Cette surexploitation est exacerbée par la demande agricole, largement supérieure à la consommation domestique, et par une recharge insuffisante face aux prélèvements croissants. Les sécheresses récurrentes, l'augmentation des températures, ainsi que l'insuffisance des infrastructures de stockage aggravent la situation. Par ailleurs, l'envasement des barrages situés en amont limite leur efficacité, réduisant leur contribution au soutien des débits et à la recharge de la nappe (Kherbach & Molle, 2022).

Ainsi, la wilaya de Mascara se trouve dans une situation critique, nécessitant une révision en profondeur des politiques d'allocation de l'eau. Cette révision doit s'appuyer sur une meilleure coordination intersectorielle, une évaluation rigoureuse des besoins, une régulation efficace des prélèvements, ainsi que sur la mise en œuvre d'une gouvernance hydrique intégrée et durable.

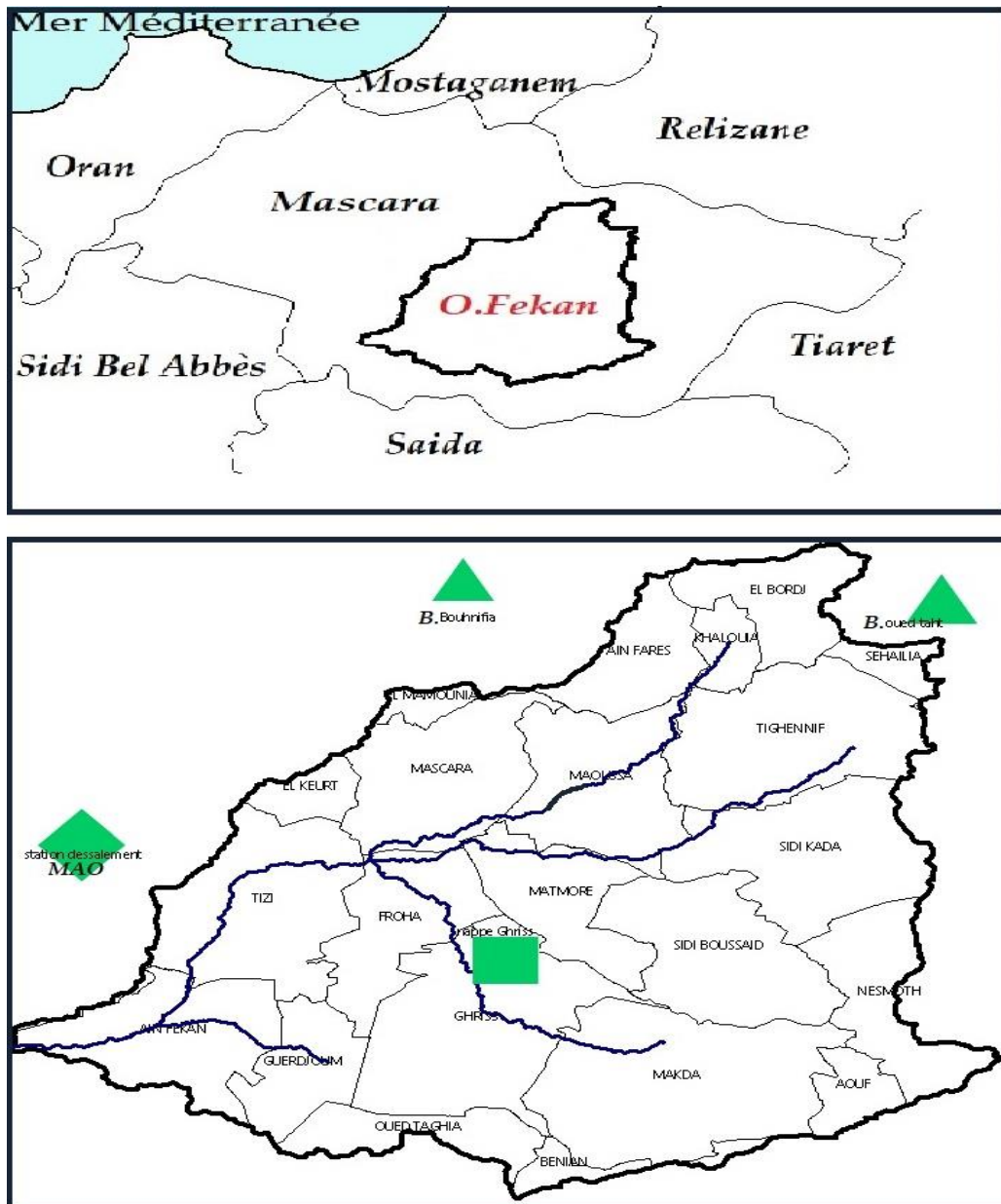


Figure V.1 : Localisation et présentation administrative de la zone d'étude
– communes, villes et réseau hydrographique

V.2 Optimisation de la gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin versant de l'Oued Fekan

Le bassin versant de l'Oued Fekan, situé dans une zone semi-aride de l'Algérie, fait face à une raréfaction progressive de ses ressources en eau. La gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) apparaît ainsi comme un cadre stratégique incontournable pour assurer une répartition durable, équitable et efficiente de l'eau entre les différents usages. L'application du modèle WEAP constitue, à cet égard, un levier pertinent pour analyser les ressources disponibles,

estimer les besoins présents et futurs, et simuler divers scénarios de gestion tenant compte des contraintes environnementales, économiques et sociales.

Cette étude se propose de :

- Identifier les principaux défis liés à la gestion de l'eau dans le bassin de l'Oued Fekan
- Utiliser WEAP pour évaluer les ressources hydriques, modéliser le bilan hydrologique et formuler des stratégies d'allocation rationnelles ;
- Déterminer les facteurs clés (climatiques, socio-économiques, institutionnels) influençant la durabilité de la gestion de l'eau ;
- Equilibrer les usages concurrents (agriculture, industrie, ménages) à travers une modélisation prospective et intégrée.

V.3. Collecte de données et outils d'analyse

La méthodologie de cette étude repose sur la collecte et l'analyse de données hydrologiques, socio-économiques et physiques du bassin versant de l'Oued Fekan. Ces données, obtenues auprès de l'Agence de Gestion Intégrée des Ressources en Eau, de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, de la Direction des Services Agricoles, de la Direction des Ressources en Eau, et de l'Office National de l'Assainissement, et Algérienne des Eaux ont été traitées à l'aide d'ArcGIS et Excel pour leur intégration dans le modèle WEAP. L'objectif est d'élaborer des stratégies durables d'allocation des ressources en eau à l'échelle du bassin.

V.4 Description des ressources

V.4.1. Alimentation en eau

La wilaya de Mascara, d'une superficie de 5 941 km², est administrativement subdivisée en 16 daïras et 47 communes. Entre 2008 et 2022, la population a connu une croissance significative, passant de 784 073 à 1 018 859 habitants. Cette évolution démographique s'est traduite par une augmentation constante des besoins en eau potable, estimés en 2022 à environ 152 829 m³/jour, sur la base d'une consommation moyenne de 150 litres par habitant et par jour (D.R.E Mascara 2025)

V.4.1.2 Sources d'approvisionnement en eau (AGIRE.2023)

L'approvisionnement en eau potable dans la wilaya de Mascara repose sur une combinaison de trois sources principales : les eaux de surface, les eaux souterraines et les eaux non

conventionnelles. Cette diversité reflète à la fois les contraintes hydrologiques de la région et les stratégies mises en place pour sécuriser l'accès à l'eau.

- **Les eaux de surface**, qui représentent environ **13 %** de l'approvisionnement total, proviennent essentiellement des barrages de **Bouhanifia** (15 133 m³/j), **Oued Taht** (7 536 m³/j), **Fergoug** (640 m³/j) et **Chorfa**(37 m³/j), pour un volume journalier combiné de **23 544 m³**. Leur contribution reste modeste, notamment en raison de la variabilité climatique et de l'envasement progressif de ces infrastructures.
- **Les eaux souterraines**, constituant **40 %** de l'approvisionnement, sont extraites à hauteur de **73 664 m³/j** pour desservir **39 communes**. Elles représentent une ressource stratégique, particulièrement dans les zones éloignées des barrages. Cependant, leur exploitation intensive soulève des préoccupations croissantes liées à la baisse des nappes phréatiques.
- **Les eaux non conventionnelles**, issues du **dessalement** via l'usine de Magtaa et transférées par le système **MAO (Mostaganem–Arzew–Oran)**, assurent **47 %** de l'approvisionnement, avec une production de **86 398 m³/j**. Cette ressource alternative couvre les besoins de **24 communes**, jouant ainsi un rôle crucial dans la réduction de la pression sur les ressources naturelles

V.4.1.3 Infrastructures hydrauliques existantes (A.D.E Mascara 2025)

À l'échelle de la wilaya, les infrastructures hydrauliques existantes traduisent les efforts déployés pour assurer une couverture territoriale efficace :

- **192 points d'eau** sont recensés, dont 165 sont actuellement en service.
- **326 réservoirs** répartis sur le territoire, avec une capacité totale de 223 285 m³, assurent le stockage et la régulation des volumes distribués.
- **Un réseau de distribution** de 4 292 km maille l'ensemble de la wilaya, avec une extension récente de 97 km visant à renforcer l'accès à l'eau, notamment dans les zones insuffisamment desservies.

V.4.1.4 Cas particulier du bassin versant de l'Oued Fekan (AGIRE. 2023)

Le bassin versant de l'Oued Fekan, confronté à une rareté des ressources en eau de surface, a historiquement reposé sur l'aquifère de Ghriss comme principale source d'approvisionnement en eau potable. Le développement du transfert depuis le barrage de Bouhanifia vers certaines communes de la plaine de Ghriss a permis de réduire la pression sur les ressources

souterraines. En 2017, le volume total transféré depuis Bouhanifia atteignait 7,4 millions de m³, représentant 79 % de l'eau destinée à l'usage domestique depuis ce barrage.

Actuellement, l'approvisionnement est majoritairement assuré par 51 puits opérationnels, dont 45 affichent un débit combiné moyen de 439 litres par seconde, soit environ 13,8 millions de m³/an. Deux sources naturelles – la source centrale de Sidi Kada (2 l/s) et la source de Mascara (1 l/s) – contribuent également à la desserte locale.

V.4.1.5 Pression sur la ressource et besoins en eau

Les besoins en eau dans le bassin versant se distinguent selon les usages :

- **Usage domestique** : La consommation journalière par habitant est estimée à 150 litres, en adéquation avec les normes nationales.
- **Usage agricole** : Le secteur agricole, particulièrement exigeant, consomme environ 5 000 m³/ha/an, ce qui constitue un facteur de pression majeur sur les ressources disponibles.

La stratégie d'approvisionnement en eau potable dans la wilaya de Mascara, et plus particulièrement dans le bassin de l'Oued Fekan, s'est notablement améliorée grâce à la diversification des ressources, incluant les eaux superficielles, souterraines et dessalées. Toutefois, la surexploitation des nappes et les effets du changement climatique demeurent des défis importants. Une gestion intégrée et durable des ressources en eau, fondée sur des mesures de préservation et d'adaptation, s'impose pour garantir la sécurité hydrique à long terme.

Tableau V.1: Approvisionnement en eau potable par les barrages et la station de dessalement de Magtaa dans la zone d'étude (AGIRE, 2023)

	Débit journalier par seconde (m ³ /s)	Communes	Volume journalier (m ³ /jour)
Barrage Bouhanifia	0.0894	Froha	922
		Ghriss	491
		Mascara	6308
Barrage Oued Taht	0.0146	Sehailia	1263
Station de dessalement de Magtaa	0.28	Mascara	19 794
		Tizi	792
		Froha	990
		El Keurt	891
		Ghriss	1 485
		Matemore	297

V.4.2 Agriculture dans la zone d'étude

Selon les données du Plan National de l'Eau (PNE, 2018), l'agriculture constitue l'activité économique prédominante dans la zone d'étude. La superficie totale irriguée s'élève à 18 242,5 hectares, répartie entre différentes cultures stratégiques pour l'économie locale (tableau V.2). La répartition des principales cultures est la suivante:

- **Arboriculture** : Elle occupe 5 186,5 hectares, soit 28 % de la superficie irriguée. Elle comprend principalement les oliviers, les vergers d'agrumes, les vignes, ainsi que d'autres arbres fruitiers tels que les pommiers et poiriers.
- **Maraîchage** : Représentant la part la plus importante, le maraîchage s'étend sur 9 064,5 hectares, soit 50 % de la surface irriguée. Il comprend des cultures telles que les pommes de terre, tomates, poivrons (de différentes variétés), concombres, melons, ainsi que des légumineuses comme les pois chiches, lentilles et fèves.
- **Grandes cultures** : Cette catégorie regroupe les céréales (blé, orge, avoine) et les fourrages, avec une superficie de 3 991,5 hectares, soit 22 % du total irrigué.

V.4.2.1 Méthodes d'irrigation (D.R.E Mascara 2025)

La zone d'étude se caractérise par une diversité de techniques d'irrigation, avec une prédominance de l'irrigation par aspersion. La répartition des systèmes est la suivante :

- **Aspersion** : Technique la plus répandue, elle est utilisée sur 11 708,5 hectares, représentant 64 % de la superficie irriguée.
- **Irrigation gravitaire** : Employée sur 3 695 hectares, elle couvre 20 % de la surface irriguée.
- **Goutte-à-goutte** : Cette méthode, plus économe en eau, est appliquée sur 2 839,5 hectares, soit 16 % de la superficie irriguée

Tableau.V.2 : Les pourcentages de chaque type d'irrigation dans le bassin versant de l'Oued Fekan.

Commune	Surface total (Ha)	Irrigation gravitaire %	Irrigation par aspersion %	Irrigation goutte à goutte %	%
Mascara	1135.5	28	59	13	100
Tizi	666	10	71	19	100
Froha	1176.5	19	55	26	100
El Keurt	107	81	19	0	100
Nesmoth	305	10	68	22	100
Tighennif	1554	44	56	0	100
Sidi Kada	1083	18	80	2	100
Sehailia	330.5	12	68	20	100
Ghriss	2661	5	68	27	100
Maoussa	1558	12	79	9	100
Matemore	1432	5	82	13	100
S. Boussaid	1028	34	56	10	100
Makhda	1730	17	72	11	100
Oued Taria	1249	24	66	10	100
Guerdjoum	186.5	71	29	0	100
Ain Fekan	924	26	26	48	100

V.4.3 Consommation d'eau industrielle dans le bassin versant de l'Oued Fekan

Dans l'ensemble du bassin versant, la demande en eau du secteur industriel reste relativement faible, avec une consommation annuelle inférieure à 0,5 million de mètres cubes (Mm³), selon les données de l'AGIRE (2023).

Les inventaires récents de l'Agence de Bassin Hydrographique de l'Oranie (ABHO) ont permis d'identifier 4 puits et 96 sources destinés à des usages industriels, tertiaires et touristiques. Par ailleurs, l'inventaire de 2018 des usagers payants, également réalisé par l'ABHO, recense 146 ouvrages (essentiellement des puits) mobilisés pour couvrir les besoins du secteur industriel.

Bien que les activités industrielles soient relativement diversifiées, elles présentent une faible intensité hydrique, ce qui reflète une économie locale majoritairement orientée vers l'agriculture. Cette faible demande s'explique par l'absence d'industries lourdes ou de procédés fortement consommateurs en eau.

L'approvisionnement du secteur repose principalement sur les eaux souterraines, exploitées par le biais de forages individuels.

Avec une consommation annuelle totale inférieure à 0,5 Mm³, le tissu industriel local apparaît peu contraignant pour les ressources en eau. Il est principalement constitué de 34 petites et moyennes unités industrielles, actives dans des filières à faible intensité hydrique (AGIRE, 2023).

V.4.4 Stations d'épuration

Le bassin versant de l'Oued Fekan comprend plusieurs communes engagées dans une gestion plus durable des eaux usées, conscientes de leurs impacts environnementaux. Ces efforts se traduisent par la mise en service de stations d'épuration (STEP) destinées au traitement des eaux usées domestiques, majoritairement gérées par l'Office National de l'Assainissement (ONA), organisme public chargé de la gestion, de l'exploitation, de l'entretien et de la réhabilitation des infrastructures d'assainissement en Algérie.

Parmi les principales installations, la commune de Mascara dispose d'une STEP fonctionnant selon le procédé des boues activées à faible charge, avec une capacité de traitement de 100 000 équivalents-habitants (Eq/H) et un débit nominal de 13 000 m³/jour. Cette installation traite annuellement 4,67 millions de mètres cube d'eaux usées, contribuant significativement à la préservation des ressources hydriques de la région.

Une partie de l'eau épurée est valorisée à des fins agricoles, conformément aux stratégies de réutilisation des eaux non conventionnelles. À Mascara, 376 hectares sont actuellement irrigués à partir de cette ressource, tandis que 400 hectares supplémentaires sont prévus pour de futurs aménagements. D'autres communes bénéficient également de cette eau recyclée, notamment Ghriss (0,31 Mm³/an), Oued Taria (0,29 Mm³/an) et Froha (0,08 Mm³/an), pour un volume global de 1,17 Mm³/an.

Cette réutilisation permet ainsi de réduire la pression exercée sur les ressources conventionnelles, tout en contribuant au développement d'une agriculture plus résiliente dans un contexte de stress hydrique (Kherbache, 2019).

Tableau V.3 : Stations de traitement des eaux usées dans le bassin versant de l'Oued Fekan

Commune	Procédé d'épuration	Année de mise en service	Dates de Transfer	Capacité total installées		Volume des eaux usées épurées	Superficie irriguée en hectar Site demande	Lieu de rejet
				Eq/habitant	(M3/j)	M3/j		
Mascara	Boues activée	1995	2005	100000	13000	12436	400	Oued El Kouair
Ghriss	Lagunage aéré	2005	2007	48000	5800	1392	352	Oued Froha
Oued Taria	Lagunage naturel	2005	2005	21000	2520	817	153	Oued Taria
Tizi	Lagunage naturel	2004	2005	12000	1440	357	88	Oued El Kouair
Khalouia	Lagunage naturel	2009	2009	6321	949	818	58	Oued Maoussa
Froha	Lagunage naturel	2009	2010	9400	1128	399	69	Oued Froha
Sidi kada	Lagunage naturel	2011	2012	11000	1320	847	80	Chaaba
Maoussa	Lagunage aéré	2013	2014	18500	2200	1279	135	Oued Maoussa
El keurt	Lagunage naturel	2015	2015	5666	679	303	41	Chaaba
Matmore	Lagunage naturel	2015	2016	12166	1460	481	89	Oued Maoussa

V.4.5 Hydrogéologie de la Plaine de Ghriss : Ressources souterraines disponibles

Le tableau V.5 ci-dessous présente une synthèse des principales caractéristiques hydrogéologiques de la plaine de Ghriss, en mettant en évidence sa superficie, les volumes d'eau souterraine renouvelables selon différentes conditions climatiques (année moyenne, humide et sèche), ainsi que les volumes exploitables calculés à partir d'un coefficient d'utilisation.

La plaine de Ghriss constitue un important réservoir d'eau souterraine avec une superficie estimée à 833,77 km². Les ressources renouvelables varient fortement en fonction des conditions climatiques :

- Année moyenne : 49,96 millions de m³/an
- Année humide : 107,74 millions de m³/an
- Année sèche : 6,65 millions de m³/an

Le coefficient d'exploitation (Kf), estimé à 0,50, permet de déterminer les volumes exploitables sans compromettre l'équilibre de la nappe. Ainsi, les ressources réellement utilisables sont :

- Année moyenne : 24,98 millions de m³/an
- Année humide : 53,87 millions de m³/an
- Année sèche : 3,32 millions de m³/an

Ce tableau met en lumière la valeur stratégique de la plaine de Ghriss dans la gestion régionale de l'eau souterraine, tout en soulignant la nécessité d'une exploitation durable, particulièrement en période de sécheresse.

Tableau V.4 : Description générale des caractéristiques hydrogéologiques de la plaine de Ghriss (AGIRE 2023)

Nom l'unité hydrogéologique	A(km ²)	Lesressources renouvelables (Mm ³ /an)			Kf Util	Les ressources renouvelables utilisables (Mm ³ /an)		
		Année Moyenne	Année Humide	Année Sèche		Année Moyenne	Année Humide	Année Sèche
Plaine de Ghriss	833.77	49.96	107.74	6.65	0.50	24.98	53.87	3.32

V.5. Description de WEAP

Le modèle WEAP (Water Evaluation and Planning System) a été adopté pour analyser les données hydrologiques et élaborer des scénarios de gestion ainsi que des stratégies d'allocation des ressources en eau dans le bassin versant de l'Oued Fekan. Ce cadre méthodologique permet de modéliser le bilan hydrique, d'évaluer les ressources disponibles et de concevoir des scénarios prospectifs adaptés aux contraintes environnementales, économiques et sociales. L'objectif principal de cette démarche est de développer des stratégies d'allocation efficaces et durables des ressources en eau dans la région étudiée. Pour ce faire, les objectifs spécifiques consistent à :

- Analyser l'état actuel des ressources en eau, la demande hydrique et les infrastructures existantes pour les secteurs agricole, industriel et domestique ;
- Évaluer le bilan hydrique actuel et futur du bassin à l'aide du modèle WEAP, en intégrant différents scénarios ;
- Identifier les facteurs clés influençant une gestion optimale de l'eau, en vue d'élaborer une stratégie d'allocation durable, équitable et réaliste ;

–Formuler des recommandations concrètes à l'intention des décideurs, gestionnaires et chercheurs, afin d'orienter les politiques vers une résilience hydrique accrue.

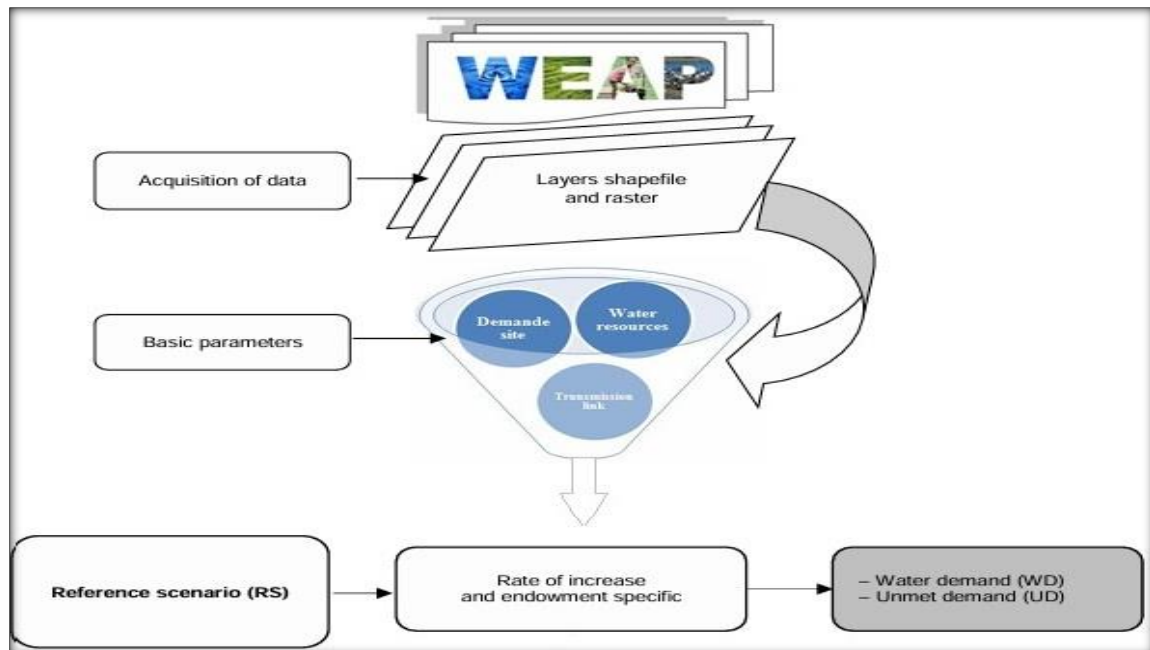


Figure V.2 : Cadre méthodologique d'évaluation et de planification des ressources en eau dans WEAP : Processus de modélisation et élaboration des scénarios prospectifs (Bouznadet al.,2019)

Le modèle WEAP permet la délimitation spatiale de la zone d'étude via une interface cartographique. Dans le cadre de cette étude, le bassin d'Oued Fekan a été sélectionné, avec l'intégration des limites du bassin, du réseau hydrographique, des sites de demande en eau (domestique, agricole, industrielle) et des points d'approvisionnement (eaux de surface et souterraines). La période d'analyse choisie s'étend de 2024 à 2054. Toutes les entités consommatrices d'eau ont été numérisées avec leurs données respectives afin d'assurer une modélisation complète et cohérente du système hydrique.

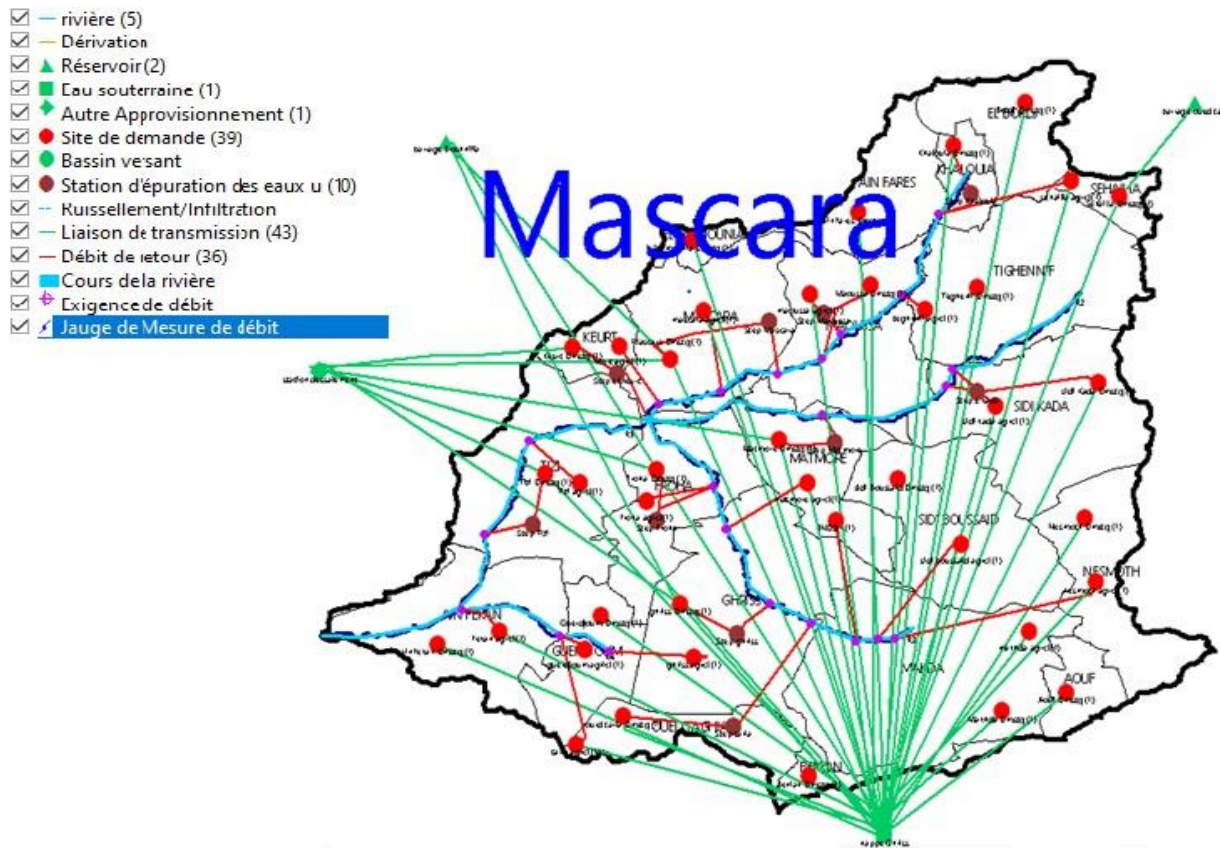


Figure V.3 : Représentation de la zone d'étude dans le modèle WEAP.

La Figure V.3 présente une représentation claire et cohérente des principales ressources en eau et des sites de demande dans le bassin versant de l'Oued Fekan. Les éléments clés de la figure sont :

- Deux réservoirs importants, à savoir le Barrage de Bouhanifia et le Barrage d'Oued Taht, qui jouent un rôle central dans le stockage et la régulation des eaux de surface.
- L'aquifère de Ghriss, ressource souterraine majeure, essentielle pour l'approvisionnement en eau, notamment dans les zones moins bien desservies par les réseaux de surface.
- L'usine de dessalement de Magtaa, qui constitue une source non conventionnelle stratégique, particulièrement précieuse dans un contexte de stress hydrique croissant.
- Les sites de demande, répartis en 22 points pour l'usage domestique et 10 sites de station d'épuration, 16 pour l'usage agricole, et un site industriel (INDS), reflétant la diversité des besoins en eau dans le bassin.

Les ressources en eau sont représentées par des carrés verts, tandis que les sites de demande sont symbolisés par des points rouges, identifiant clairement les secteurs d'utilisation. Les infrastructures collectives comme les réservoirs sont indiquées par des triangle verts, soulignant leur rôle dans la gestion territoriale de l'eau.

Les liaisons de transport (en vert), hiérarchisées par priorité (1 à 99, la priorité 1 étant attribuée à l'usage domestique), connectent les ressources aux différents sites utilisateurs, garantissant ainsi une distribution adaptée aux besoins prioritaires. Après usage, l'excédent d'eau est dirigé vers les stations d'épuration ou les rivières, illustré par des flèches rouges, ce qui traduit une gestion intégrée et responsable des rejets.

Dans l'ensemble, cette carte propose une vision cohérente et réaliste du système d'approvisionnement et de distribution d'eau dans le bassin versant, tenant compte des contraintes hydriques, des infrastructures disponibles et des usages variés. Elle permet ainsi de mieux comprendre les interactions entre ressources et besoins, facilitant la planification et la gestion durable de l'eau dans la région.

V.5.1. Etapes de modélisation par WEAP

La modélisation dans WEAP (Water Evaluation And Planning system) suit une démarche progressive et structurée visant à représenter fidèlement la situation hydrique actuelle, puis à simuler l'évolution du système sous différents scénarios. Le processus mis en œuvre dans cette étude comprend les étapes suivantes :

V.5.1.1 Définition du compte courant (année de base – 2023)

Le processus débute par la création d'un compte courant, qui représente la situation hydrique actuelle (année 2023) du bassin versant. Cette phase comprend :

- La délimitation du bassin et des ressources en eau (nappes, cours d'eau, barrages, etc.)
- L'identification et la caractérisation des points de demande (secteurs domestique, agricole et industriel)
- L'introduction des données d'entrée mensuelles (offre, demande, infrastructures, etc.)

Ce compte courant constitue la base de calibrage du modèle, permettant de vérifier sa cohérence avec les conditions réelles observées.

V.5.1.2 Élaboration du scénario de référence (tendance actuelle)

À partir du compte courant, un scénario de référence est formulé. Il simule l'évolution du système hydrique dans le futur (à court ou moyen terme) sans changement majeur dans les politiques ou les usages. Ce scénario sert de base de comparaison pour l'analyse des scénarios alternatifs.

V.5.1.3 Développement de scénarios alternatifs

Des scénarios hypothétiques sont ensuite construits pour simuler l'impact de différentes évolutions possibles :

- Croissance démographique et augmentation de la demande
- Extension des surfaces agricoles ou modifications des pratiques culturales
- Amélioration de l'efficacité des systèmes d'irrigation ou de distribution d'eau potable
- Changements climatiques ou nouvelles infrastructures hydrauliques

Ces scénarios permettent d'évaluer les effets potentiels sur l'équilibre entre l'offre et la demande en eau et d'orienter les décisions de gestion.

V.5.2. Analyse comparative et interprétation des résultats

Les résultats issus des différents scénarios sont comparés à ceux du scénario de référence pour:

- Identifier les zones de déficit ou de surplus
- Quantifier l'impact des changements envisagés
- Appuyer la prise de décision pour une gestion durable des ressources

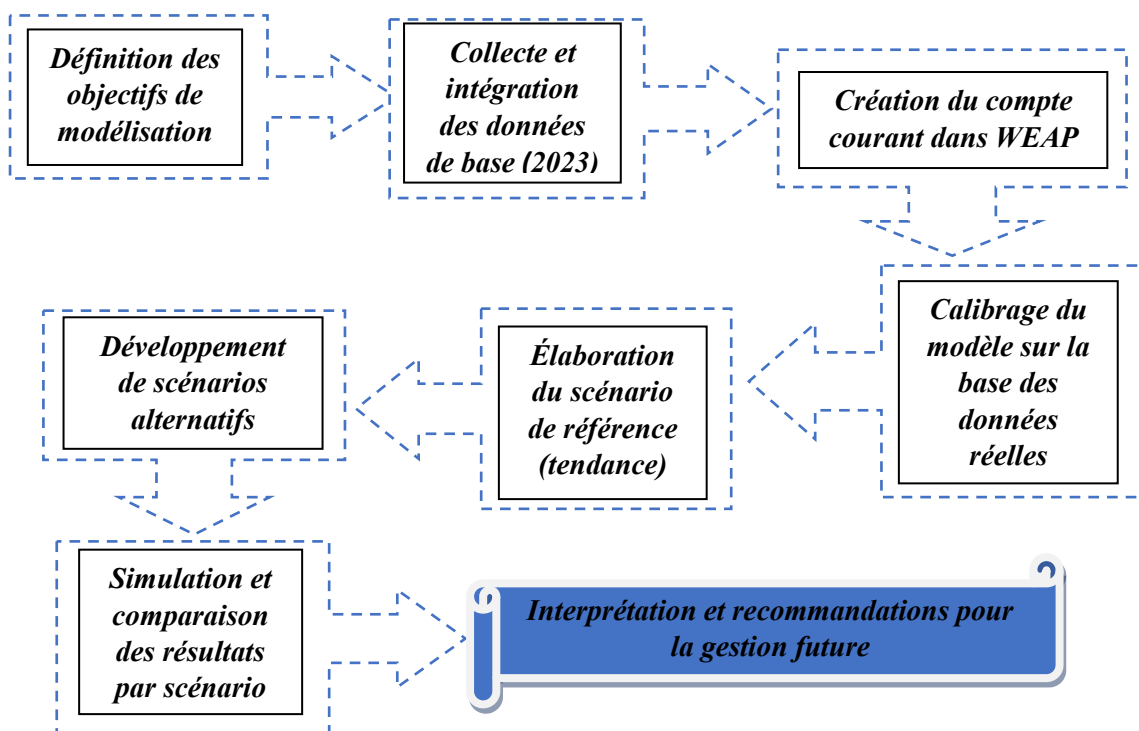


Figure V.4 : Organigramme de la modélisation dans WEAP

Remarque : Ces résultats ont été obtenus à partir de données collectées auprès de différents secteurs institutionnels et opérationnels.

V.6 Présentation des scénarios de gestion et de planification des ressources en eau dans la zone d'étude

V.6.1 Scénario de Référence

Dans la modélisation avec WEAP, le scénario de référence ou scénario de base constitue la pierre angulaire pour simuler l'évolution future de l'offre et de la demande en eau. Il s'appuie sur les conditions observées en 2023 et projette ces données jusqu'en 2054, en supposant que les infrastructures hydrauliques demeurent inchangées. Toutefois, il intègre l'évolution anticipée des variables démographiques et socio-économiques, conformément aux prévisions officielles.

Ce scénario offre un cadre de référence essentiel pour comparer les effets des scénarios alternatifs, en mesurant l'évolution « naturelle » de la demande en eau en l'absence de nouvelles politiques ou d'investissements. L'évaluation comparative conduite dans le cadre de ce scénario, sur la période 2024–2054, met en évidence des transformations notables dans trois secteurs clés : la croissance démographique, l'expansion agricole et le développement industriel.

V.6.1.1 Analyse sectorielle

Cette étude présente une vue d'ensemble des niveaux d'activité annuels pour 2023, couvrant l'agriculture (superficie irriguée), la population (en nombre d'habitants) et les activités industrielles (production). Les données fournissent une analyse des performances de ces secteurs par district, permettant une évaluation des tendances et contributions spécifiques.

Le tableau V.5 présente les superficies irriguées, les volumes d'eaux souterraines mobilisées pour l'agriculture, ainsi que les unités de production industrielle et les volumes d'eau consommés par unité pour l'année 2023. Il permet de comparer les besoins en eau des différents secteurs dans les zones étudiées.

Tableau V .5 : Niveaux d'activité annuels pour 2023 pour secteur agricole et industrie

Site demande domestique	Site demande Agricole (superficie irriguée en hectare)	Eaux Souterrain (m3/jour)	Consommation Agricole (m3/ha/année)	VOLUME m3/année	Unités de production	Eaux industrielle consommée (m3/unit/année)
Schaillia	330.5	855000	288	-	34	5000
Teghennif	1554			40000		
Sidi Kada	1083			5800		
Mascara	1135.5	130000	114.48	35000		
Maoussa	1558	638000	76	4500		
Ghriss	2661			4800		
Makhda	1730					
Matmore	1432			7000		
Sidi Boussaid	1028			-		
Nesmoth	305	43600	142.95	-		
El Keurt	107	944000	484	-		
Tizi	666			39200		
Froha	1176.5			23900		
Ain fekan	924	296000	320	3200		
Guerdjoum	186.5	1763000	1228	3600		
Oued Taria	1249			-		

Le tableau V.6 dresse un état des lieux de la demande en eau domestique pour les différentes localités de la wilaya, avec répartition selon les différentes sources d'approvisionnement (barrages et eaux souterraines) et calcul de la consommation moyenne par habitant.

Tableau V .6 : Taux annuel de consommation d'eau pour 2023 pour secteur domestique

Site demande domestique	Nombre de population en (personnes)	Barrage Oued Taht (m3/jour)	Barrage Bouhanifia (m3/jour)	Magtaa (m3/jour)	Eaux souterrains (m3/jour)	Total (m3/jour)	Consommation d'eau (m³/hab./an)
El-Bordj	27 426	-	-	-	4034	4034	53.68
Khalouia	8156	-	-	-	782	782	34.99
Sehaillia	13861	1263	-	-	1288	2551	67.17
Ain Fares	1341	-	-	-	270	270	73.48
Teghennif	84379	-	-	-	8314	8314	35.96
Mamounia	17841	-	-	-	426	426	8.71
Mascara	147 286	-	6308	19 794	3035	29137	72.20
Maoussa	28102	-	-	-	3104	3104	40.31
Sidi Kada	27960	-	-	-	2563	2563	33.45
El Keurt	5813	-	-	891	-	891	55.94
Matmore	20575	-	-	297	2164	2461	43.65
Sidi Boussaid	6082	-	-	-	680	680	40.80
Nesmoth	7499	-	-	-	741	741	36.06
Tizi	17532	-	-	792	2463	3255	67.76
Froha	18676	-	922	990	1256	3168	61.94
Ghriss	39096	-	491	1 485	3513	5489	51.24
Makhda	7099	-	-	-	2715	2715	39.53
Aouf	10 444	-	-	-	1303	1303	45.53
Ain fekan	16087	-	-	-	2407	2407	54.61
Guerdjoum	3458	-	-	-	1366	1366	44.18
Oued Taria	21566	-	-	-	3707	3707	62.74

L'analyse des données relatives à la consommation d'eau en 2023 dans la région met en évidence une forte pression exercée par le secteur agricole, notamment dans les zones à grande superficie irriguée comme Ghriss, Maoussa, Teghennif ou encore Makhda. Ces localités mobilisent d'importants volumes d'eaux souterraines pour satisfaire leurs besoins, ce qui soulève des préoccupations quant à la durabilité de l'exploitation des nappes phréatiques. Les consommations par hectare varient fortement d'un site à un autre, traduisant des disparités dans les pratiques culturales, les technologies d'irrigation ou l'efficacité de la gestion de l'eau. Le secteur industriel, quant à lui, semble modérément développé, avec une concentration d'unités à Sehaillia et un impact plus limité sur la ressource en eau par rapport à l'agriculture.

Concernant le secteur domestique, les villes les plus peuplées telles que Mascara, Teghennif et Ghriss affichent les plus fortes consommations journalières. La majorité des localités dépendent exclusivement des eaux souterraines pour leur alimentation en eau potable, ce qui accroît leur vulnérabilité en cas de baisse du niveau des nappes ou de sécheresse prolongée. Dans certaines communes, la consommation par habitant reste très faible, ce qui peut indiquer des limitations d'accès ou des problèmes d'approvisionnement. À l'inverse, d'autres comme Mascara ou Ain Fares présentent des taux de consommation élevés, traduisant probablement un meilleur niveau de service.

a. Secteur domestique

La consommation domestique est fortement liée à la taille de la population et à l'accès aux sources hydriques. Les villes les plus peuplées, comme Mascara (147 286 habitants), affichent une consommation élevée avec 29 137 m³/jour, soit 72,2 m³/hab/an. D'autres villes comme Tizi (67,76 m³/hab/an), Sehaillia (67,17 m³/hab/an) ou Oued Taria (62,74 m³/hab/an) présentent également des consommations importantes, traduisant une bonne accessibilité à l'eau. À l'inverse, des communes comme Mamounia (8,71 m³/hab/an) ou Khalouia (34,99 m³/hab/an) révèlent une sous-consommation, suggérant des difficultés d'approvisionnement ou des ressources limitées. L'eau souterraine reste la principale source pour la majorité des localités.

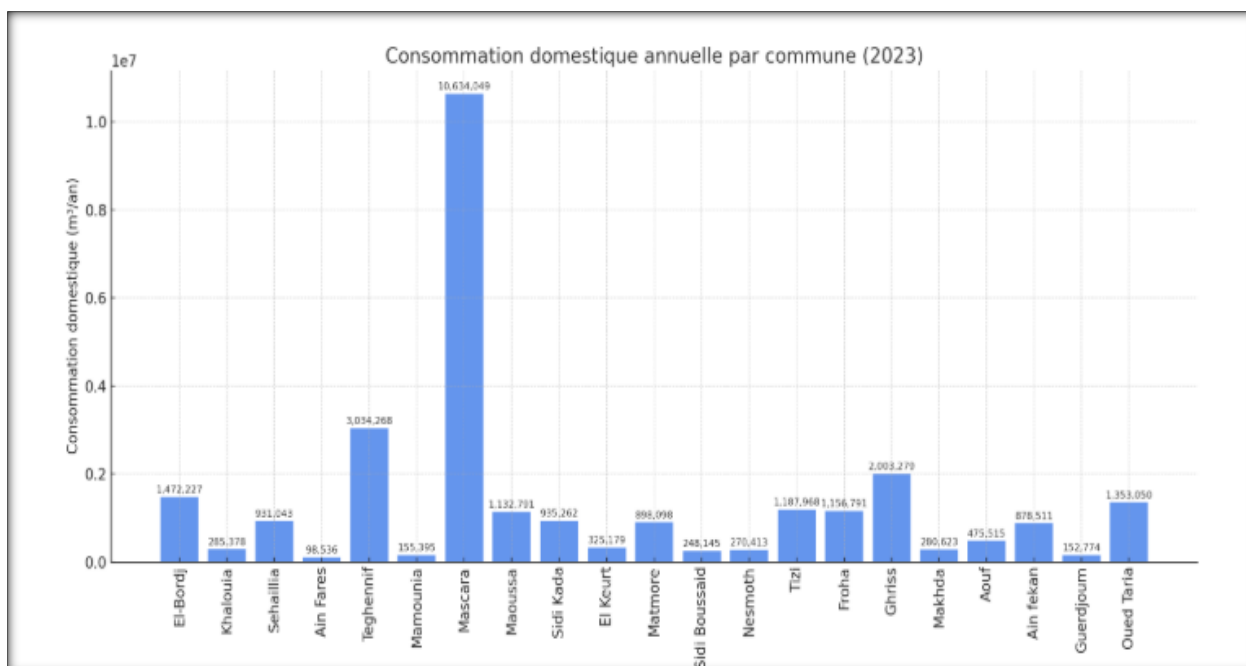


Figure V.5consommation annuelle d'eau domestique (m³/hab) dans la zone d'étude en 2023

Les communes les plus consommatrices sont Mascara, Teghennif, Ghriss, en raison de leur forte population. D'autres communes comme Ain Fares, montrent une consommation plus élevée par habitant, mais avec une population moindre, leur consommation totale reste modérée. La commune Mamounia a une consommation globale faible malgré une population moyenne, en raison d'un taux de consommation très bas (8,71 m³/hab/an).

b. Secteur agricole

L'agriculture est de loin le plus gros consommateur d'eau, avec des volumes journaliers très élevés. Par exemple, à Mascara, l'irrigation des 1135,5 ha nécessite 130 000 m³/jour, soit environ 41,3 fois plus que la demande domestique locale. De même, Sehaillia, teghennif et sidi kada consomment 855 000 m³/an pour 2967,5 ha. D'autres zones comme El Keurt, tizi, froha et Guerdjoum, oued taria enregistrent également des consommations par hectare très élevées (484 m³/ha/an et 1 228 m³/ha/an respectivement). Ces chiffres traduisent une pression intense sur la ressource hydrique pour l'irrigation, souvent alimentée par les eaux souterraines, et soulèvent des préoccupations sur la durabilité dans un contexte semi-aride.

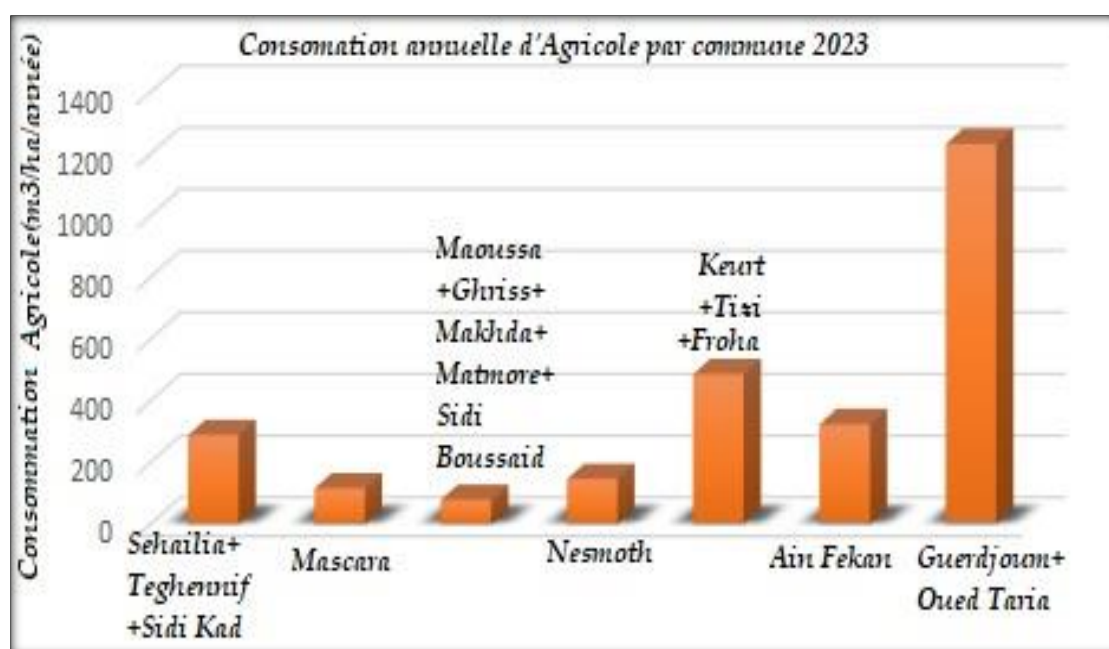


Figure V.6consommation annuelle d'eau Agricole (m³/hab/année) dans la zone d'étude en 2023

c. Secteur industriel

Bien que moins développé, le secteur industriel présente des besoins ponctuellement significatifs. À 34 unités de production consomment en moyenne 5 000 m³/unité/an, soit 170 000 m³/an. Ce volume reste faible comparé au secteur agricole, mais concentré sur des zones spécifiques, il peut exercer une pression locale sur les ressources.

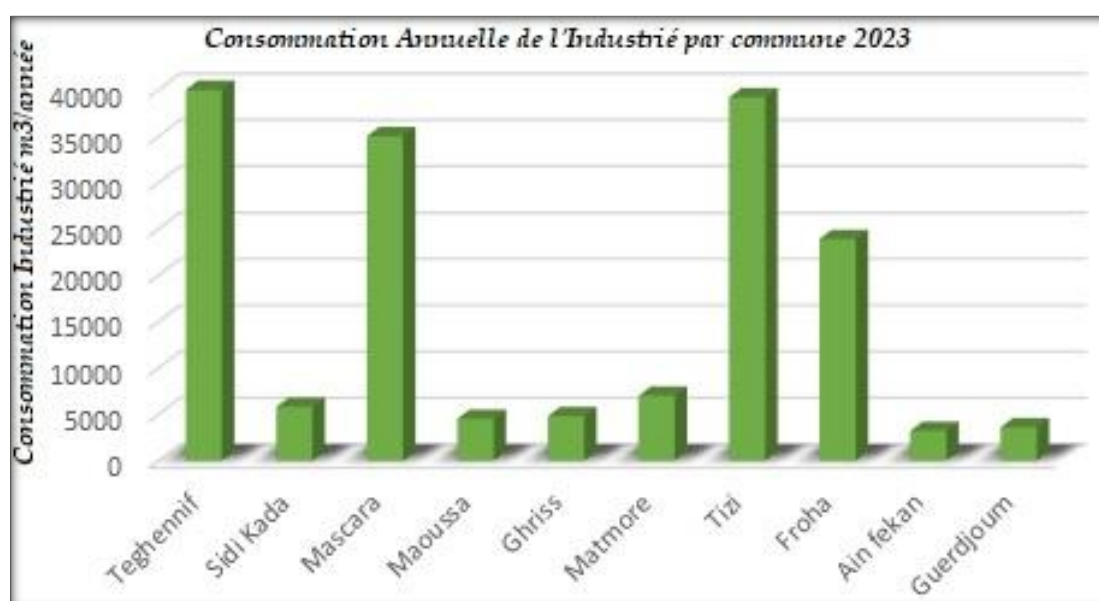


Figure V.7consommation annuelle d'eau industrielle (m³/année) dans la zone d'étude en 2023

L'analyse montre que l'agriculture représente de loin le premier poste de consommation d'eau, suivie par l'usage domestique, puis l'industrie. Ce déséquilibre s'explique par les grandes superficies irriguées, souvent peu efficaces en eau. Il apparaît indispensable de promouvoir des techniques d'irrigation modernes (goutte-à-goutte, aspersion contrôlée) pour réduire les pertes, tout en renforçant l'accès à l'eau potable dans les communes sous-alimentées. La durabilité de la ressource hydrique dans cette région semi-aride passe par une gestion intégrée et équitable entre les trois secteurs.

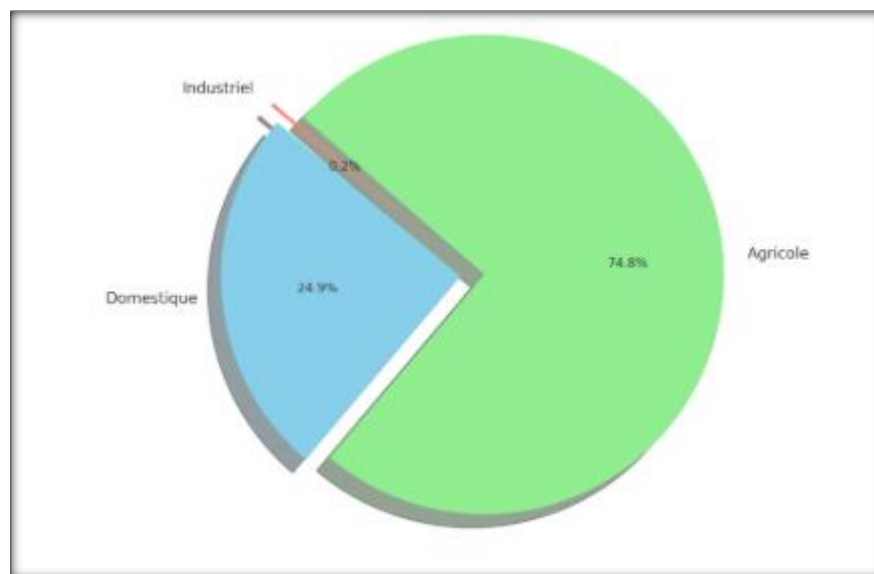


Figure V.8 la répartition relative de la consommation d'eau par secteur en 2023 dans la zone d'étude

V.7.2 Développement de scénarios alternatifs

V.7.2.1 Scénario de faible croissance démographique (1,5 %) au cas minimum entre 2023 et 2054

Entre 2023 et 2054, la population totale de la wilaya de Mascara passera de 551 729 à environ 660 000 habitants, soit une augmentation de plus de 57 %. Cette forte croissance démographique aura des répercussions importantes sur l'urbanisation, les ressources naturelles, les besoins en services publics et la planification territoriale. La commune de Mascara, chef-lieu de la wilaya, connaîtra l'augmentation la plus significative, avec une population projetée de 233 673 habitants en 2054 contre 147 286 en 2023, ce qui accentuera la pression sur les infrastructures urbaines, le logement, l'eau potable et les services de transport. D'autres villes comme Teghenif, Ghriss, Maoussa et Bordj afficheront également une

croissance soutenue, confirmant leur statut de pôles urbains secondaires en plein essor. Ghriss, par exemple, passera de 39 096 à plus de 62 000 habitants, devenant un centre régional d'importance croissante. Les communes de taille moyenne, telles que Froha, Tizi, Matmore et Ain Fekan, verront leur population augmenter progressivement, les plaçant comme des relais urbains intermédiaires entre les grands centres et les zones rurales. Parallèlement, certaines communes à faible densité, comme Keurt, Guerdjoum ou Sidi Boussaid, connaîtront une croissance plus modérée mais stable, ce qui implique un besoin progressif en infrastructures de base et en services sociaux. Ce scénario de croissance généralisée dans l'ensemble des communes sans déclin démographique reflète une dynamique démographique positive, probablement liée à une fécondité élevée et à une migration interne modérée. Il souligne l'urgence d'une planification territoriale intégrée pour prévenir l'étalement urbain non contrôlé, gérer durablement les ressources naturelles et adapter les politiques d'aménagement (PDAU, SDAU) à l'évolution future de la population dans chaque commune de la wilaya.

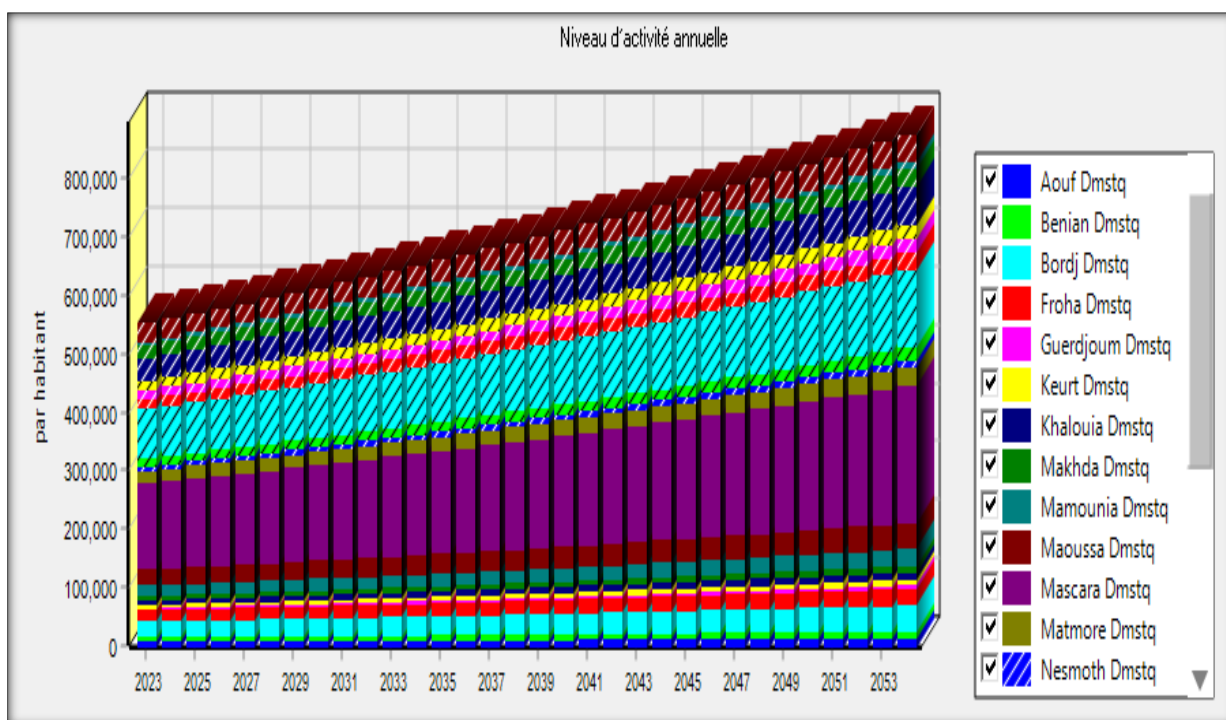


Figure V.9 : Niveau d'activité annuel des sites de demande domestique avec un taux de croissance de 1,5 % dans le scénario de référence (2023–2054)

L'évolution projetée du taux de consommation annuelle d'eau ($\text{m}^3/\text{personne}$) dans les communes de la wilaya de Mascara entre 2023 et 2053 met en évidence une tendance globale à la hausse, corrélée à la croissance démographique et à l'urbanisation progressive du territoire. Les communes les plus peuplées comme Mascara, Mamounia ou Froha présentent

des niveaux de consommation plus élevés, traduisant une demande croissante liée à la concentration urbaine, à l'amélioration du niveau de vie et à l'accès accru aux services. À l'inverse, les communes rurales telles que Keurt, Guerdjoum ou Benian affichent des taux de consommation plus faibles, bien qu'en progression, suggérant une évolution plus lente des besoins en eau mais une transformation progressive de leurs modes de vie. Cette disparité entre les zones urbaines et rurales soulève des enjeux cruciaux en matière de gestion intégrée et équitable de la ressource en eau, d'autant plus dans un contexte de stress hydrique croissant. Elle appelle à des politiques différenciées, tenant compte des spécificités locales, pour assurer un accès durable à l'eau tout en anticipant les pressions futures sur les infrastructures hydrauliques.

Tableau V.7 Évolution projetée du taux de consommation annuelle d'eau (m³/personne) dans les communes de la wilaya de Mascara (2023–2053) avec un pas de 10 ans avec taux d'accroissement 1.5%

Commune	2023	2033	2043	2053
Aouf	569929.0	661425.9	767611.7	890844.7
Benian	406546.0	471813.2	547,558.5	635464.0
Bordj	1508260.0	1750397.3	2031407.5	2357531.4
Froha	1019149.0	1182764.0	1372645.9	1593011.6
Guerdjoum	188703.0	218997.5	254155.6	294957.9
Keurt	317215.0	368141.0	427242.6	495832.5
Khalouia	445073.0	516525.4	599448.8	695684.8
Makhda	387392.0	449584.2	521760.9	605524.8
Mamounia	973583.0	1129882.8	1311275.1	1521788.3
Maoussa	1,533,526.0	1779719.5	2065437.2	2397024.2
Mascara	8037397.0	9327727.3	10825208.4	12563096.3
Matmore	1122777.0	1303028.5	1512217.8	1754990.5
Nesmoth	409220.0	474916.5	551160.0	639643.7
Sehailia	756395.0	877827.3	1018754.4	1183428.9

L'évolution projetée du taux de consommation annuelle d'eau dans les communes de la wilaya de Mascara entre 2023 et 2053, calculée avec un taux d'accroissement annuel moyen de 1,5 %, révèle une augmentation continue et significative de la demande en eau. Cette croissance est directement liée à l'évolution démographique ainsi qu'à l'amélioration probable des conditions de vie et de l'accès à l'eau potable.

Les communes les plus peuplées comme Mascara, Maoussa, Froha et Bordj présentent les volumes de consommation projetés les plus élevés à l'horizon 2053, dépassant dans certains cas plusieurs millions de mètres cubes par an. À titre d'exemple, la commune de Mascara verrait sa consommation passer de plus de 8 millions de m³ en 2023 à plus de 12,5 millions de m³ en 2053. Cette hausse souligne la nécessité de renforcer les capacités d'approvisionnement et d'optimiser la gestion des ressources disponibles.

D'autres communes telles que Keurt, Guerdjoum ou Nesmoth, bien que présentant des volumes plus modestes, enregistrent également une croissance régulière de la demande, ce qui pourrait, à long terme, exercer une pression sur les petites infrastructures locales de distribution et les ressources souterraines.

Cette tendance globale à la hausse met en évidence l'urgence de mettre en place des stratégies durables, incluant notamment le renforcement des réseaux d'adduction d'eau, la diversification des sources (eaux de surface, souterraines, recyclage), la sensibilisation à l'économie d'eau, ainsi qu'une planification à long terme pour anticiper les besoins futurs tout en préservant les ressources pour les générations à venir.

V.7.2.2 Scénario de forte croissance démographique (+2,5 %/an) – Cas maximal projeté entre 2023 et 2054

Conformément aux projections démographiques disponibles, la région est susceptible de connaître une croissance significative de sa population au cours des prochaines décennies. En tenant compte de cette dynamique, un scénario de forte croissance démographique, basé sur un taux annuel d'accroissement de 2,5 %, a été formulé. Ce scénario, qualifié de cas maximal, couvre la période de projection allant de 2023 à 2054.

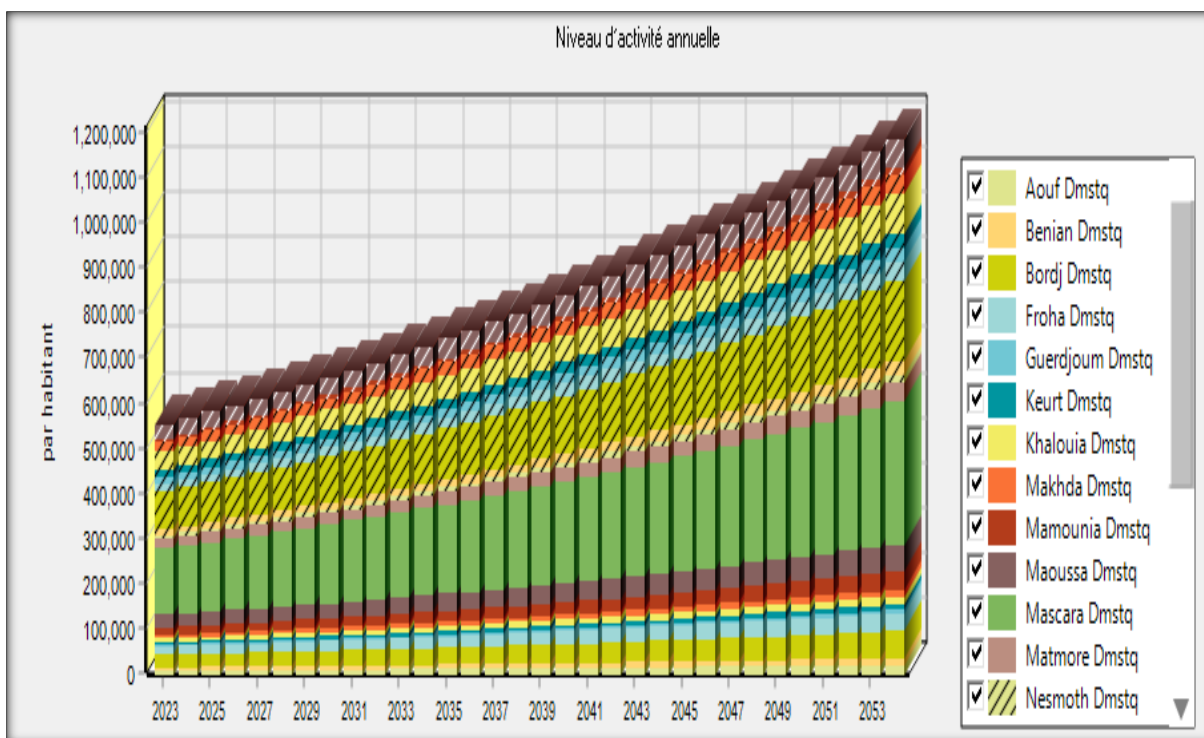


Figure V.10 : Niveau d'activité annuel des sites de demande domestique avec un taux de croissance de 2,5 % dans le scénario de référence (2023–2054)

L'analyse du taux de consommation sur la période 2023–2053 montre une augmentation continue et soutenue dans toutes les localités, avec une multiplication par 2,1 en moyenne, soit une croissance de plus de 110 % en 30 ans. Cette évolution, équivalente à un taux annuel moyen d'environ 2,5 %, traduit une pression croissante sur les ressources hydriques, en lien avec l'expansion démographique, l'urbanisation et l'augmentation des besoins domestiques et agricoles. Sans stratégies de gestion durable, cette dynamique pourrait accentuer le stress hydrique. Il est donc essentiel de renforcer les infrastructures, d'optimiser la distribution, de limiter les pertes et de sensibiliser les usagers à une consommation responsable afin de garantir la sécurité hydrique à long terme.

Tableau V.8 Évolution projetée du taux de consommation annuelle d'eau (m³/personne) dans les communes de la wilaya de Mascara (2023–2053) avec un pas de 10 ans avec taux d'accroissement 2.5%

	2023	2033	2043	2053
Aouf	569 929	729 557.3	933 895	1 195 464
Benian	406 546	520 413.3	666 173	852 757
Bordj	1 508 260	1 930 700.3	2 471 459	3 163 677
Froha	1 019 149	1 304 596.9	1 669 994	2 137 733
Guerdjoum	188 703	241 555.8	309 211	395 817
Keurt	317 215	406 062	519 793	665 379
Khalouia	445 073	569 731	729 303	933 570
Makhda	387 392	495 894	634 786	812 580
Mamounia	973 583	1 246 268	1 595 329	2 042 156
Maoussa	1 533 526	1 963 042	2 512 860	3 216 674
Mascara	8 037 397	10 288 547	13 170 210	16 858 983
Matmore	1 122 777	1 437 249	1 839 800	2 355 100
Nesmoth	409 220	523 836	670 554	858 366
Schailia	756 395	968 249	1 237 989	1 584 541

L'analyse de l'évolution projetée de la consommation annuelle d'eau par personne dans les communes de la wilaya de Mascara, calculée avec un taux de croissance de 2,5 % sur trente ans (2023–2053), met en évidence une progression rapide et substantielle de la demande en eau potable. Cette augmentation soutenue résulte d'une dynamique démographique accélérée et d'une amélioration attendue des conditions de vie dans la région.

Les communes les plus densément peuplées, telles que Mascara, Maoussa, Bordj, Froha ou Matmore, présentent les niveaux de consommation les plus élevés. À titre d'exemple, la ville de Mascara verrait sa demande passer de plus de 8 millions de m³ en 2023 à environ 16,8 millions de m³ en 2053, soit plus du double en trois décennies. Cette croissance exponentielle souligne l'urgence de moderniser les systèmes d'approvisionnement et de renforcer les capacités de stockage et de distribution.

D'autres communes comme Benian, Guerdjoum, Keurt ou Nesmoth affichent également une augmentation notable, bien que leurs volumes absolus soient plus modestes. Ces hausses risquent toutefois de mettre à rude épreuve les ressources locales, notamment les eaux souterraines, et les infrastructures existantes, souvent sous-dimensionnées pour répondre à une telle croissance.

V.7.2.3 Croissance démographique projetée (2023–2054) dans le bassin de l'Oued Fekan

L'analyse des projections démographiques entre 2023 et 2054 révèle une tendance générale à la hausse dans l'ensemble des communes du bassin de l'Oued Fekan – Macta. La population totale du bassin passerait ainsi de 551 729 habitants en 2023 à environ 914 544 habitants en 2054, soit une augmentation d'environ 65,7 % sur une période de 31 ans. Cette croissance est particulièrement marquée dans plusieurs agglomérations urbaines, témoignant d'une dynamique d'urbanisation soutenue.

Parmi les principales évolutions observées :

- **Mascara**, chef-lieu de wilaya, connaît une progression remarquable, passant de 147 286 habitants en 2023 à 316 666 en 2054, soit une croissance de 115 %. Cette évolution confirme son rôle central en tant que pôle urbain régional.
- **Teghenif** et **Maoussa**, également fortement urbanisées, enregistrent respectivement des croissances de 97,5 % (de 84 379 à 166 415 habitants) et de 114,9 % (de 28 102 à 60 419 habitants). Ces hausses traduisent une pression démographique importante, susceptible d'affecter la disponibilité des ressources en eau et les dynamiques d'occupation du sol.
- D'autres communes telles que **Bordj**, **Froha**, **Sidi Kada** et **Ghriss** présentent également des croissances soutenues, avec des taux compris entre 90 % et 115 %, indiquant une transformation progressive de leurs structures territoriales.
- À l'inverse, certaines localités rurales comme **Guerdjoum** et **Keurtet Sidi Boussaid** affichent une croissance plus modérée, avec des hausses situées entre 90 % et 110 %, révélant une dynamique démographique plus contenue.

V.7.2.4 Évolution annuelle de l'activité des sites de demande agricole selon un taux de croissance de +3 % dans le scénario projeté (2023–2054)

L'évolution annuelle de l'activité des sites de demande agricole entre 2023 et 2054, avec un taux de croissance de +3 %, montre une tendance générale de croissance continue sur toute la période. Cette croissance est caractéristique de l'augmentation progressive des demandes agricoles sur chaque site étudié. Voici l'interprétation détaillée des données :

Les sites agricoles avec des niveaux de demande plus élevés, comme Ghriss (3 177 ha en 2029 à 6 459 ha en 2054), connaissent des augmentations importantes au fil des années. En revanche, des sites comme Keurt ou Guerdjoum (avec des valeurs relativement faibles) ont une augmentation plus modérée. Cela montre que certains sites sont plus propices à une augmentation de la demande agricole en raison de leur potentiel productif, tandis que d'autres connaissent une croissance moins marquée.

En raison de la croissance annuelle stable de 3 %, cette dynamique devrait continuer à long terme, mettant en évidence la nécessité d'adopter des stratégies de gestion durable pour soutenir cette expansion tout en minimisant les impacts environnementaux.

En somme, les données montrent que l'expansion de la demande agricole est une tendance croissante dans la région, ce qui peut entraîner des pressions sur les ressources naturelles et nécessite des stratégies de gestion adaptées pour faire face aux défis de durabilité à long terme.

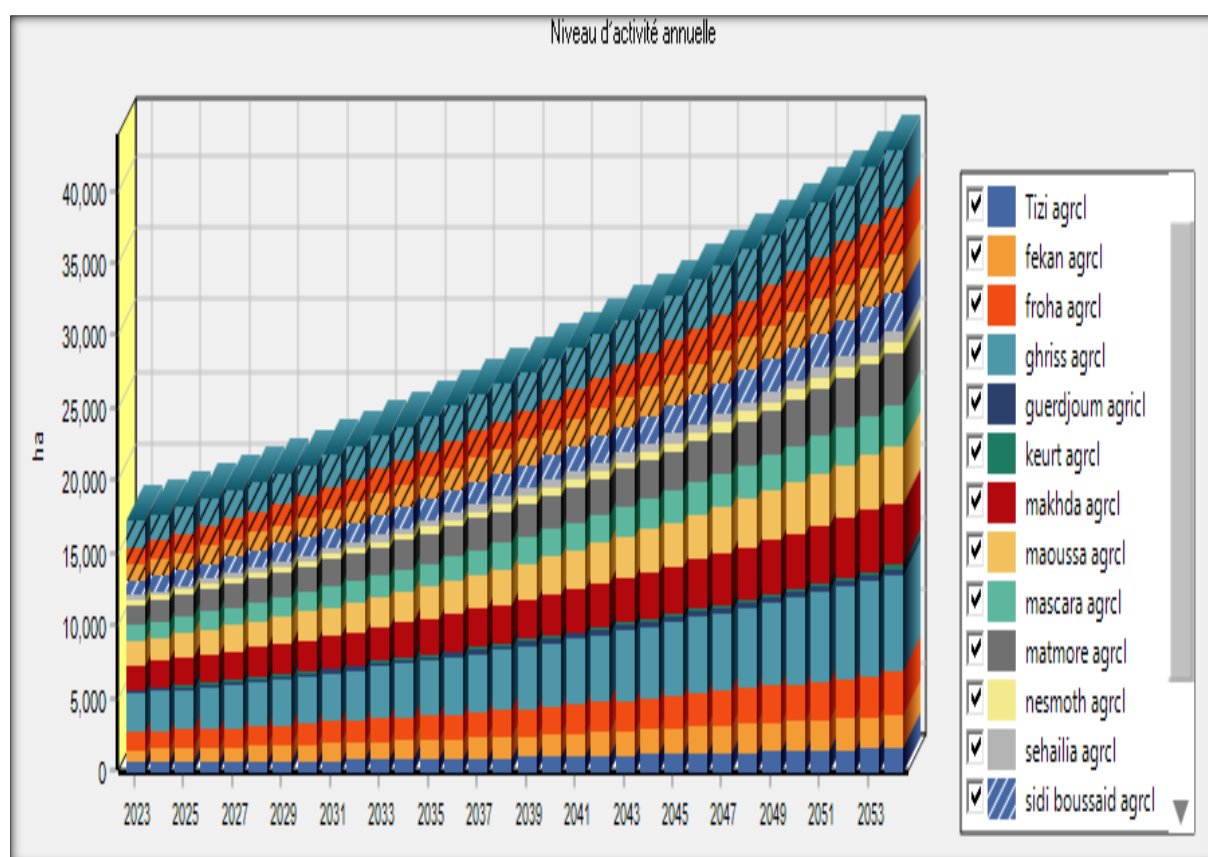


Figure V.11 : Évolution annuelle de l'activité des sites de demande agricole selon un taux de croissance de +3 % dans le scénario projeté (2023–2054)

V.7.2.5 Scénario d'augmentation de la demande industrielle avec un taux de croissance de +1 % par an entre 2023 et 2054

Le secteur industriel dans la zone d'étude connaît une croissance modeste entre 2023 et 2054. En 2023, il y a environ 34 unités de production, et ce nombre devrait atteindre 46 unités d'ici 2054, représentant une augmentation de 34 %. Cette croissance progressive indique un développement industriel mesuré, avec une augmentation de 1 à 2 unités par an, bien que la région reste majoritairement axée sur l'agriculture. De plus, la consommation maximale d'eau

pour les usages industriels est limitée à 500 000 mètres cubes par unité de production par an, ce qui permet de maîtriser l'impact sur les ressources en eau.

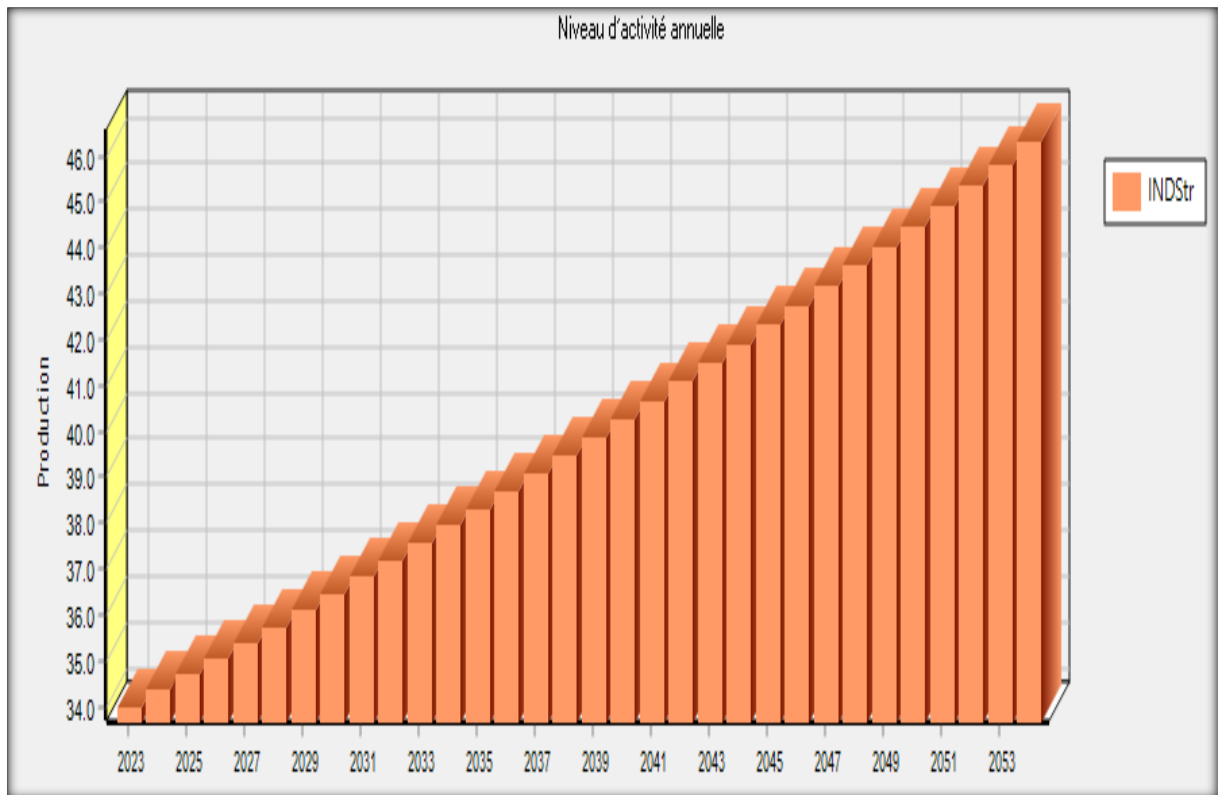


Figure V.12 : Évolution des unités de production dans le scénario de référence de 2023 à 2054

V.8 Analyse de la demande globale

L'évolution de la demande en eau dépend de la croissance de la population, de l'activité industrielle et des besoins agricoles. Elle est influencée par les dynamiques de développement et la disponibilité des ressources. Les diagrammes suivants présentent l'évolution de la demande dans les secteurs domestique, industriel et agricole, tandis que la figure 37 montre la tendance globale pour l'ensemble de la zone d'étude.

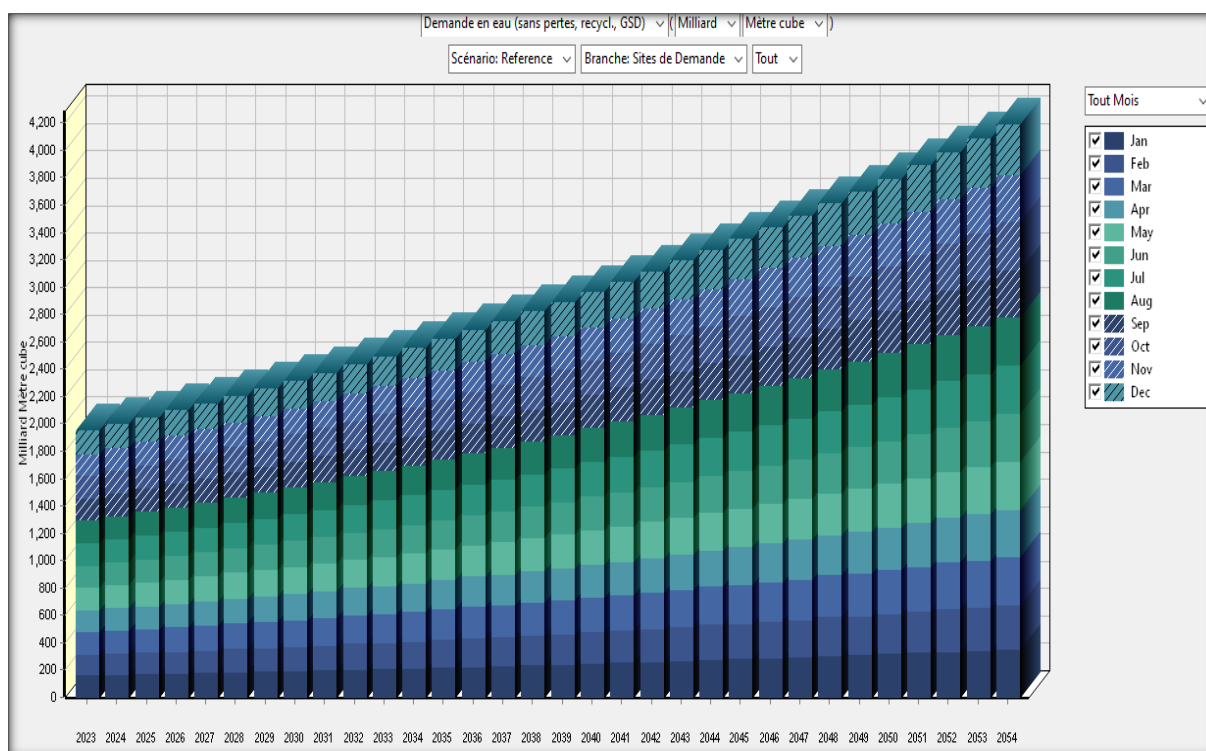


Figure V.13 : Évolution annuelle de la demande totale en eau selon le scénario de référence (2023–2054)

L'analyse de l'évolution annuelle de la demande en eau selon le scénario de référence sur la période 2023–2054 révèle une tendance haussière marquée, avec un passage de 1 945 milliers de m³ en 2023 à 4 182 milliers de m³ en 2054, soit plus du double en 32 ans. Cette croissance régulière, avec une augmentation annuelle moyenne estimée entre 70 et 100 milliers de m³, reflète l'effet combiné de la croissance démographique, de l'urbanisation progressive, ainsi que de l'intensification des activités agricoles et industrielles. La demande mensuelle reste relativement constante tout au long de l'année, traduisant une consommation continue, sans forte saisonnalité, probablement liée à des besoins domestiques et agricoles stabilisés. Avec un total cumulé de près de 93 651 milliers de m³ pour l'ensemble de la période, ces résultats soulignent l'urgence de mettre en place des stratégies de gestion durable de la ressource en eau, reposant notamment sur l'optimisation des usages, la modernisation des systèmes d'irrigation et la promotion de la réutilisation des eaux usées traitées.

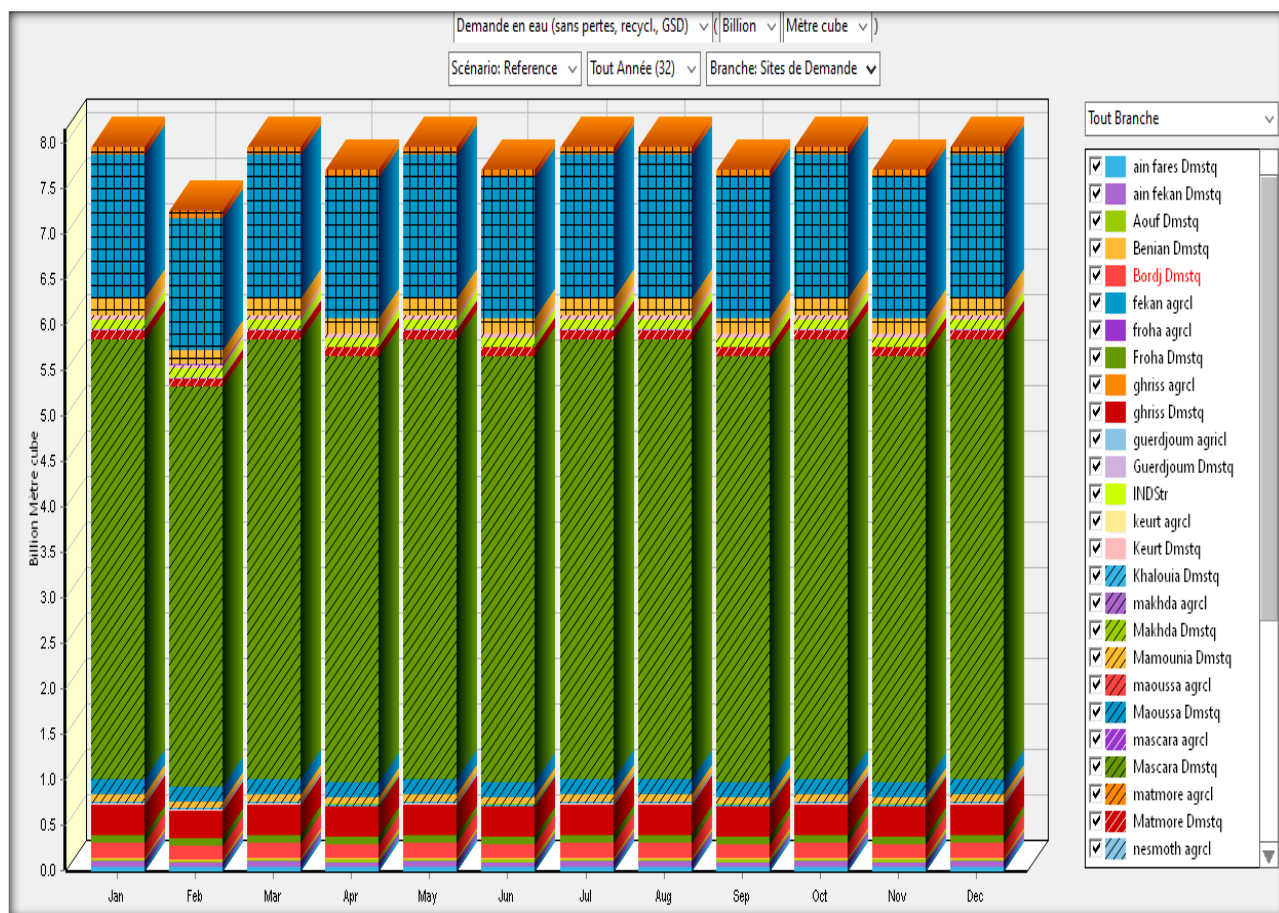


Figure V.14 : Demande mensuelle moyenne en eau en 2054 selon le scénario de référence.

En 2054, la demande mensuelle moyenne en eau dans la région étudiée reste relativement stable tout au long de l'année, avec des pics identiques de 7,95 millions de m³ observés en janvier, mars, mai, juillet, août, octobre et décembre. Les mois les moins demandeurs sont février, avril, juin, septembre et novembre avec 7,24 à 7,69 millions de m³. La demande annuelle totale atteint environ 93,65 millions de m³.

La commune de Mascara est de loin la plus grande consommatrice avec une demande annuelle de 57 millions de m³, représentant plus de 60 % de la demande totale. Elle est suivie de Tighennif (18,71 M m³), Ghriss (4,02 M m³) et Maoussa (2,08 M m³).

La consommation est presque exclusivement domestique. La demande agricole est négligeable ou nulle pour la majorité des localités, ce qui reflète soit une faible irrigation prévue en 2054, soit une priorité donnée à l'approvisionnement domestique dans le scénario de référence.

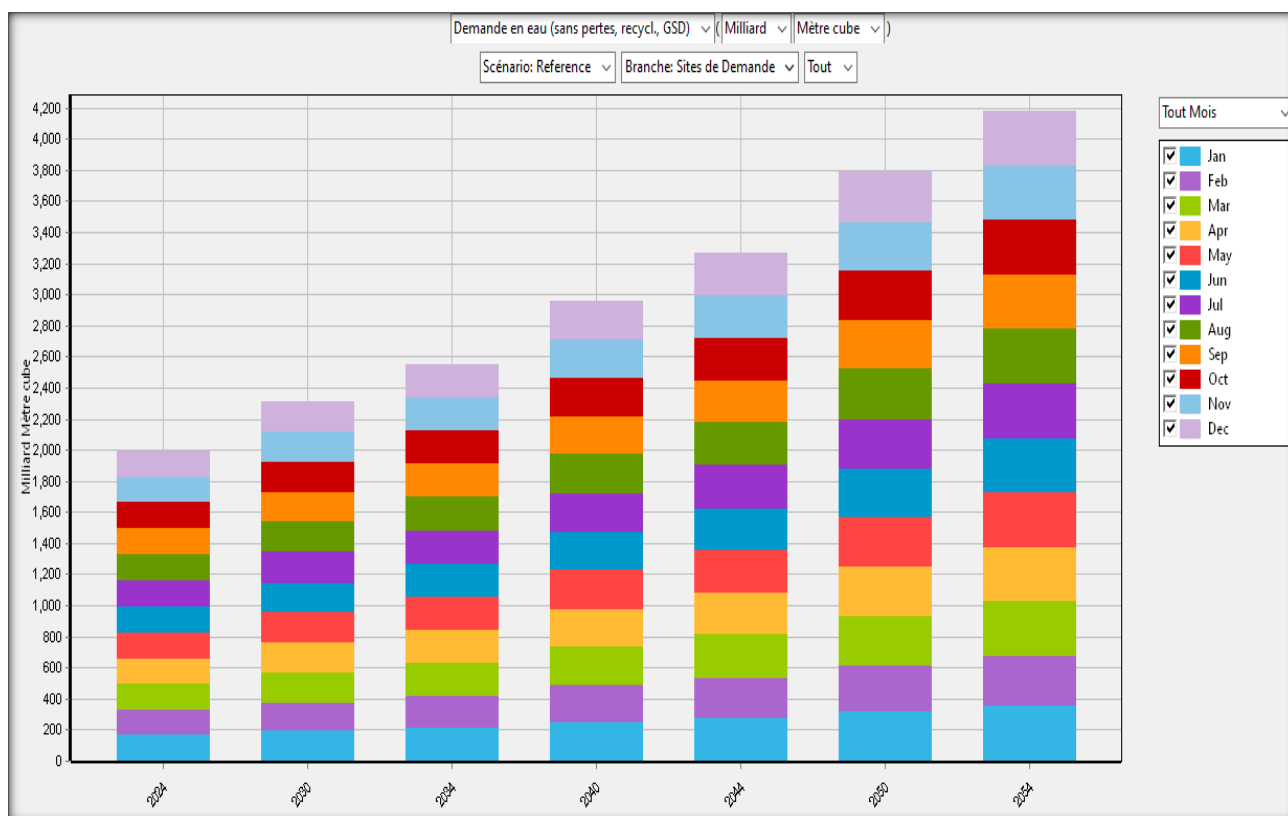


Figure V.15 : Évolution de la demande totale en eau selon le scénario de référence (2023–2054)

L'analyse de l'évolution mensuelle de la demande totale en eau entre 2023 et 2054 révèle une augmentation régulière et significative au fil des années. Par exemple, en janvier, la demande passe de 168,86 milliers de m³ en 2024 à 355,16 milliers de m³ en 2054, soit plus du double en 30 ans. Cette tendance haussière est observée pour tous les mois de l'année, traduisant une croissance continue des besoins en eau, probablement liée à l'accroissement démographique, à l'urbanisation et à l'augmentation des usages domestiques et économiques. Le total annuel de la demande passe ainsi de 1 993,6 milliers de m³ en 2024 à 4 181,74 milliers de m³ en 2054, soit une hausse de plus de 110 %. Cette évolution souligne l'urgence de mettre en place des stratégies de gestion durable des ressources en eau pour répondre aux besoins futurs

V.9 Demande non satisfaite

Le scénario de référence présente une évolution progressive des valeurs mensuelles de janvier 2023 à décembre 2054. Cette évolution suit une tendance générale à la hausse, traduisant probablement une augmentation constante d'un indicateur climatique ou hydrologique simulé, tel que l'évapotranspiration potentielle, la température moyenne ou encore un paramètre de la demande en eau. En début de période, les valeurs mensuelles varient autour de 165 mm, pour

ensuite croître régulièrement et atteindre environ 305 mm en 2051. Cette augmentation se reflète dans toutes les saisons, avec des hausses notables en été comme en hiver, suggérant un changement progressif du régime climatique ou de la demande en ressource. Cette tendance pourrait être liée à des hypothèses de réchauffement climatique, de croissance démographique, ou d'intensification des activités anthropiques dans la région étudiée. La somme totale cumulée sur toute la période 2023–2054 s'élève à 92 671,41 unités, ce qui témoigne d'un accroissement significatif par rapport aux valeurs initiales. Ces résultats mettent en évidence la nécessité d'une planification durable, notamment pour la gestion de l'eau ou de l'aménagement du territoire face aux pressions futures.

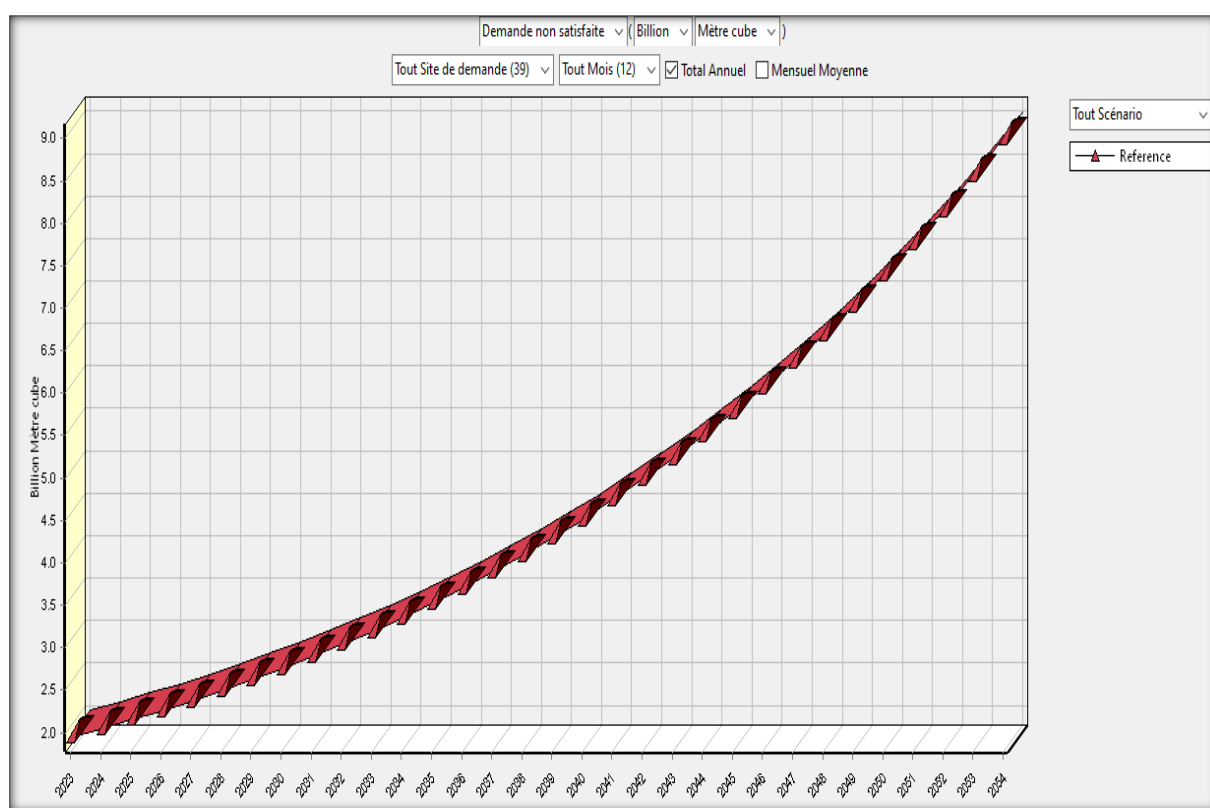


Figure V.16: Demande non satisfaite dans la zone d'étude Scénario de référence (2023-2054).

La figure V.14 présente l'évolution de la demande en eau (en millions de m³) pour différents sites du bassin de l'Oued Fekan entre 2023 et 2054, en distinguant les usages domestiques ("Dmstq") et agricoles ("agrc1"). On observe une augmentation progressive de la demande domestique dans la majorité des localités, notamment à Ghriss, Bordj, Maoussa, et Froha, reflétant une croissance démographique et une urbanisation continue. Par exemple, à Ghriss, la demande passe de 0,08 en 2023 à 0,18 millions de m³ en 2054, soit une augmentation de plus du double. En revanche, les zones agricoles telles que Fekan, Froha, Ghriss, Guerdjoum,

Keurt et Makhda ne présentent aucune demande projetée sur cette période, ce qui peut s'expliquer soit par une stagnation ou une priorisation de l'eau pour les usages urbains. Certaines localités comme Guerdjoum ou Keurt montrent des demandes très faibles, voire nulles, probablement en raison d'une faible densité de population ou d'une absence de développement significatif prévu. La somme totale de la demande pour chaque site permet d'évaluer les besoins cumulatifs sur 32 ans et d'anticiper les pressions futures sur les ressources hydriques, ce qui est crucial pour une planification durable dans un contexte semi-aride.

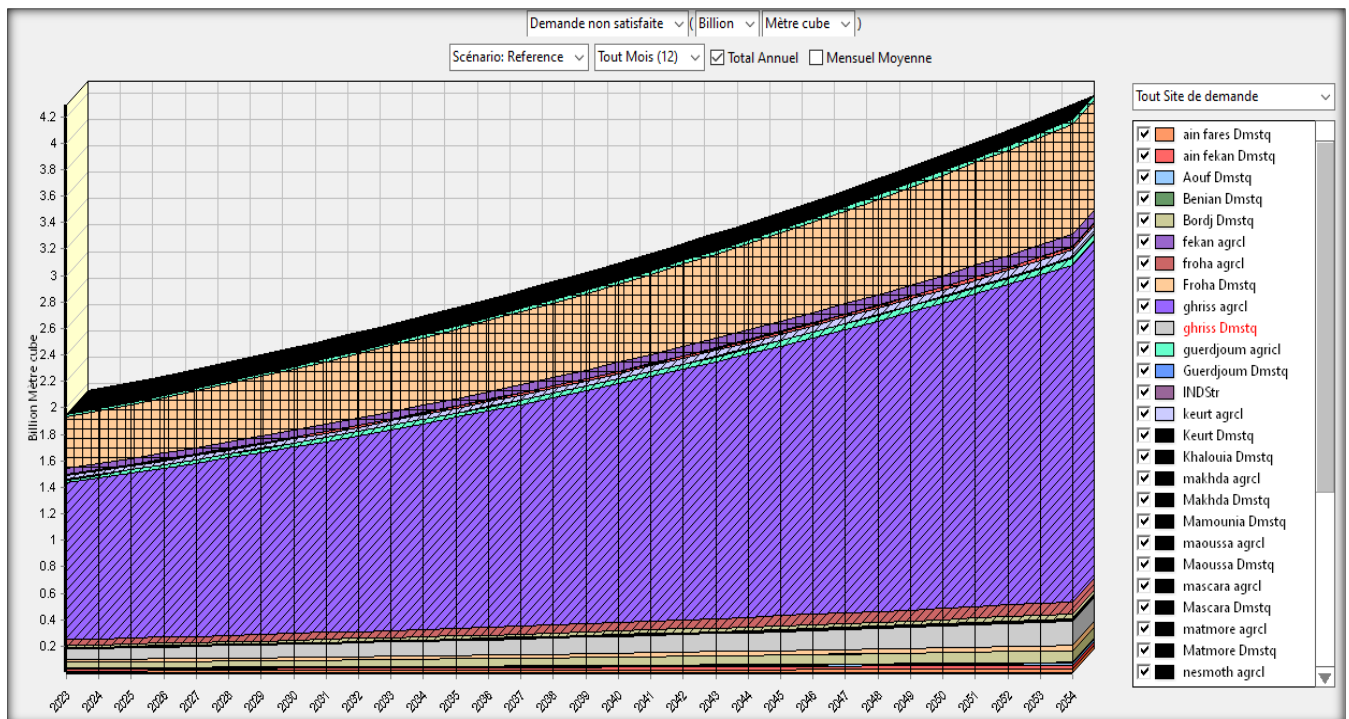


Figure V.17 : Demande non satisfaite annuelle totale (2023–2054) pour tous les sites de demande – Scénario de référence

L'analyse de la demande en eau non satisfaite moyenne mensuelle pour la période 2023–2054, selon le scénario de référence, révèle un déficit hydrique important et constant dans l'ensemble de la zone d'étude, atteignant un total de 2 926,61 milliers de m³. Ce déficit se manifeste de manière régulière tout au long de l'année, avec des valeurs mensuelles oscillant entre 240,38 et 248,39 milliers de m³, traduisant un déséquilibre structurel entre l'offre et la demande en eau. Les mois de janvier, mars, mai, juillet, octobre et décembre affichent les pics les plus élevés, tandis que les autres mois enregistrent de légères baisses, sans variation significative. La majorité de la demande non satisfaite provient des grands centres urbains, en particulier Mascara (1 781,25 milliers de m³, soit plus de 60 % du total), suivi de Teghenif (584,62), Ghriss (125,51), Maoussa (64,85), Sidi Kada (64,19) et Bordj (62,24). Cette forte

pression s'explique par la croissance démographique, l'urbanisation et la concentration des besoins domestiques dans ces zones. À l'inverse, les sites agricoles présentent des valeurs quasi nulles, suggérant soit une faible demande, soit une priorisation de l'approvisionnement domestique au détriment du secteur agricole. Cette situation met en évidence une gestion centrée sur les usages prioritaires de l'eau, au détriment des autres secteurs, et souligne l'urgence d'adopter des stratégies de gestion intégrée des ressources en eau, incluant la réduction des pertes dans les réseaux, la valorisation des eaux usées traitées et une meilleure planification de la répartition spatiale et sectorielle de la ressource pour répondre durablement aux besoins croissants.

V.10.Conclusion

L'évaluation de la gestion des ressources en eau dans le bassin versant de l'Oued Fekan met en évidence des défis importants liés à la croissance démographique rapide et à l'expansion de l'agriculture, qui exercent une pression croissante sur les ressources en eau souterraine, essentielle pour les secteurs domestique, agricole et industriel. Les projections effectuées avec le système WEAP jusqu'en 2054 montrent un déficit hydrique structurel important, dont les conséquences se traduisent par une demande en eau non satisfaite, surtout dans les grands centres urbains.

Le déséquilibre entre l'offre et la demande en eau, en particulier dans les mois où la demande atteint des pics, souligne la nécessité urgente de mettre en œuvre des politiques de gestion de l'eau adaptées, en intégrant des solutions telles que la réduction des pertes dans les réseaux d'approvisionnement, la réutilisation des eaux usées traitées et une meilleure planification de la répartition de la ressource.

Les résultats de cette étude apportent des informations précieuses pour la prise de décisions stratégiques visant à garantir une gestion durable et équilibrée des ressources en eau, en accordant une attention particulière aux secteurs prioritaires tout en assurant un approvisionnement suffisant pour répondre à la demande urbaine. L'intégration de ces solutions dans une approche de gestion intégrée des ressources en eau permettra de répondre efficacement aux défis futurs et d'assurer la durabilité de la ressource pour les générations à venir

Recommandation pour les travaux futurs

Dans cette étude, les données disponibles ont permis de mettre en place un modèle de base dans WEAP, centré principalement sur l'analyse de l'offre et de la demande en eau. Ce modèle constitue un point de départ pertinent pour appréhender la répartition actuelle des ressources entre les différents secteurs d'usage.

- Cependant, en raison de contraintes de temps et de données, une modélisation hydrologique complète n'a pas pu être réalisée. Pour les recherches futures, il est fortement recommandé d'approfondir le travail en :
 - Enrichissant le jeu de données, notamment sur les aspects climatiques (précipitations, température, humidité, etc.) et agronomiques (types de cultures, besoins en irrigation, etc.)
 - Intégrant un module hydrologique avancé dans WEAP, tel que le SoilMoisture Method ou le modèle MABIA, afin de simuler de manière plus fine les processus du cycle hydrologique (évapotranspiration, infiltration, ruissellement, humidité du sol, etc.)
 - Validant les résultats du modèle, en comparant les paramètres simulés avec des données observées sur le terrain, même dans le cadre d'une étude centrée sur l'allocation

La mise en œuvre de ces recommandations permettra de transformer le modèle actuel en un outil d'aide à la décision robuste, adapté à une gestion intégrée, prospective et durable des ressources en eau à l'échelle du bassin versant.

Conclusion générale

L'étude menée sur le bassin versant de l'Oued Fekan, situé en zone semi-aride dans l'ouest de l'Algérie, met en lumière l'importance d'une approche intégrée pour appréhender les interactions complexes entre les dynamiques d'occupation du sol et les processus hydrologiques. Ce travail s'appuie sur l'utilisation combinée d'outils avancés de modélisation spatiale et hydrologique, notamment le modèle WEAP pour la simulation de la gestion de l'eau, ainsi que sur le couplage de modèles hybrides (chaîne de Markov, automates cellulaires, réseaux de neurones) pour la prévision de l'occupation du sol. Cette démarche a permis d'obtenir des résultats robustes quant à l'évolution passée, actuelle et projetée des ressources en eau sous des pressions anthropiques croissantes.

L'analyse diachronique de l'occupation du sol sur la période 2001–2021 révèle une transformation rapide et profonde du territoire, caractérisée par une urbanisation galopante, avec une augmentation de 617 % des surfaces urbanisées au détriment des terres agricoles et forestières. Cette expansion urbaine a profondément modifié le fonctionnement hydrologique naturel du bassin.

La modélisation du ruissellement de surface, réalisée par intégration d'un système d'information géographique (SIG) et de la méthode SCS-CN, met en évidence une augmentation nette du ruissellement entre 2001 et 2021, principalement liée à l'imperméabilisation des sols résultant de la disparition des couvertures végétales et de la conversion des terres. Cette évolution accentue les risques d'inondations localisées dans les zones fortement bâties.

Par ailleurs, l'imperméabilisation engendre une diminution de l'infiltration, ce qui impacte négativement la recharge des nappes phréatiques, essentielles pour l'approvisionnement en eau.

Parallèlement, l'évapotranspiration potentielle (PET), quantifiée mensuellement selon le type d'occupation du sol à l'aide de la méthode de Penman-Monteith basée sur les données TerraClimate, s'est globalement accrue. Cette tendance à la hausse, observée même dans les zones urbaines, résulte de l'effet combiné de l'intensification de l'îlot de chaleur urbain et du changement climatique régional. La hausse progressive de la PET augmente la demande en eau tout en réduisant la disponibilité hydrique.

Les simulations prospectives réalisées avec le modèle WEAP, jusqu'en 2051, confirment que la poursuite des tendances actuelles exacerberait ces pressions sur les ressources hydriques, en particulier sur les nappes souterraines, vitales pour les usages domestiques, agricoles et industriels. Toutefois, ces simulations démontrent également que des stratégies alternatives de gestion, telles que la réduction de la demande, la réutilisation des eaux usées traitées ou la réallocation sectorielle, peuvent significativement atténuer cette vulnérabilité.

Ces résultats confirment que la gestion durable des ressources en eau ne peut être dissociée des dynamiques spatiales et des transformations territoriales. La forte interconnexion entre évolution de l'occupation du sol et disponibilité en eau souligne la nécessité d'une gouvernance intégrée et anticipative, qui articule planification territoriale, préservation des écosystèmes et satisfaction des besoins humains. Dans ce contexte, la modélisation prospective constitue un outil précieux d'aide à la décision, fournissant aux gestionnaires des scénarios crédibles pour orienter leurs politiques et actions.

D'un point de vue scientifique, cette recherche enrichit la compréhension des effets cumulatifs de l'urbanisation, de la déforestation et des mutations agricoles sur le régime hydrologique des bassins semi-arides. Elle démontre la pertinence des approches hybrides mobilisant données spatiales, climatiques et socio-économiques pour construire des modèles prédictifs adaptés aux spécificités locales.

Enfin, sur le plan opérationnel, ces résultats constituent une base solide pour la mise en œuvre de politiques de Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) à l'échelle du bassin de l'Oued Fekan. Ils appellent à renforcer la coordination entre acteurs institutionnels, à intégrer davantage les données scientifiques dans la prise de décision, et à promouvoir une culture de durabilité et de résilience face aux risques croissants liés au changement climatique et à l'urbanisation non maîtrisée. La préservation des zones naturelles, le développement d'infrastructures vertes — telles que toitures végétalisées, revêtements perméables et bassins de rétention — ainsi que des pratiques d'urbanisme durable apparaissent comme des mesures prioritaires pour atténuer les impacts négatifs sur le cycle hydrologique local et assurer un avenir résilient au bassin.

En complément, plusieurs perspectives de recherche apparaissent essentielles pour approfondir cette connaissance. Il s'agit notamment d'affiner les modèles hydrologiques grâce à des données plus fines et des capteurs modernes, d'intégrer les projections climatiques régionales pour évaluer les impacts conjoints du climat et de l'anthropisation, d'approfondir l'étude des nappes phréatiques en lien avec leurs usages, de développer une approche intégrée des dimensions socio-économiques et institutionnelles, ainsi que d'explorer des solutions d'adaptation innovantes pour réduire les impacts de l'urbanisation.

Ces avancées scientifiques doivent impérativement être traduites en actions concrètes. C'est pourquoi les recommandations opérationnelles insistent sur la nécessité de renforcer la surveillance hydrologique, de promouvoir une planification territoriale intégrée, d'encourager la participation des acteurs locaux, d'adopter des politiques visant à limiter l'imperméabilisation des sols et à développer les infrastructures vertes, et de mettre en place

des stratégies sectorielles équilibrées conciliant besoins en eau, protection de l'environnement et développement socio-économique.

Ainsi, pour assurer la résilience et la durabilité du bassin versant de l'Oued Fekan face aux défis futurs, il est indispensable d'articuler étroitement recherche, gestion et gouvernance dans une dynamique collaborative et anticipative.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Abderrahmane, Hamimed, Zaagane, M., Tewfik Ahmed, O., Teffahi, M., & Bekhtiar, D. (2017). Monitoring daily actual evapotranspiration and surface water status over an agricultural area in western Algeria using remote sensing data. 1, 45–59
- Aghajani, H., Sarkari, F., & Fattahi Moghaddam, M. (2024). Predicting land use/land cover changes using CA-Markov and LCM models in the metropolitan area of Mashhad, Iran. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s40808-024-02051-x>
- Arthington, A. H., et al. (2018). The Brisbane Declaration and global action agenda on environmental flows. *Frontiers in Environmental Science*,
- Ahmad, A., & Quegan, S. (2012). Analysis of maximum likelihood classification on multispectral data. *Applied Mathematical Sciences*, 6(129), 6425–6436.
- Alsharif, M., Alzandi, A. A., Shrahily, R., & Mobarak, B. (2022). Land Use Land Cover Change Analysis for Urban Growth Prediction Using Landsat Satellite Data and Markov Chain Model for Al Baha Region Saudi Arabia. *Forests*, 13(10), 1530. <https://doi.org/10.3390/f13101530>
- Anderson, J. R., & Hardy, E. E. (1973). A land use classification system for use with remote sensor data. *LARS Symposia*, 2.
- Bekkoussa, B., Azzaz, H., & Khaldi, A. (2013). Numerical underground water flow modeling. A case study of Ghriss Plain catchment, North Western of Algeria.
- Bekkoussa, B., Jourde, H., Batiot-Guilhe, C., Meddi, M., Khaldi, A., & Azzaz, H. (2013). Origine de la salinité et des principaux éléments majeurs des eaux de la nappe phréatique de la plaine de Ghriss, Nord-Ouest algérien. *Hydrological Sciences Journal*, 58. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.80063>
- Bekkoussa, B., Taupin, J. D., Patris, N., & Azzaz, H. (2017). Cartographie de l'indice de qualité des eaux souterraines de la plaine de Ghriss, Nord-Ouest algérien.
- Bekkoussa, S. M. (2020). Approche hydrogéologique et hydrochimique des échanges entre aquifères profonds et superficiels du bassin d'Oued Fékan (Thèse de doctorat, Université de Mascara, Algérie).

- Benadela, L., Bekkoussa, B., & Laouni, G. (2022). Multivariate analysis and geochemical investigations of underground water in a semi-arid region, case of superficial aquifer in Ghriss Basin, Northwest Algeria. *Journal of Underground Water Science and Engineering*, 10(3), 233–249.
- Benadela Laouni, A. (2023). Apport des outils géochimiques et isotopiques à l'étude du fonctionnement de l'aquifère karstique du bassin d'Oued Fékan (Thèse de doctorat, Université de Mascara, Algérie).
- Benstaali, I. (2007). Contribution à la régionalisation des écoulements superficiels dans le bassin versant de la Macta (Mémoire de Magister, Université de Mascara, Algérie).
- Bertrand, G. (2004). Hydrologie et aménagement des petits bassins versants en région méditerranéenne. CNRS Éditions.
- Bolstad, P. V., & Lillesand, T. D. (1991). Rapid maximum likelihood classification. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 57(1), 67–74.
- Bouanani, A. (2004). Modélisation hydrologique en zone semi-aride : application au bassin versant de l'oued Mina (Algérie) (Thèse de doctorat, Université de Tlemcen).
- Cai, Y., Xu, M., Wang, X., Yue, W., & Li, C. (2017). Optimal water utilization and allocation in industrial sectors based on water footprint accounting in Dalian City, China. *Journal of Cleaner Production*, 176, 1283–1291.
- Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113(5), 893–903. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>
- Chrair, M., Khaldi, A., Hamadouche, A., Hamimed, A., Cernesson, F., & Alkan, M. (2020). Evaluation of the effects of land cover changes and urbanization on land surface temperature: a remote sensing study of sub-watershed of Oued Fekan, northwest Algeria, 38, 907–926.
- Daba, M. H., & You, S. (2022). Quantitatively assessing the future land-use/land-cover changes and their driving factors in the upper stream of the Awash River based on the CA–Markov model. *Sustainability*, 14(3), 1538. <https://doi.org/10.3390/su14031538>
- Djadouni, F. (2017). Étude de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux brutes et traitées du barrage de Bouhanifia. *Revue d'Écologie*, 7, 99–109.

- Ghachi, A. (1986). Analyse statistique de la variabilité des précipitations en Algérie du Nord (Thèse de Magister, Institut National de la Météorologie, Alger).
- 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*, 6(9), e05092. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05092>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Guidigan, M. L. G., Sanou, C. L., Ragatoa, D. S., Fafa, C. O., & Mishra, V. N. (2018). Assessing Land Use/Land Cover Dynamic and Its Impact in Benin Republic Using Land Change Model and CCI LC Products. *Earth Systems and Environment*. <https://doi.org/10.1007/s41748-018-0083-5>
- Hatamkhani, A., Khazaiepour, A., & Moridi, A. (2022). Sustainable water resource planning at the basin scale with simultaneous goals of agricultural development and wetland conservation. *Journal of Water Supply: Research and Technology - Aqua*, 71. <https://doi.org/10.2166/aqua.2022.025>
- Hassan, Z., Shabbir, R., Ahmad, S., Malik, A. H., Aziz, N., Butt, A., & Summra, E. (2016). Dynamics of land use and land cover change (LULCC) using geospatial techniques: A case study of Islamabad Pakistan. *SpringerPlus*, 5, 812.
- He, C., Okada, N., Zhang, Q., Shi, P., & Zhang, J. (2006). Modeling urban expansion scenarios by coupling cellular automata model and system dynamic model in Beijing, China. *Applied Geography*, 26(3–4), 323–345.
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56(3), 275–370. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56)
- Imad E. BOUZNAD, Omar ELAHCENE, Mohamed S. BELKSIER (2019) Management model for water demand using the WEAP tool: Case of Setif Province – Algerian highlands. *JOURNAL OF WATER AND LAND DEVELOPMENT* 2020, No. 45 (IV–VI): 19–28. <https://DOI.org/10.24425/jwld.2020.133042>
- Kazemi, M., Bozorg-Haddad, O., Fallah-Mehdipour, E., & Chu, X. (2022). Optimal water resources allocation in transboundary river basins according to hydropolitical consideration.

Environment, Development and Sustainability, 24. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01491-0>

Koko, A. F., Han, Z., Wu, Y., Abubakar, G. A., & Bello, M. (2022). Spatiotemporal Land Use/Land Cover Mapping and Prediction Based on Hybrid Modeling Approach: A Case Study of Kano Metropolis, Nigeria (2020–2050). *RemoteSensing*, 14(23), 6083. <https://doi.org/10.3390/rs14236083>

Kherbache, N. (2019). Rareté des ressources et politique de l'eau en Algérie : analyse de la transition d'un modèle de l'offre vers la gestion de la demande en eau (GDE). Thèse de Doctorat, Département des Sciences Économiques, Laboratoire d'Économie et Développement (LED), avec le soutien de l'IRD et de l'UMR G-Eau à Montpellier.

Kherbache, N., & Molle, F. (2022). Causes and consequences of the Macta basin closure, Algeria. *International Journal of Water Resources Development*, 39, 122. <https://doi.org/10.1080/07900627.2022.2089100>

Kumar, J., Biswas, B., & Walker, S. (2020). Multi-temporal LULC classification using hybrid approach and monitoring built-up growth with Shannon's entropy for a semi-arid region of Rajasthan, India. *Journal of the Geological Society of India*, 95(6), 626–635. <https://doi.org/10.1007/s12594-020-1489-x>

Kumar, M., & Shaikh, V. R. (2013). Site suitability analysis for urban development using GIS based multicriteria evaluation technique. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 41(2), 417–424. <https://doi.org/10.1007/s12524-012-0221-8>

Lakhdari, F. T. (2014). Contribution à la connaissance de la stygofaune d'Algérie : étude de la qualité de l'eau et de la faune aquatique des puits de la région de Mascara (Nord-Ouest Algérien). Thèse de Doctorat, Université Abou Bakr Belkaid – Tlemcen

Manandhar, R., Odeh, I. O., & Ancev, T. (2009). Improving the accuracy of land use and land cover classification of Landsat data using post-classification enhancement. *Remote Sensing*, 1(3), 330–344. <https://doi.org/10.3390/rs1030330>

Minallah, M. N., Ghaffar, A., Rafique, M., & Mohsin, M. (2016). Urban growth and socio-economic development in Gujranwala, Pakistan: A geographical analysis. *Pakistan Journal of Science*, 68(2), 176–183.

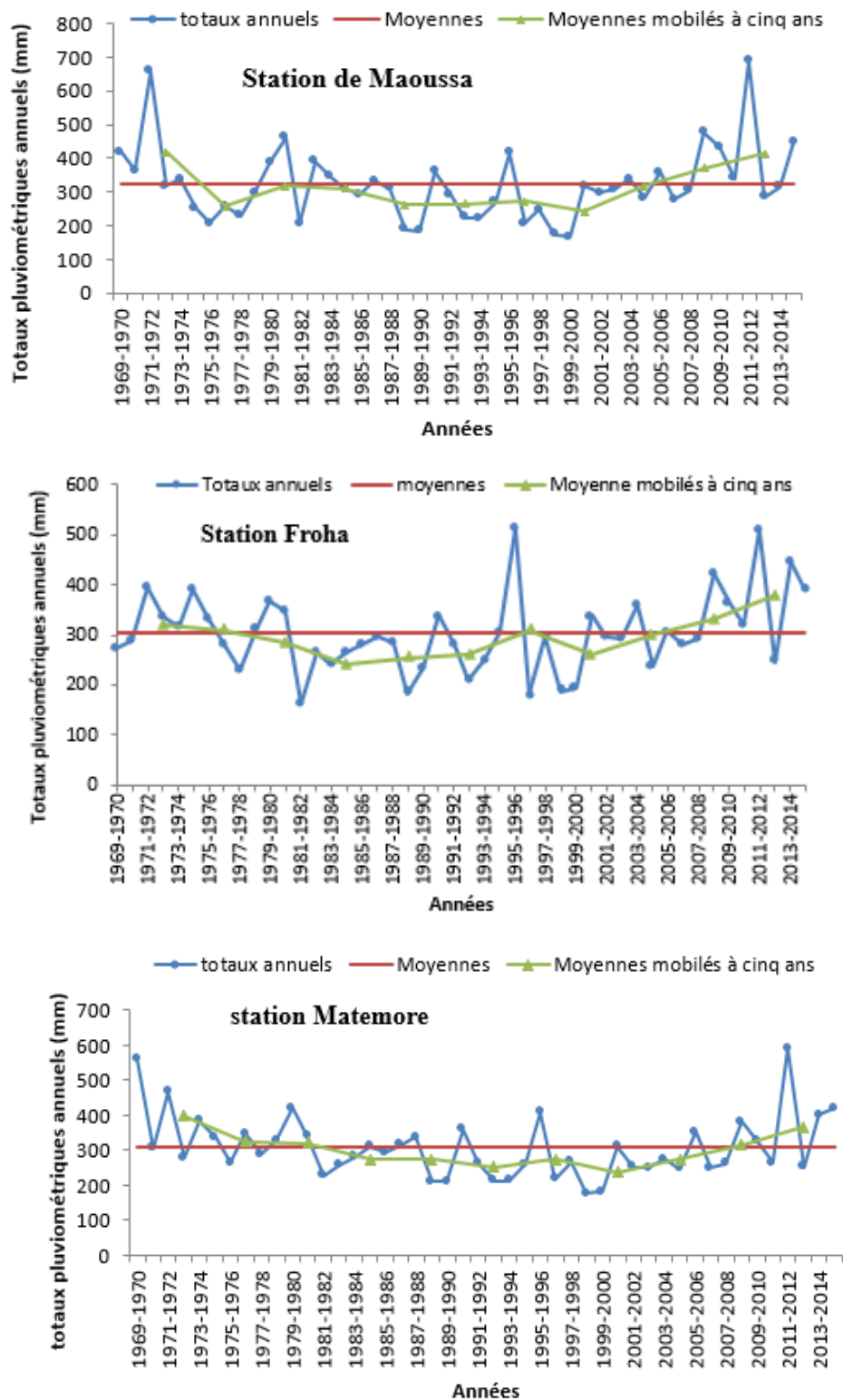
- Mishra, V. N., & Rai, P. K. (2016). A remote sensing aided multi-layer perceptron-Markov chain analysis for land use and land cover change prediction in Patna district (Bihar), India. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(4), 249. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2138-3>
- Mishra, V. N., Rai, P. K., Prasad, R., Punia, M., & Nistor, M. M. (2018). Prediction of spatio-temporal land use/land cover dynamics in rapidly developing Varanasi district using geospatial approach: a comparison of hybrid models. *Applied Geomatics*, 10(3), 257–276. <https://doi.org/10.1007/s12518-018-0223-5>
- Morena, F. (2000). Estimation du temps de concentration dans les bassins méditerranéens : comparaison des formules empiriques. *Revue des Sciences de l'Eau*, 13(4), 465–478.
- Pijanowski, B. C., Brown, D. G., Shellito, B. A., & Manik, G. A. (2002). Using neural networks and GIS to forecast land use changes: a Land Transformation Model. *Computers, Environment and Urban Systems*, 26(6), 553–575. [https://doi.org/10.1016/S0198-9715\(01\)00015-1](https://doi.org/10.1016/S0198-9715(01)00015-1)
- Pettinotti, L., de Ayala, A., & Ojea, E. (2018). Benefits from water-related ecosystem services in Africa and climate change. *Ecological Economics*, 149, 294–305.
- Richards, J. A. (1999). *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-03978-6>
- Ren, C., Guo, P., Tan, Q., & Zhang, L. (2017). A multi-objective fuzzy programming model for optimal use of irrigation water and land resources under uncertainty in Gansu Province, China. *Journal of Cleaner Production*, 164, 85–94.
- Roche, M. (1963). *Hydrologie de surface*. Paris.
- Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., et al. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, 145, 154–172. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001>
- Roozbahani, R., Schreider, S., & Abbasi, B. (2015). Optimal water allocation through a multi-objective compromise between environmental, social, and economic preferences. *Environmental Modelling & Software*, 64, 18–30.
- Sampath, V. K., & Radhakrishnan, N. (2022). A comparative study of LULC classifiers for RUSLE model factors. *Earth Science Informatics*, 16, 733–751. <https://doi.org/10.1007/s12145-022-00911-7>

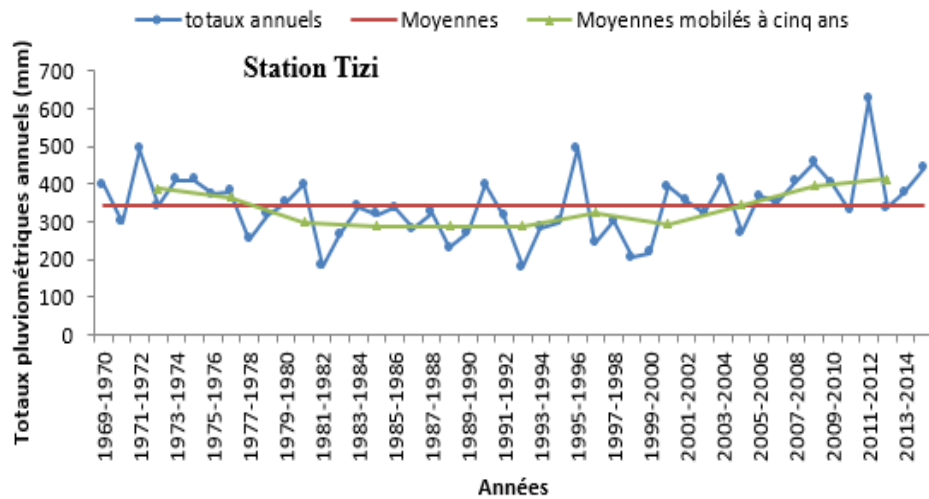
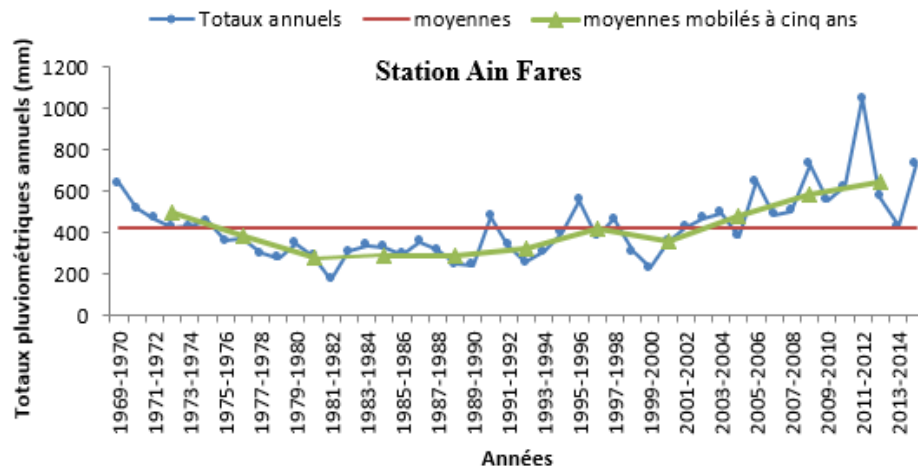
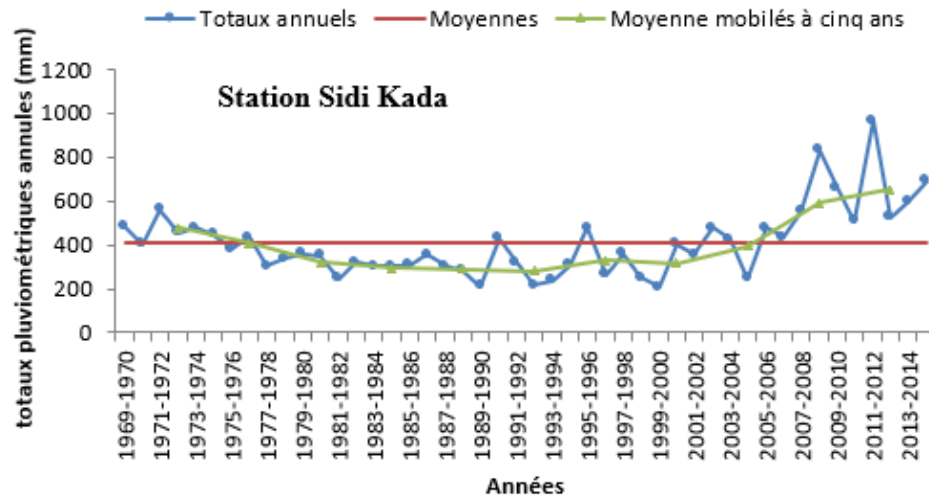
- Schumm, S. A. (1977). *The Fluvial System*. Wiley-Interscience.
- Sharma, A. K., Sharma, M., & Sharma, A. K. (2022). Assessment of Land Use Change and Climate Change Impact on Biodiversity and Environment. In *Environmental Pollution and Natural Resource Management* (pp. 73–89). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-05335-1_5
- Sisodia, P. S., Tiwari, V., & Kumar, A. (2014). Analysis of supervised maximum likelihood classification for remote sensing image. *IEEE ICRAIE*. <https://doi.org/10.1109/ICRAIE.2014.690931>
- Son, N. T., Le Huong, H., Loc, N. D., &Phuong, T. T. (2022). Application of SWAT model to assess land use change and climate variability impacts. *Environment, Development and Sustainability*, 24, 3091–3109. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01295-2>
- Sourisseau, B. (1972). Hydrogeological study of the plain of Ghriss. Report, National Agency of Water Resources, Algeria.
- Strahler, A. N. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basins. In V. T. Chow (Ed.), *Handbook of Applied Hydrology* (pp. 4–39). McGraw-Hill.
- Tan, K. C., Lim, H. S., MatJafri, M. Z., & Abdullah, K. (2010). Landsat data to evaluate urban expansion and determine LULC changes in Penang Island. *Environmental Earth Sciences*, 60(7), 1509–1521. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0286-z>
- UNESCO World Water Assessment Programme (WWAP). (2020). *The United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change*.
- Vermote, E., & Saleous, N. (2006). Operational atmospheric correction of MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 101(1), 23–37. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.12.005>
- Verma, P., Raghubanshi, A., Srivastava, P. K., & Raghubanshi, A. S. (2020). Appraisal of kappa-based metrics in LULC classification accuracy. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(2), 1045–1059. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00740-x>.

Annexes

Annexe :

Figure II.14 : Variabilité des précipitations annuelles dans la région d'étude (1969-2015)





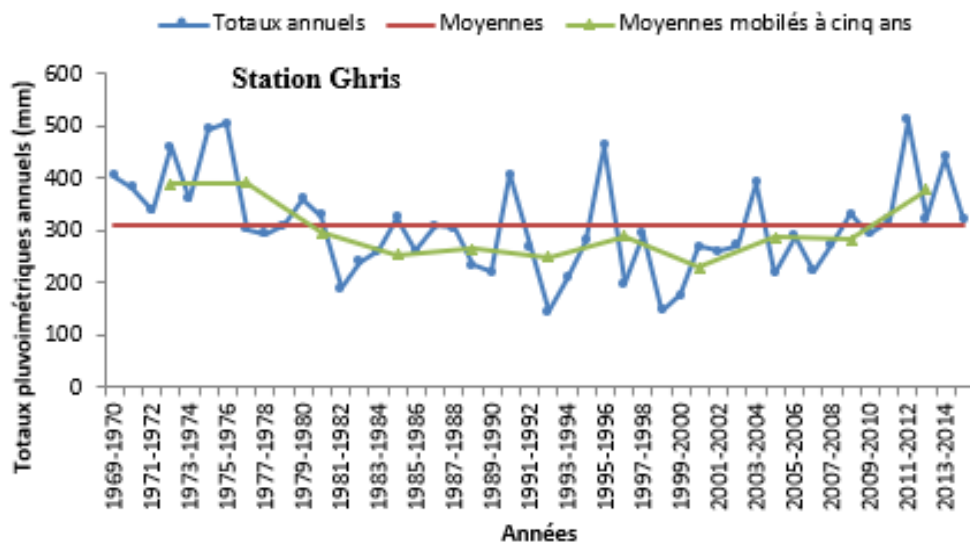
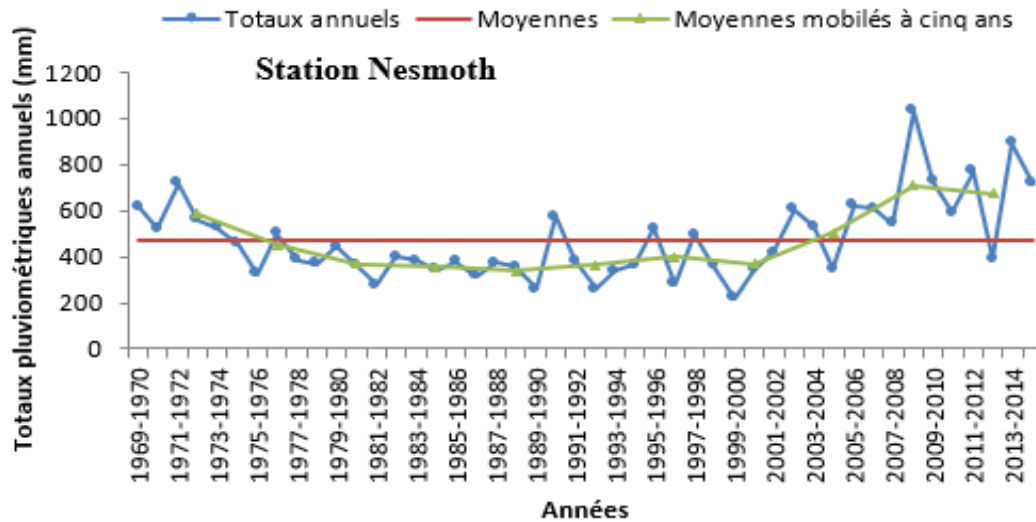


Table A1. Description of LULC classes.

Type of LULC	Description
Built-up	Industrial and commercial units, residential areas, mixed urban areas
Forest	All types of forest cover land
Shrub land	shrub and bush areas
Agricultural land	vegetation areas
Grassland	All types of grassland
Barren land	Bare Soil Sand, bare land

Table III.1: Synopsis of the Composite Band for LULC classification (Esri -kevin_butler 2013;NASA/USGS)

Band Combinations	Landsat 8	Landsat 5
Natural Color	4/ 3 /2	3 / 2 / 1
False Color (urban)	7/ 6 /4	7 / 4 / 2
Coloe Infrared (Vegetation)	5/ 4/ 3	4 / 3 / 2
Agriculture	6 /5/ 2	5 / 4 / 1
Atmospheric Penetration	7 /6 /5	7 / 5 / 4
Healthy Vegetation	5 /6 /2	4 / 5 / 2
Land/Water	5 /6/ 4	4 / 5 / 3
Natural With Atmospheric Removal	7/ 5 /3	7 / 4 / 3
Shortwave Infrared (SWIR)	7/ 5/ 4	7 / 4 / 5
Vegetation Analysis	6/ 5 /4	5 / 4 / 3

Table III.2. Accuracy assessment of LULC maps from the years 2001 to 2021.

Accuracy Types	LULC Classes	2001	2006	2011	2016	2021
Producer Accuracy (%)	Built up	96.61	96.31	98.25	96.73	95.61
	Forest	98.70	93.85	99.35	96.50	99.35
	Shrub land	96.22	87.55	97.29	92.51	98.66
	Agricultural land	93.01	83.80	97.13	97.65	92.15
	Grassland	93.87	94.62	98.30	96.68	96.40
	Barren land	87.96	90.74	92.19	92.70	95.32
User Accuracy (%)	Built up	95.57	94.12	95.69	98.49	95.44
	Forest	98.52	93.36	99.72	99.84	99.71
	Shrub land	95.39	92.82	97.67	97.78	96.72
	Agricultural land	95.98	89.53	97.22	92.18	95.37
	Grassland	82.83	80.51	93.89	91.19	94.70
	Barren land	99.27	98.96	98.33	87.21	95.66
Overall Accuracy (%)		95.02	93.60	97.45	98.06	97.06%
Kappa Coefficient		0.94	0.92	0.97	0.97	0.96

Table III.3. LULC area from 2001–2021 (km²) and percentage (%).

LULC	2001		2006		2011		2016		2021	
	Area	%	Area	%	Area	%	Area	%	Area	%
	(Km ²)		(Km ²)		(Km ²)		(Km ²)		(Km ²)	
Built up	22.61	1.87	32.01	2.66	38.45	3.19	65.53	5.43	162.21	13.47
Forest	76.69	6.36	130.16	10.80	124.95	10.36	51.22	4.25	70.55	5.85
Shrub land	88.28	7.33	88.01	7.30	40.7	3.37	535.26	44.42	116.91	9.70
Agricultural land	435.11	36.11	266.18	22.08	264.07	21.91	344.58	28.59	257.6	21.37
Grassland	535.76	44.45	458.21	38.02	660.59	54.82	94.91	7.88	547.11	45.39
Barren land	46.66	3.88	230.54	19.14	76.35	6.35	113.61	9.43	50.73	4.22

Table III.3. Change in various land use classes of the study area by km² and percentage (%).

LULC class	Change		Change		Change		Change	
	(increase/decrease)		(increase/decrease)		(increase/decrease)		(increase/decrease)	
	(2001-2006)		(2001-2011)		(2001-2016)		(2001-2021)	
	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%
Built up	9.4	41.57	15.84	70.06	42.92	189.83	139.6	617.426
Forest	53.47	69.72	48.26	62.93	-25.47	-33.21	-6.14	-8.006
Shrub land	-0.27	-0.31	-47.58	-53.90	446.98	506.32	28.63	32.431
Agricultural land	-168.93	-38.82	-171.04	-39.31	-90.53	-20.81	-177.51	-40.797
Grassland	-77.55	-14.47	124.83	23.30	-440.85	-82.28	11.35	2.118
Barren land	183.88	394.08	29.69	63.63	66.95	143.48	4.07	8.723

Table III.4. Actual and projected LULC of 2021.

LULC class	Actual		Projected		Current validation Kappa
	Area (Km ²)	%	Area (Km ²)	%	
Built up	162.21	13.47	160.73	13.33	0.68
Forest	70.55	5.85	50.51	4.19	
Shrub land	116.91	9.70	132.82	11.02	
Agricultural land	257.60	21.37	345.22	28.64	
Grassland	547.11	45.39	504.31	41.84	
Barren land	50.73	4.22	11.52	0.98	

Table III.5. Change in different land cover classes for the years 2031, 2041, and 2051.

LULC class	2031		Kappa	2041		Kappa	2051		Kappa
	Area	%		Area	%		Area	%	
	(km ²)			(km ²)			(km ²)		
Built up	165.58	13.75	0.65	166.11	13.82	0.93	200	16.64	0.73
Forest	69.25	5.74		70	5.80		60.48	5.01	
Shrub land	117.07	9.71		117	9.70		120.11	9.96	
Agricultural land	257.02	21.32		257	21.32		257.16	21.33	
Grassland	547.15	45.41		546	45.30		517.11	42.90	
Barren land	49.06	4.07		49	4.06		50.25	4.16	

Table III.6. Temporal changes 2021–2051.

LULC class	2021 - 2031		2021 - 2041		2021 - 2051	
	Area (Km ²)	%	Area (Km ²)	%	Area (Km ²)	%
Built up	3.37	2.08	3.9	2.40	37.79	23.30
Forest	-1.3	-1.84	-0.55	-0.78	-10.07	-14.27
Shrub land	0.16	0.14	0.09	0.08	3.2	2.74
Agricultural land	-0.58	-0.23	-0.6	-0.23	-0.44	-0.17
Grassland	0.04	0.01	-1.11	-0.20	-30	-5.48
Barren land	-1.67	-3.29	-1.73	-3.41	-0.48	-0.95