

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



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

École Nationale Polytechnique
Département d'hydraulique
Laboratoire de Recherches des Sciences de l'Eau



Thèse de Doctorat

En Hydraulique
Pour l'obtention du diplôme de Doctorat en Hydraulique
Spécialité : Traitement et épuration

Intitulé

Contribution à l'Étude de l'Impact des Zones Humides sur la Qualité des Eaux

Réalisée par
Noussaiba IKHLEF

Présentée et soutenue publiquement le (07/02/2026)

Devant le jury composé de :

Présidente :	BENMAMAR	Saâdia	Professeure
Directeur de Thèse :	BOUGUERRA	Hamza	M.C.A
Co-Directeur de Thèse :	TACHI	Salah Eddine	M.C.A
Examinatrice :	ARRAR	Jazia	Professeure
Examineur :	CHERGUI	Abdelmalek	Professeur
Examineur :	BENAMARA	Abdelwaheb	M.C.A
Examineur :	BOUAMRANE	Ali	M.C.A

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



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

École Nationale Polytechnique
Département d'hydraulique
Laboratoire de Recherches des Sciences de l'Eau



Thèse de Doctorat

En Hydraulique

Pour l'obtention du diplôme de Doctorat en Hydraulique

Spécialité : Traitement et épuration

Intitulé

Contribution à l'Étude de l'Impact des Zones Humides sur la Qualité des Eaux

Réalisée par

Noussaïba IKHLEF

Présentée et soutenue publiquement le (07/02/2025)

Devant le jury composé de :

Présidente :	BENMAMAR	Saâdia	Professeure
Directeur de Thèse :	BOUGUERRA	Hamza	M.C.A
Co-Directeur de Thèse :	TACHI	Salah Eddine	M.C.A
Examinatrice :	ARRAR	Jazia	Professeure
Examineur :	CHERGUI	Abdelmalek	Professeur
Examineur :	BENAMARA	Abdelwaheb	M.C.A
Examineur :	BOUAMRANE	Ali	M.C.A

تُعد المناطق الرطبة نظامًا بيئيًا أساسية للحفاظ على التنوع البيولوجي والخدمات البيئية، لكنها تشهد تدهورًا متزايدًا. يُعدّ بحيرة فزارة، الواقعة في ولاية عنابة (شمال شرق الجزائر)، منطقة رطبة ذات أهمية دولية، ومصنفة ضمن اتفاقية رامسار. غير أنها تواجه تهديدات متزايدة نتيجة الضغوط البشرية، مثل التلوث المنتشر، الجفاف الجزئي، وازدياد الملوحة، مما يؤثر سلبيًا على جودة المياه السطحية والجوفية في حوضها المائي.

تهدف هذه الأطروحة إلى تقييم تأثير هذه المنطقة الرطبة على جودة المياه الجوفية، من خلال تحديد دورها المحتمل كمصفية تنقية أو كمصدر للتلوث. ولتحقيق ذلك، تم تنفيذ حملة أخذ عينات شملت 37 بئرًا خلال الموسم الجاف، وتحليل عدة معايير هيدروكيميائية: Na^+ ، Ca^{2+} ، Mg^{2+} ، Cl^- ، SO_4^{2-} ، HCO_3^- ، CE. تم اختيار هذه المعايير لحساب مؤشر جودة المياه (Irrigation Water Quality Index, IWQI)، المُستخدم لتقييم صلاحية المياه للري وفقًا لطريقة Meireles. بعد ذلك، تم تطبيق نماذج التعلم الآلي، بمقارنة أربعة خوارزميات: الانحدار الخطي، SVR، شجرة القرار، XGBoost للتنبؤ بمؤشر IWQI وتحديد المعايير المؤثرة.

أظهرت النتائج تدهورًا موسميًا واضحًا خلال فصل الصيف، يتمثل في ارتفاع ملوحة المياه المرتبطة بتركيزات عالية من أيونات Cl^- و Na^+ وقدّم نموذج XGBoost أفضل أداء تنبؤي ($R^2 = 0.9222$)، مؤكّدًا التأثير الكبير لأيونات Na^+ ، Cl^- ، HCO_3^- والتوصيلية الكهربائية. يتبين أن بحيرة فزارة تمثل نظامًا مزدوج التأثير، حيث تلعب جزئيًا دورًا في تنقية المياه، وفي الوقت نفسه تتأثر بتزايد مصادر التلوث.

تُبرز هذه الدراسة ضرورة اعتماد إدارة متكاملة ومستدامة لحماية الوظائف البيئية للبحيرة وضمان جودة الموارد المائية، في ظل تصاعد التحديات البيئية. كما تؤكد على أهمية استخدام أدوات النمذجة المتقدمة في عمليات المراقبة واتخاذ القرار.

الكلمات المفتاحية: المناطق الرطبة، بحيرة فزارة، جودة المياه الجوفية، IWQI، التعلم الآلي.

Abstract

Wetlands, essential ecosystems for biodiversity and ecosystem services, are undergoing increasing degradation. Lake Fetzara, located in the Annaba province (northeastern Algeria), is an internationally important wetland, classified as a Ramsar site. However, it is seriously threatened by growing anthropogenic pressures, such as diffuse pollution, partial desiccation, and salinization, which affect the quality of surface and groundwater in its watershed.

This thesis aims to assess the impact of this wetland on groundwater quality, identifying its potential role as a purifying filter or a source of contamination. To this end, a sampling campaign was conducted on 37 wells during the dry season, with analysis of several hydrochemical parameters (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , EC). These parameters were selected to calculate the IWQI (Irrigation Water Quality Index), used to evaluate irrigation suitability according to the method by Meireles et al. (2010). Subsequently, a modeling approach based on Machine Learning was implemented, comparing four algorithms (linear regression, SVR, decision tree, XGBoost) to predict IWQI and identify influential parameters.

The results reveal significant seasonal degradation in summer, marked by high salinity related to Cl^- and Na^+ concentrations. The XGBoost model showed the best predictive performance ($R^2 = 0.9222$), confirming the major influence of Na^+ , Cl^- , HCO_3^- ions and electrical conductivity. Lake Fetzara appears as an ambivalent system, partially playing a purifying role while being increasingly affected by pollution.

This study highlights the need for integrated and sustainable management to preserve the lake's ecological functions and ensure water resource quality in a context of increasing environmental stress. It also emphasizes the importance of advanced modeling tools for monitoring and decision-making support.

Keywords: Wetlands, Lake Fetzara, Groundwater Quality, IWQI, Machine Learning.

Résumé

Les zones humides, écosystèmes essentiels pour la biodiversité et les services écosystémiques, subissent une dégradation accrue. Le lac Fetzara, situé dans la wilaya d'Annaba (nord-est de l'Algérie), constitue une zone humide d'importance internationale, classée site Ramsar. Il est toutefois fortement menacé par des pressions anthropiques croissantes, telles que la pollution diffuse, l'assèchement partiel et la salinisation, qui menacent la qualité des eaux superficielles et souterraines de son bassin versant.

Cette thèse a pour objectif d'évaluer l'impact de cette zone humide sur la qualité des eaux souterraines, en identifiant son rôle potentiel comme filtre épurateur ou source de contamination. À cet effet, une campagne d'échantillonnage a été réalisée sur 37 puits durant la saison sèche, avec analyse de plusieurs paramètres hydrochimiques (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CE). Ces paramètres ont été sélectionnés pour le calcul de l'indice de qualité des eaux d'irrigation (Irrigation Water Quality Index, IWQI) utilisé pour évaluer leur aptitude à l'irrigation selon la méthode de Meireles et al. (2010). Par la suite, une modélisation basée sur le Machine Learning a été mise en œuvre, comparant quatre algorithmes (régression linéaire, SVR, arbre de décision, XGBoost) afin de prédire l'IWQI et d'identifier les paramètres influents.

Les résultats révèlent une dégradation saisonnière marquée en été, caractérisée par une salinité élevée, en lien avec les concentrations de Cl^- et Na^+ . Le modèle XGBoost a présenté les meilleures performances prédictives ($R^2 = 0,9222$), confirmant l'influence majeure des ions Na^+ , Cl^- , HCO_3^- et de la conductivité électrique. Le lac Fetzara se révèle être un système ambivalent, jouant partiellement un rôle épurateur tout en étant affecté par des pollutions croissantes.

Cette étude met en lumière la nécessité d'une gestion intégrée et durable, visant à préserver les fonctions écologiques du lac et à assurer la qualité des ressources en eau, dans un contexte de stress environnemental accentué. Elle souligne également l'importance d'outils de modélisation avancée pour la surveillance et la prise de décision.

Mots-clés : Zones humides, Lac Fetzara, Qualité des eaux souterraines, IWQI, Machine Learning.

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à ALLAH, le tout puissant, qui m'a accordé la force, la volonté et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail de recherche.

Comme le dit si bien un proverbe : « Celui qui ne remercie pas les gens ne remercie pas Allah. » Il m'est donc particulièrement cher de témoigner ici ma reconnaissance à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de cette thèse.

Je souhaite adresser mes plus sincères remerciements à Monsieur Hamza Bouguerra et à Monsieur Salah Eddine Tachi pour la qualité de leur encadrement tout au long de ce travail de recherche. Grâce à vos conseils précieux, à votre patience et à la confiance que vous avez placée en moi, j'ai pu faire progresser mes réflexions et structurer mon travail. Je vous exprime toute ma gratitude et mon profond respect.

Je tiens également à exprimer ma profonde reconnaissance à Madame le Professeur Benmamar Saïda, directrice du Laboratoire des Sciences de l'Eau, pour la qualité de son encadrement scientifique, sa bienveillance constante. Son dévouement envers les étudiants, son souci de leur bien-être, ainsi que la passion qu'elle témoigne pour son métier, sont une véritable source d'inspiration et de respect.

Mes remerciements vont également à tous les membres du jury, pour avoir accepté d'en faire partie de ce comité, pour le temps qu'ils ont consacré à l'évaluation de ce travail, ainsi que pour l'intérêt qu'ils ont porté à cette thèse.

J'adresse aussi mes sincères remerciements à l'ensemble des enseignants, chercheurs et personnels administratifs du département d'Hydraulique de l'ENP d'Alger, pour leur accompagnement et leur disponibilité.

Je termine ces remerciements en exprimant toute ma gratitude à mes chers parents, à mon époux, à mes sœurs ainsi qu'à ma meilleure amie, pour leur soutien inestimable, leurs encouragements constants et leur présence réconfortante tout au long de mon parcours. Ils ont été pour moi une source inépuisable de force, de courage et de motivation.

Dédicaces

‡ À ma très chère mère ‡

Lumière de mes jours, force silencieuse de mes nuits, source inépuisable d'amour, de patience et de sacrifices... C'est à toi que je dédie ce travail, modeste aboutissement de tant d'années d'efforts. Tu as su en accompagner chaque étape, par tes prières, ta tendresse, ton écoute et ta présence rassurante. J'espère que cette réussite saura illuminer ton cœur autant que tu as illuminé ma vie ♥♥♥

‡ À mon père, mon exemple éternel ‡

À toi Papa chéri, mon refuge, source de bonheur, de force et de confiance...

Merci pour ton amour discret mais inestimable, ta générosité inépuisable, ton regard bienveillant et tes conseils empreints de sagesse. Ce travail est le fruit d'années de sacrifices silencieux, d'encouragements constants, de sollicitudes et de prières dont tu as été le fidèle gardien. En ce jour, j'espère accomplir l'un de tes rêves à travers cette réussite, et ainsi te rendre fier de moi ♥♥♥

‡ À mon époux, mon pilier silencieux ‡

À toi, mon compagnon de vie, mon allié fidèle dans l'ombre comme dans la lumière...

Tu as été ma force tranquille, celui qui m'a portée avec patience, tendresse et confiance, même dans les moments les plus exigeants de ce parcours. Merci pour ta compréhension, ton encouragement discret, et ta présence rassurante à chaque étape. Ta foi en moi m'a portée bien plus que tu ne l'imagines. Ce travail est aussi le tien, car tu en as partagé chaque sacrifice ♥♥♥

À mes chères sœurs **Asma, Khaoula et Nafissa** ♥♥♥

Merci pour vos mots qui ont su réchauffer mes silences, pour vos éclats de rire qui ont adouci les journées les plus lourdes, et pour votre présence, aussi naturelle qu'essentielle, dans chaque battement de mon parcours. Chacune de vous, par sa douceur, sa force ou son écoute, a été un pilier d'amour, un souffle d'énergie et une ancre de réconfort. Je vous dédie ces lignes, avec une affection infinie et une reconnaissance que les mots seuls ne sauraient contenir ❖❖❖

À ma meilleure amie, ma sœur de cœur **Manel** ♥

Merci pour ton écoute, ta présence constante et ton affection sincère. Tu as su trouver les mots justes quand il le fallait, et ton soutien a illuminé les jours les plus sombres. Ton amitié est un bien précieux, rare et sincère l'un des plus beaux cadeaux que la vie m'ait offerts ❖

À ma tante **Samia**, cette seconde mère au cœur infiniment généreux ♥

À toi qui as toujours veillé sur moi avec affection et générosité, merci pour ta douceur rassurante, pour ta présence constante, et pour l'amour discret mais profond que tu m'as toujours témoigné. Cette réussite est aussi la tienne : elle résonne comme le reflet de tout ce que tu m'as transmis, sans jamais rien attendre en retour, avec un amour pur et inconditionnel ❖

Et enfin, à mon neveu **Ishak** ♥

Petit rayon de soleil, source d'innocence et de bonheur dans ma vie.

Ta joie de vivre et ton sourire ont souvent allégé mes fatigues.

Que cette réussite soit, un jour, une inspiration pour toi...❖

♥ *Noussaïba* ♥

Table des Matières

Liste des Figures
Liste des Tableaux
Liste des abréviations

Introduction Générale	16
------------------------------	----

Chapitre 1. Revue bibliographique sur les zones humides et leur rôle écologique	
----------------------------------------------------------------------------------------	--

1.1. Introduction	20
1.2. Définition et composition des zones humides	21
1.3. Les caractéristiques des zones humides	22
1.3.1. Caractéristiques hydrologiques	22
1.3.2. Caractéristiques biotiques	23
1.3.3. Origine	23
1.4. Les type des zones humides	23
1.4.1. Zones humides continentales	23
1.4.2. Zones humides marines et côtières	23
1.4.3. Zones humides de bas-fond en tête de bassin	23
1.4.4. Zones humides artificielles	23
1.5. Origine et classification des lacs	24
1.6. Les fonctions des zones humides	26
1.6.1. Fonctions biogéochimiques	26
1.6.2. Fonctions hydrologiques	26
1.6.3. Fonctions biologiques	27
1.6.4. Fonctions climatiques	27
1.6.5. Fonctions socio-économiques et attractivité	28
1.6.6. Autres avantages	28
1.7. Impact des zones humides dans la régulation de la qualité des eaux	29
1.8. Les zones humides algériennes	30
1.9. Problématiques liées aux zones humides et lacs en Algérie	36
1.9.1. Le drainage des zones humides	36
1.9.2. La pollution des lacs et zones humides	36
1.9.3. La surexploitation des ressources naturelles	37
1.9.4. Impacts agricoles	38
1.9.5. Problèmes liés à la pêche	38
1.9.6. Autres menaces diverses	38
1.10. Méthodes d'évaluation de la qualité des eaux	39
1.11. Travaux antérieurs et état de l'art	39
1.12. Conclusion	40

Chapitre 2. Présentation du site d'étude – Lac Fetzara

2.1. Introduction	42
2.2. Localisation géographique et situation administrative	43
2.3. Contexte géologique et géomorphologique	44
2.3.1. La géologie	44
2.3.2. La géomorphologie	46
2.4. Occupation du sol dans la région	47
2.5. Climat et données météorologiques	49
2.6. Hydrologie du lac Fetzara	51
2.6.1. Alimentation hydrologique du lac	51
2.6.2. Évacuation hydrologique du lac	51
2.6.3. Régime hydrologique	52
2.6.4. Dynamique hydrologique et son impact sur les fonctions écosystémiques et la biodiversité	54
2.7. Hydrogéologie du lac	54
2.7.1 Nappes superficielles	55
2.7.2 Nappes profondes	56
2.8. Biodiversité et patrimoine écologique du lac Fetzara	57
2.8.1. Biodiversité animale	57
2.8.2. Biodiversité végétale	57
2.8.3. Rôles écologiques et menaces	58
2.9. Caractéristiques physico-chimiques	59
2.9.1 Caractéristiques physico-chimiques des sols	59
2.9.2. Caractéristiques physico-chimiques des eaux	60
2.9.3. Facteurs influençant ces caractéristiques	61
2.10. Conclusion	61

Chapitre 3. Matériel et Méthodes

3.1. Introduction	63
3.2. Caractérisation des données hydrochimiques collectées autour du lac Fetzara	64
3.3. Paramètres analysés et leur influence majeurs sur la qualité de l'eau d'irrigation	65
3.4. Les Indices de Qualité des Eaux	68
3.4.1. Principe général des indices de qualité de l'eau	68
3.4.2. Étapes fondamentales de développement des WQI	68
3.4.3. Catégorisation des WQI en fonction de leur approche méthodologique	69
3.4.4. Justification du choix de l'indice IWQI	70
3.5. Indice de qualité des eaux d'irrigation IWQI	71
3.6. Application du Machine Learning pour la prédiction de la qualité de l'eau	74
3.6.1. Contexte et justification	74
3.6.2. Prétraitement des données	75
3.6.3. Approche méthodologique du Machine Learning	76

3.6.4. Méthodes de machine Learning adoptées	77
3.6.5. Critères d'évaluation du modèle	80
3.7. Conclusion	81

Chapitre 4. Résultats, analyse et discussion

4.1. Introduction	83
4.2. Caractérisation de la qualité des eaux souterraine du lac Fetzara	84
4.2.1. Analyse descriptive des données hydrochimiques	84
4.2.2. Interprétation des résultats analytiques	86
4.3. Interprétation des résultats selon les normes FAO	87
4.4. Évaluation de l'aptitude à l'irrigation par le diagramme de Richards	88
4.5. Évaluation de la qualité des eaux par l'indice IWQI	90
4.6. Prédiction de l'indice de qualité des eaux par Machine Learning	97
4.6.1. Description statistique des données	97
4.6.2. Corrélation entre les paramètres de qualité de l'eau et l'indice IWQI	99
4.6.3 Hyperparamètres des modèles d'intelligence artificielle utilisés	100
4.6.4. Évaluation comparative des performances des modèles	101
4.6.5. Combinaisons des variables d'entrée déterminants	106
4.7. Discussion des résultats et mise en perspective avec la littérature scientifique	108
4.8. Limites de l'étude et recommandations	109
4.9. Conclusion	110

Chapitre 5. Le lac Fetzara entre dégradation et conservation : enjeux, impacts et stratégies durables

5.1. Introduction	112
5.2. Enjeux environnementaux du lac Fetzara	113
5.2.1. Impacts du lac sur la qualité des eaux	113
5.2.2. Enjeux écologiques face aux pressions anthropiques	118
5.3. La Stratégie Nationale de Gestion Durable des Zones Humides en Algérie	121
5.3.1. Objectifs principaux	121
5.3.2. Contexte et portée	122
5.3.3. Axes stratégiques	122
5.3.4. Mise en œuvre et partenariats	123
5.4. Recommandations stratégiques pour la préservation du lac Fetzara	123
5.4.1. Renforcement de la surveillance hydrologique et de la qualité des eaux	124
5.4.2. Réduction des pressions anthropiques	124
5.4.3. Restauration écologique du lac et de son bassin versant	124
5.4.4. Amélioration de la gouvernance et du cadre institutionnel	125
5.4.5. Renforcement de la recherche scientifique et de l'innovation	125
5.4.6. Mobilisation des populations et sensibilisation environnementale	125
5.4.7. Mobilisation de financements et partenariats	125
5.5. Conclusion	127

Conclusion générale	130
Références bibliographiques	133

Liste des Tableaux

Tableau 1.1. Liste des zones humides algériennes classées Ramsar	31
Tableau 2.1. Les valeurs moyennes mensuelles des données météorologiques	50
Tableau 2.2. Principaux sous-bassins versants du lac Fetzara	53
Tableau 3.1. Classification de la qualité des eaux d'irrigation selon la conductivité électrique (CE)	67
Tableau 3.2. Valeur limite du paramètre de mesure de la qualité de l'eau (qi)	73
Tableau 3.3. Poids des paramètres de l'IWQI (wi) adoptés de Meireles	74
Tableau 4.1 Statistiques descriptives des paramètres des paramètres mesurés	84
Tableau 4.2 Données mensuelles de la CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) et du SAR des eaux souterraines utilisées pour le diagramme de Richards	89
Tableau 4.3 Classification de la qualité des eaux souterraines basée sur l'IWQI	91
Tableau 4.4 Répartition des classes de qualité des eaux de puits selon l'indice IWQI	93
Tableau 4.5 Description statistique des données	97
Tableau 4.6. Évaluation comparative des modèles de machine learning	104
Tableau 4.7. Classement des variables par ordre d'importance pour la modélisation de l'IWQI	106
Tableau 4.8. Évaluation comparative des combinaisons de paramètres pour la prédiction de l'IWQI	107
Tableau 5.1. Classification des sols en fonction de la conductivité électrique	115
Tableau 5.2. Récapitulatif des menaces et solutions pour le lac Fetzara	126

Liste des Figures

Figure 1.1. Typologie des zones humides	24
Figure 1.2 Les différents types de lacs selon leur origine	25
Figure 1.3. Les fonctions des zones humides	28
Figure 1.4. Zones humides algériennes d'importance internationale	31
Figure 1.5. Cirque de Aïn Ouarka	34
Figure 1.6. Lac El Mellah	35
Figure 1.7. La Vallée d'Ihérir	35
Figure 2.1. Situation géographique du lac Fetzara	44
Figure 2.2. Carte géologique de la région du lac Fetzara	45
Figure 2.3. Carte géomorphologique de la région du lac Fetzara	47
Figure 2.4. Carte de l'occupation du sol de la wilaya de Annaba	48
Figure 2.5. Diagramme ombrothermique de la région du lac Fetzara	50
Figure 2.6 : Réseau hydrographique du bassin versant du lac Fetzara	53
Figure 2.7. Les nappes superficielles de la plaine de Annaba	55
Figure 2.8. Système aquifère de la région de Fetzara	56
Figure 2.9. Biodiversité du lac Fetzara	58
Figure 3.1. Localisation des puits de prélèvement autour du lac Fetzara	65
Figure 3.2. Processus de calcul de l'indice de qualité des eaux WQI	71
Figure 3.3. Étapes du Machine Learning pour la Prédiction de l'indice de qualité de l'eau	77
Figure 3.4. Schéma comparatif des Algorithmes de Machine Learning utilisés	79
Figure 4.1. Classification des eaux souterraines du lac Fetzara selon le diagramme de Richards, USSL.	89
Figure 4.2. Classification de la qualité des eaux souterraines sur la base de l'IWQI	92
Figure 4.3. Variation de l'IWQI au cours des quatre mois pour chacun des puits	95
Figure 4.4. Répartition moyenne des concentrations ioniques dans les eaux souterraines	98
Figure 4.5. Matrice de corrélation des variables.	99
Figure 4.6. Graphique de dispersion IWQI réel vs IWQI prédit par Linear Regression	102
Figure 4.7. Graphique de dispersion IWQI réel vs IWQI prédit par Support Vector Regression	103
Figure 4.8. Graphique de dispersion IWQI réel vs IWQI prédit par Decision Tree	103
Figure 4.9. Graphique de dispersion IWQI réel vs IWQI prédit par XGBoost	104
Figure 4.10. Comparaison des performances en validation	105
Figure 5.1 Variation de la teneur en nitrates dans les eaux des puits	113
Figure 5.2. Carte piezométrique de la région du lac Fetzara	117
Figure 5.3. Zone humide entre pressions anthropiques et perspectives de conservation durable	127

Liste des abréviations

Indices de qualité de l'eau

IWQI	Irrigation Water Quality Index (Indice de qualité des eaux d'irrigation)
WQI / IQE	Water Quality Index (Indice de qualité de l'eau)

Paramètres physico-chimiques

EC / CE	Electrical Conductivity / Conductivité électrique
PH	Potentiel Hydrogène (acidité/alcalinité)
TDS	Total Dissolved Solids (Solides dissous totaux)
TH	Titre Hydrotimétrique (ou Dureté totale)

Ions

Ca ²⁺	Ion Calcium
Cl ⁻	Ion Chlorure
CO ₃ ²⁻	Ion Carbonate
HCO ₃ ⁻	Ion Bicarbonate
K ⁺	Ion Potassium
Mg ²⁺	Ion Magnésium
Na ⁺	Ion Sodium
NO ₃ ⁻	Ion Nitrate
SAR	Sodium Adsorption Ratio (Rapport d'adsorption du sodium)
SO ₄ ²⁻	Ion Sulfate

Indicateurs statistiques et de performance

MAE	Mean Absolute Error (Erreur absolue moyenne)
MSE	Mean Squared Error (Erreur quadratique moyenne)
NSE	Nash–Sutcliffe Efficiency (Efficacité de Nash–Sutcliffe)
R ²	Coefficient de détermination
RMSE	Root Mean Square Error (Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne)

Intelligence artificielle et Machine Learning

AI / IA	Artificial Intelligence / Intelligence artificielle
ANN	Artificial Neural Network (Réseau de neurones artificiels)
DT	Decision Tree (Arbre de décision)
LR	Linear Regression (Régression linéaire)
ML	Machine Learning (Apprentissage automatique)

PCA	Principal Component Analysis (Analyse en composantes principales)
SVM	Support Vector Machine
SVR	Support Vector Regression
XGBoost	Extreme Gradient Boosting

Systèmes d'information géographique

DEM / MNT	Digital Elevation Model / Modèle Numérique de Terrain
GIS / SIG	Geographic Information System / Système d'Information Géographique

Données climatiques

Evap (mm)	Évaporation (en millimètres)
HR (%)	Humidité Relative (en pourcentage)
P (mm)	Précipitations (en millimètres)
T (°C)	Température (en degrés Celsius)

Institutions nationales et internationales

Abréviation	Signification
ADE	Algérie Des Eaux
AEWA	Accord sur la conservation des oiseaux d'eau migrateurs d'Afrique-Eurasie
AJCI	Aménagement du Jalonnement et du Canal d'Irrigation (1985)
ANRH	Agence Nationale des Ressources Hydrauliques
CRSTRA	Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides
DGF	Direction Générale des Forêts (Algérie)
DSA	Direction des Services Agricoles
FAO	Food and Agriculture Organization
INRH	Institut National des Ressources Hydrauliques
ONEDD	Observatoire National de l'Environnement et du Développement Durable
PNUD	Programme des Nations Unies pour le Développement
Ramsar	Convention relative aux zones humides d'importance internationale
UNESCO	Organisation des Nations Unies pour l'Éducation, la Science et la Culture
USSL	United States Salinity Laboratory
WHO / OMS	World Health Organization / Organisation Mondiale de la Santé
WWF	World Wide Fund for Nature



INTRODUCTION GÉNÉRALE



Introduction Générale

Les zones humides comptent parmi les écosystèmes les plus productifs de la planète. Situées à l'interface entre les milieux aquatiques et terrestres, elles assurent des fonctions vitales : régulation du cycle de l'eau, la rétention des nutriments et la filtration des polluants, séquestration du carbone et protection contre les crues (Zedler et Kercher, 2023 ; Davidson et al., 2023). Cependant, malgré leur importance, les zones humides comptent aujourd'hui parmi les écosystèmes les plus menacés à l'échelle mondiale. Selon la convention de Ramsar, plus de 35 % des zones humides ont disparu depuis 1970, avec un rythme de dégradation supérieur à celui des forêts (Darrah et al., 2023). Cette régression est principalement liée aux pressions anthropiques (urbanisation, agriculture intensive, pollution) et aux effets du changement climatique (Mellouk, 2015), entraînant des pertes significatives de biodiversité et de services écosystémiques (Fetnaci et al., 2019).

En Algérie, le patrimoine est exceptionnel avec plus de 2 300 unités recensées, dont 50 sites Ramsar (Ministère de l'Environnement, 2022). Dans le nord-est algérien, "point chaud" de biodiversité, ces milieux sont toutefois soumis à un stress intense dû au climat semi-aride et aux pressions anthropiques croissantes. Ces conditions favorisent des processus de dégradation tels que la salinisation des sols et des eaux, ainsi que la contamination par les polluants (Vela et Benhouhou, 2009 ; Carabal et al., 2023).

Les zones humides sont reconnues pour leur capacité naturelle d'épuration, agissant comme des filtres biologiques et géochimiques capables de retenir, transformer ou éliminer divers polluants (Vymazal, 2020). Toutefois, plusieurs études ont montré que ce rôle peut s'inverser lorsque ces systèmes sont soumis à des charges polluantes excessives ou à des perturbations hydrologiques, devenant ainsi des sources potentielles de contamination (Zhou et al., 2022).

En milieu semi-aride, ces dynamiques sont encore plus complexes. Les phénomènes d'évaporation intense et d'assèchement saisonnier peuvent entraîner une concentration des sels et des contaminants dans les sols et les nappes souterraines (Boulakhssaïm et al., 2023).

Malgré les avancées récentes, une incertitude demeure sur la dynamique spatio-temporelle de l'impact des zones humides sur les eaux souterraines en milieu semi-aride. La plupart des études se limitent à des analyses physico-chimiques ponctuelles. Il existe un manque de recul sur l'utilisation d'outils numériques avancés, comme l'intelligence artificielle, pour prédire la qualité de l'eau spécifiquement dans ces écosystèmes complexes où les interactions nappe-lac sont non-linéaires et difficiles à modéliser par des méthodes statistiques classiques.

Le lac Fetzara constitue un cas d'étude particulièrement pertinent pour analyser ces enjeux. Classé site Ramsar depuis 2002, il représente un vaste écosystème humide caractérisé par une forte variabilité hydrologique et une richesse écologique notable. Toutefois, plusieurs travaux ont mis en évidence une minéralisation élevée de ses eaux, notamment dans les zones nord et sud-est, en lien avec l'évaporation estivale et le lessivage des sols (Zahi et al., 2013 ; Habes et al., 2012). Dans ce contexte, une question scientifique centrale se pose : le lac Fetzara agit-il comme un système épurateur améliorant la qualité des eaux souterraines, ou constitue-t-il au contraire une source de dégradation de ces ressources ?

L'objectif principal de cette thèse est de déterminer l'impact du lac Fetzara sur la qualité des eaux de son environnement, notamment les eaux souterraines. Autrement dit, nous voulons savoir dans quelle mesure ce grand complexe humide joue un rôle purificateur, ou au contraire s'il contribue à la dégradation de l'eau. Cette analyse est d'autant plus pertinente que Fetzara est une zone Ramsar, c'est-à-dire un site protégé pour sa valeur écologique. Comprendre son impact sur la ressource en eau est essentiel pour orienter sa gestion durable.

L'approche combine des analyses classiques et des modèles prédictifs avancés. D'une part, une analyse chimique conventionnelle a été menée à partir d'échantillons prélevés dans 37 puits répartis autour du lac, analysés pour des paramètres ioniques clés : sodium, calcium, magnésium, chlorures, sulfates, bicarbonates, conductivité électrique. Ces données seront utilisées pour calculer l'IWQI (Irrigation Water Quality Index) de Meireles et al. (2010), un indicateur synthétique allant de 0 à 100 qui classe la qualité de l'eau du point de vue de l'irrigation (Meireles et al., 2010). D'autre part, une approche basée sur l'intelligence artificielle (Machine Learning) a été appliquée pour modéliser et prédire l'indice IWQI à partir des mêmes paramètres. Quatre modèles d'apprentissage supervisé ont été testés : régression linéaire, SVR (Support Vector Regression), arbre de décision et XGBoost (extreme gradient boosting). Des études récentes ont montré qu'un large éventail de modèles (régression linéaire, SVM, arbres, réseaux de neurones, etc.) peut fournir des prédictions fiables de la qualité de l'eau (WQI) dans divers contextes (Alizadeh et al., 2018 ; Haghbi et al., 2018 ; Ahmed et al., 2019 ; Trabelsi et al., 2022 ; Bouhali et al., 2022 ; Sidek et al., 2024 ; Dabire et al., 2024). Nous calibrerons chaque modèle sur une partie des données, validerons sur les données restantes, puis comparerons leurs performances (erreur quadratique moyenne, coefficient de détermination, etc.). L'objectif est d'identifier quelles variables expliquent le mieux la qualité de l'eau et quel modèle offre la meilleure précision. Cette combinaison entre méthodes classiques et approches innovantes permet de renforcer la robustesse des résultats et d'offrir une lecture approfondie du rôle écologique du lac dans la dynamique des eaux souterraines.

Ce travail de recherche est structuré en cinq chapitres :

- **Chapitre 1** : Une revue bibliographique détaillée des zones humides, de leurs définitions, de leurs fonctions écologiques et de leur rôle dans l'épuration des eaux, avec un focus sur le contexte algérien.
- **Chapitre 2** : La présentation complète du site d'étude, lac Fetzara incluant les aspects géographiques, géologiques, climatiques, hydrologiques, et écologiques, pour offrir un cadre de référence analytique solide.
- **Chapitre 3** : L'exposé de la méthodologie adoptée, incluant les techniques d'échantillonnage, les analyses hydro-chimiques, le calcul de l'IWQI, et la modélisation par Machine Learning.
- **Chapitre 4** : La présentation et l'interprétation des résultats obtenus, ainsi qu'une discussion croisée entre les analyses classiques et les prédictions par IA.
- **Chapitre 5** : Une réflexion sur les enjeux de conservation du lac Fetzara, les menaces actuelles, les stratégies durables à envisager, et les recommandations de gestion à l'échelle locale et nationale.

Cette recherche apportera une contribution significative à la compréhension du rôle des zones humides en milieu semi-aride, à travers le cas emblématique du lac Fetzara. En combinant approches hydrochimique et numérique, l'étude permettra non seulement d'évaluer précisément l'impact de ce site Ramsar sur la qualité des eaux souterraines, mais aussi de développer des outils prédictifs innovants pour sa gestion. Les résultats obtenus alimenteront ainsi la réflexion scientifique sur les mécanismes épurateurs des écosystèmes humides tout en fournissant aux décideurs des leviers d'action concrets.

CHAPITRE 1 : REVUE
BIBLIOGRAPHIQUE SUR
LES ZONES HUMIDES ET
LEUR ROLE ECOLOGIQUE

1.1. Introduction

Les zones humides sont parmi les écosystèmes les plus dynamiques et les plus riches de la planète. À l'interface entre les milieux terrestres et aquatiques, elles remplissent des fonctions écologiques essentielles tout en fournissant de nombreux services écosystémiques. Leur définition, bien que sujette à plusieurs interprétations selon les contextes géographiques et institutionnels, converge autour d'un critère central : la présence permanente ou temporaire d'eau, qui influence la composition du sol, la végétation, ainsi que l'ensemble des interactions biologiques. Cette disponibilité en eau est régie par un équilibre délicat entre les apports (précipitations, nappes souterraines, ruissellement) et les pertes (évaporation, infiltration), ce qui confère à ces milieux un caractère hydrologique particulier (Bendahmane, 2015). Les zones humides se distinguent également par leur grande hétérogénéité morphologique, ce qui justifie leur classification en différents types selon la typologie internationale : marais, tourbières, mangroves, lacs, lagunes, etc. Cette diversité est en partie liée à leur origine (tectonique, glaciaire, volcanique, fluviale...), notamment en ce qui concerne les lacs, qui font partie intégrante de nombreux systèmes humides. La classification des lacs selon leur genèse, leur morphologie ou leur dynamique hydrique permet une meilleure compréhension de leurs rôles dans le cycle de l'eau et dans le fonctionnement global des bassins versants (Mitsch & Gosselink, 2015).

Outre leur richesse biologique exceptionnelle, les zones humides jouent un rôle déterminant dans la régulation du climat, le contrôle des crues, la recharge des nappes phréatiques, et surtout dans l'amélioration de la qualité de l'eau. Elles agissent comme des filtres naturels, retenant les sédiments, les nutriments en excès, ainsi que de nombreux polluants organiques et inorganiques. Ce rôle épurateur est principalement assuré par les processus physico-chimiques et biologiques impliquant les plantes aquatiques et les communautés microbiennes (Bendahmane, 2015 ; Barbier et al., 1997).

En Algérie, les zones humides couvrent une grande diversité de milieux allant des marais côtiers aux sebkhas sahariennes, en passant par les chotts et les lacs d'eau douce. Malgré leur importance écologique et socio-économique, ces milieux sont confrontés à de nombreuses menaces : urbanisation croissante, intensification agricole, pollution des eaux, et changement climatique.

Le lac Fetzara, situé dans le nord-est algérien, illustre à lui seul la complexité des enjeux liés à la gestion durable des zones humides. Sa dégradation progressive met en lumière la nécessité de soutenir les connaissances scientifiques sur ces écosystèmes et d'amplifier des stratégies de conservation adaptées aux contextes locaux.

Ce chapitre vise ainsi à fournir une synthèse approfondie des connaissances relatives aux zones humides : leurs définitions, leurs caractéristiques, leurs typologies, leur origine, leurs fonctions écologiques, et leur situation spécifique en Algérie, afin de mieux appréhender les problématiques actuelles et futures de leur préservation.

1.2. Définition et composition des zones humides

Les zones humides constituent des écosystèmes de transition situés entre les environnements terrestres et aquatiques. Elles se distinguent par la présence d'eaux douces, saumâtres ou salées, qui peuvent être permanentes ou temporaires, en surface ou légèrement infiltrées dans le sol, influençant fortement les caractéristiques biologiques, physiques et chimiques du milieu. Ces conditions hydriques favorisent le développement de sols hydro morphes, d'une végétation hygrophile adaptée à l'humidité, ainsi que d'une biodiversité spécifique composée d'espèces animales et végétales étroitement liées à ces écosystèmes (Barnaud, 1991). Cette approche est complétée par la législation sur l'eau qui précise qu'une zone humide est un espace fréquemment saturé ou recouvert d'eau où la végétation, lorsqu'elle existe, est adaptée à ces conditions hydriques particulières (Art. L211-1 du Code de l'Environnement).

La Convention de Ramsar, adoptée en 1971 en Iran, est un traité international visant à préserver les fonctions écologiques essentielles des zones humides, ainsi qu'à promouvoir leur utilisation rationnelle et durable, de même que celle de leurs ressources. Les sites inscrits sur sa liste officielle, bénéficient d'une protection spécifique, avec plus de 2 400 zones classées à ce jour dans le monde. En raison de leur grande diversité, leur définition varie selon les contextes scientifiques, politiques ou juridiques, selon la convention de Ramsar, les zones humides sont « des étendues de marais, de fagnes, de tourbières ou d'eaux artificielles ou naturelles, temporaires ou permanentes, dont l'eau est courante ou

stagnante, douce, salée ou saumâtre y compris des étendues d'eau marine dont la profondeur à marée basse n'excède pas six mètres ».

Dans le contexte algérien, la loi n°11-02 du 17 février 2011 relative aux aires protégées dans le cadre du développement durable reconnaît les zones humides comme des écosystèmes d'intérêt écologique majeur nécessitant des mesures de protection et de gestion durable. Selon cette approche, une zone humide ne se limite pas uniquement au plan d'eau, mais comprend également un ensemble d'unités écologiques complémentaires : une zone centrale correspondant au milieu aquatique principal et aux habitats sensibles, une zone tampon destinée à réduire les impacts anthropiques, ainsi qu'une zone de transition permettant la conciliation entre les activités humaines et la conservation des ressources naturelles (JORA, 2011).

1.3. Les caractéristiques des zones humides

Les caractéristiques des zones humides dépendent de facteurs tels que le climat, la localisation géographique et le contexte géomorphologique. Toutefois, ce sont principalement les conditions hydrologiques qui régissent leur fonctionnement écologique. Ce qui permet de les différencier à la fois des zones terrestres bien drainées et des milieux aquatiques profonds. (Fustec et Lefeuvre, 2000).

Selon Saifouni (2009), les zones humides se caractérisent par les éléments suivants :

1.3.1. Caractéristiques hydrologiques

- Salinité de l'eau : douce (lacs, étangs, rivières, fleuves...), saumâtre ou salée (estuaires, lagunes littorales...)
- Niveau d'eau : élevé, faible ou variable
- Durée de submersion : permanente ou temporaire
- Dynamique hydrique : eaux dormantes (étangs, lacs, lagunes...) ou courantes (fleuves, rivières, ruisseaux...)

1.3.2. Caractéristiques biotiques

- Végétation : présence ou absence de plantes hygrophiles
- Peuplement : Organismes végétaux adaptés aux substrats humides ou submergés

1.3.3. Origine

- Naturelle : lacs, plaines inondables, marais...
- Artificielle : rizières, retenues de barrages, étangs d'épuration...

1.4. Les type des zones humides

Selon Yoann et al. (2006), les types de zones humides se répartissent en quatre grandes catégories principales :

- 1.4.1. Zones humides continentales : Ce type regroupe des milieux humides d'eau douce tels que les tourbières, étangs, marais d'intérieur, souvent difficiles à identifier à cause de leur abondance et leur imbrication.
- 1.4.2. Zones humides marines et côtières : Ces zones sont soumises aux grandes marées, situées dans la partie haute des estuaires et des baies, caractérisées par une végétation dense adaptée à la salinité et aux immersions périodiques.
- 1.4.3. Zones humides de bas-fond en tête de bassin : Ces milieux comprennent des forêts riveraines, petites prairies humides et marécages, souvent bordés de petits cours d'eau, contribuant de manière essentielle à l'épuration des eaux et la régulation hydrologique dans les bassins versants agricoles.
- 1.4.4. Zones humides artificielles : Ce sont des zones créées ou modifiées par l'homme, comme les retenues d'eau, lacs artificiels, gravières réhabilitées ou autres aménagements hydrauliques destinés à la gestion de l'eau.

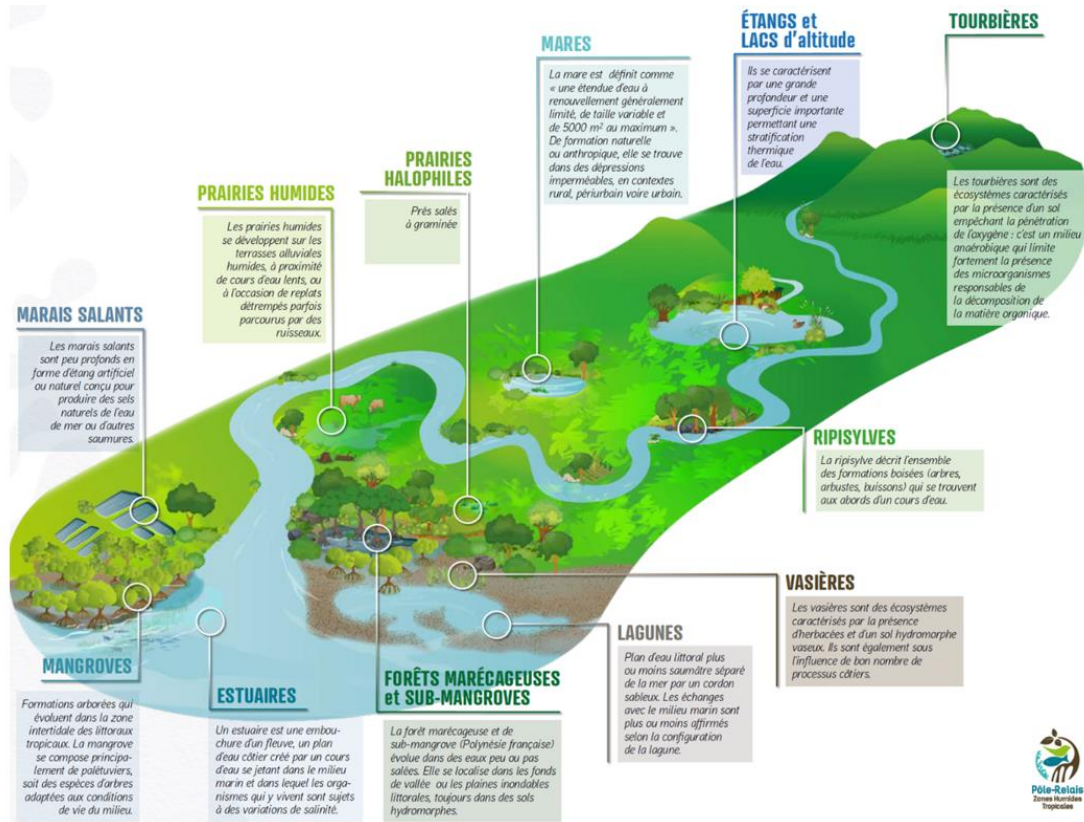


Figure 1.1. Typologie des zones humides (Pôle-Relais Zones Humides Tropicales, s.d.)

1.5. Origine et classification des lacs

Les lacs désignent des réserves d'eau continentales, généralement fermées, qui se forment dans des creux naturels du relief terrestre, de manière générale un lac se forme lorsque les eaux issues du ruissellement, des cours d'eau ou de la fonte des neiges rencontrent un obstacle naturel (relief, barrage naturel, accumulation de sédiments) ou une contre-pente qui les empêche de poursuivre leur écoulement. Leur formation résulte de divers processus géologiques et climatiques, permettant une classification selon leur origine (Hutchinson, G.E. 1957). Parmi les principaux types de lacs on distingue (Wetzel, 2001) :

- Lacs **tectoniques** : issus de mouvements de la croûte terrestre (affaissements, soulèvements), formant des bassins profonds. Exemple : le lac Baïkal (Russie).
- Lacs **volcaniques** : créés par l'effondrement d'une caldeira ou le remplissage d'un cratère. Exemple : le lac Pavin (France).

- Lacs **glaciaires** : formés par l'action érosive ou obstructive des glaciers, fréquents dans les zones de montagne. Exemple : les lacs alpins.
- Lacs **fluviaux** : formés par l'action des rivières (bras morts, méandres abandonnés).
- Lacs **karstiques** : issus de la dissolution des roches calcaires dans les régions karstiques.
- Lacs **côtiers** : Formés par isolement d'une lagune ou d'une baie marine par des flèches littorales. (Eau saumâtre ; ex. lagunes littorales)
- Lacs **éoliens** : dépressions comblées par les eaux dans des zones où le vent a érodé les sols.
- Lacs **artificiels** : créés par l'activité humaine, principalement pour l'irrigation, la production d'énergie ou l'alimentation en eau (ex. barrages réservoirs).



Figure 1.2 Les différents types de lacs selon leur origine (ProjetÉcolo, 2022)

1.6. Les fonctions des zones humides

Les zones humides, des milieux à l'interface entre terre et eau, jouent un rôle essentiel pour l'environnement et les sociétés humaines. Leurs fonctions, à la fois biogéochimiques, hydrologiques, biologiques et climatiques importantes, économiques et sociales, en font des milieux indispensables. Voici leurs principales fonctions :

1.6.1. Fonctions biogéochimiques :

Barnaud (2009) met en évidence dans ses travaux que les zones humides assurent une fonction épuratrice essentielle en agissant comme des filtres naturels capables de piéger, transformer et dégrader les polluants (nitrates, phosphates, métaux lourds). Cette capacité repose sur des processus biogéochimiques tels que la dénitrification (réduction des nitrates en azote gazeux par les bactéries en conditions anaérobies), l'absorption par la végétation (phyto-épuration) et la rétention des sédiments.

Viallard (2012) renforce cette idée en montrant que ces milieux agissent comme de véritables filtres écologiques, capables de traiter efficacement les eaux chargées en nutriments et matières organiques, réduisant ainsi la pollution avant son rejet dans les cours d'eau. Toutefois, les deux auteurs soulignent que cette fonction dépend étroitement des caractéristiques écologiques de la zone humide (biodiversité, hydrologie) et peut être altérée par les activités humaines (drainage, urbanisation).

1.6.2. Fonctions hydrologiques

Les travaux de Brenda (2008) et Stéphane (2009) soulignent que les zones humides jouent un rôle essentiel dans la régulation du cycle hydrologique, agissant comme des "éponges naturelles" capables d'absorber les excès d'eau en période de crue et de les restituer progressivement en saison sèche, limitant ainsi les risques d'inondation et rechargeant les nappes phréatiques.

Dans le contexte algérien, Bouzegag (2015) souligne que les zones humides participent à la recharge des nappes phréatiques et à l'atténuation des extrêmes hydrologiques, notamment dans les régions semi-arides et la réduction de l'érosion grâce au ralentissement des écoulements.

Ces auteurs mettent également en garde contre la dégradation de ces fonctions par les activités humaines, soulignant l'urgence de préserver ces milieux pour leurs services hydrologiques irremplaçables.

1.6.3. Fonctions biologiques

Les zones humides jouent un rôle biologique essentiel en tant que réservoirs de biodiversité et habitats pour de nombreuses espèces. Fustec et Lefeuvre (2000) soulignent que ces milieux, grâce à leur richesse en eau et en nutriments, abritent une diversité biologique exceptionnelle, incluant des espèces végétales et animales spécifiques. Annani (2013), dans son étude sur les zones humides du Constantinois, met en évidence la présence de 35 espèces d'hémiptères aquatiques, illustrant la richesse faunistique de ces écosystèmes. Ochoa-Salazar (2008) souligne également l'importance des zones humides comme habitats pour les oiseaux migrateurs, offrant des sites de reproduction, d'alimentation et de repos essentiels. Ensemble, ces travaux illustrent comment les zones humides, par leur richesse biologique, soutiennent des fonctions écologiques indispensables à l'équilibre des écosystèmes.

1.6.4. Fonctions climatiques

Les zones humides constituent des écosystèmes clés dans la régulation climatique à différentes échelles. Leur rôle le plus marquant concerne la séquestration du carbone : selon Mitsch & Gosselink (2007, 2015), elles comptent parmi les systèmes les plus efficaces pour le stockage du carbone organique, notamment les tourbières qui, bien que ne couvrant que 3% de la surface terrestre, retiennent près de 30% du carbone des sols mondiaux

À l'échelle locale, elles modèrent les températures et augmentent l'humidité atmosphérique par évapotranspiration (Fustec & Lefeuvre, 2000 ; Erwin, 2009), atténuant ainsi les effets des vagues de chaleur, notamment en milieu urbain. Leur fonction tampon face aux extrêmes climatiques (inondations, sécheresses) en fait également des éléments cruciaux pour l'adaptation aux changements globaux (Barnaud, 2009 ; Davidson et al., 2018)

1.6.5. Fonctions socio-économiques et attractivité

Les zones humides représentent des actifs économiques majeurs, comme l'établit Bahi (2012). Elles génèrent des revenus par la pêche, l'agriculture adaptée (riziculture) et l'exploitation durable de ressources végétales. Leurs services écosystémiques - épuration d'eau et contrôle des crues - réduisent considérablement les coûts d'infrastructures. Sur le plan culturel, ces écosystèmes incarnent un patrimoine vivant, abritant savoir-faire traditionnels et pratiques artisanales uniques. Leur potentiel touristique s'exprime à travers l'écotourisme, l'observation ornithologique et des activités pédagogiques. Cette multifonctionnalité en fait des espaces irremplaçables, dont la conservation répond à la fois à des enjeux écologiques et socio-économiques

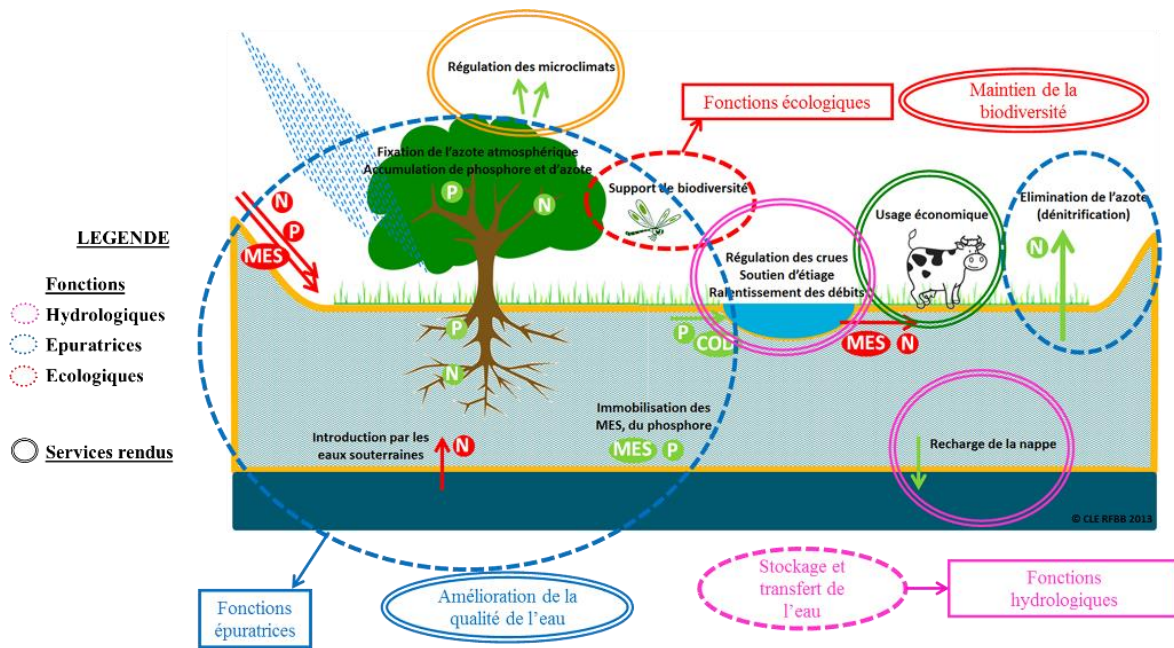


Figure 1.3. Les fonctions des zones humides (SAGE Rance Frémur, 2013)

1.6.6. Autres avantages

Les zones humides jouent un rôle essentiel dans la conservation des équilibres écologiques tout en apportant des bénéfices économiques significatifs. Elles contribuent à l'approvisionnement en eau en termes de quantité et de qualité, soutiennent les pêcheries dont plus des deux tiers de la production mondiale dépendent directement de zones humides

en bon état et favorisent l'agriculture, notamment par la recharge des nappes phréatiques et la rétention des éléments nutritifs dans les terres inondables (Ramsar, 2016).

Ces milieux fournissent également une grande variété de ressources : le bois de construction, des matériaux naturels, des sources d'énergie comme la tourbe, ainsi que des plantes médicinales et autres produits utiles issus de la biodiversité locale. Par ailleurs, certaines zones humides servent d'axes de transport, en particulier dans les régions où les voies d'eau jouent un rôle logistique majeur. Outre leur valeur utilitaire, les zones humides possèdent un attrait esthétique et écologique qui en fait des lieux prisés pour le tourisme et les loisirs. Leur richesse biologique et la beauté de leurs paysages attirent de nombreux visiteurs, notamment dans les parcs nationaux ou les sites classés au patrimoine mondial. Dans certains pays, les revenus issus de ces activités représentent une part significative de l'économie nationale (Groot, 2006 ; MEA, 2005).

1.7. Impact des zones humides dans la régulation de la qualité des eaux

L'influence des zones humides sur la qualité des ressources en eau constitue un enjeu scientifique majeur, en particulier dans les régions semi-arides où ces écosystèmes jouent un rôle déterminant dans la régulation hydrologique et biogéochimique des systèmes aquatiques. De nombreuses études ont démontré leur fonction épuratrice naturelle, basée sur la rétention des sédiments, la filtration des polluants et la réduction des concentrations en nutriments à travers des processus tels que la dénitrification et l'assimilation biologique (Mitsch & Gosselink, 2015 ; Kadlec & Wallace, 2009).

Cependant, cette fonction ne peut être considérée comme systématique. En effet, dans les contextes de pollution diffuse d'origine agricole, les zones humides peuvent agir comme des interfaces complexes entre les sols cultivés et les eaux superficielles, influençant la qualité des eaux souterraines de manière variable. Leur efficacité dépend fortement de leur état écologique, de leur connectivité hydrologique et de la pression anthropique exercée sur leur bassin versant, ce qui met en évidence la complexité de leur rôle environnemental (Bidois et al., 2018).

1.8. Les zones humides algériennes

Les zones humides algériennes constituent un patrimoine écologique d'une richesse exceptionnelle. Selon la Direction Générale des Forêts (DGF), l'Algérie compte 1 451 zones humides réparties entre 762 sites naturels (marais, lagunes, chotts, sebkhas, oasis, gueltas) et 689 d'origine artificielle, dont 50 sont classées sites Ramsar d'importance internationale, couvrant ensemble plus de 3 millions d'hectares, soit 50% des zones humides algériennes. Ces écosystèmes jouent un rôle écologique et socio-économique majeur, comme le confirment les travaux de Derradji et al. (2013), Zedam (2015) et Saifouni (2020).

Ils abritent une biodiversité remarquable, incluant plus de 300 espèces d'oiseaux migrateurs ainsi 30 espèces de poissons d'eau douce et 784 espèces végétales aquatiques, et fournissent des services écosystémiques essentiels tels que la recharge des nappes, la purification de l'eau et le stockage du carbone, contribuant ainsi à la lutte contre les changements climatiques. Par ailleurs, ces milieux soutiennent des activités économiques traditionnelles comme l'agriculture, la pêche, l'élevage et favorisent un tourisme écologique en plein essor (DGF, 2015 ; Convention Ramsar, 2013).

Toutefois, elles sont menacées par les pompages excessifs, la pollution, l'urbanisation anarchique et la construction de barrages, entraînant la disparition de plantes rares et la dégradation de leurs fonctions écologiques (Boumezbeur, 2002 ; WWF & DGF, 2017). Face à ces défis, l'Algérie s'oriente vers une gestion durable de ces milieux, à travers une stratégie nationale de protection, incluant la sensibilisation des usagers et la reconnaissance de leur valeur écologique, économique et culturelle (DGF, 2004).

En 2011, les sites Ramsar en Algérie sont au nombre de 50 et couvrent une superficie totale de 2 991 013 hectares.

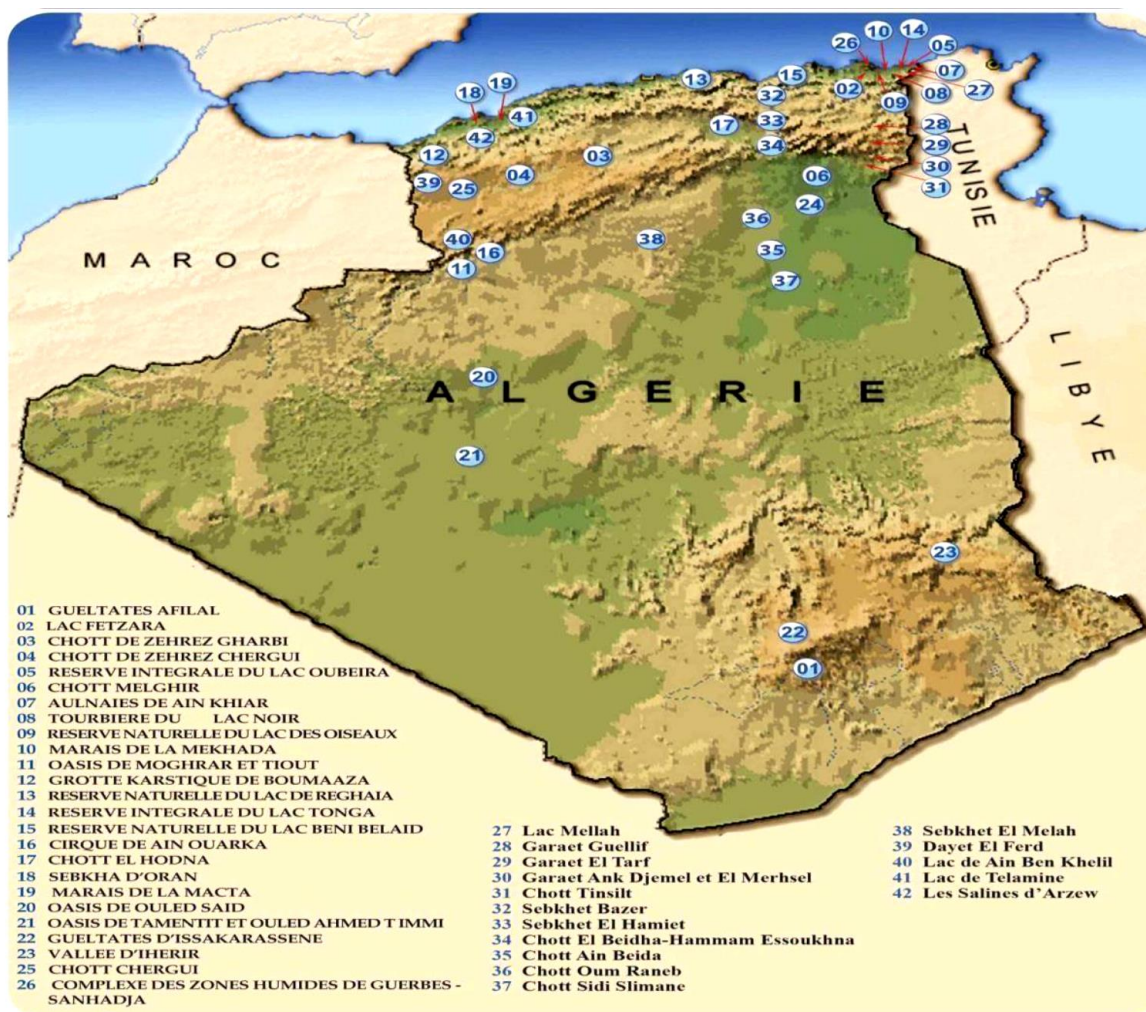


Figure 1.4. Zones humides algériennes d'importance internationale (DGF, 2002)

Tableau 1.1 : Liste des zones humides algériennes (Ramsar, 2024)

Nom du site	Date de classement	Wilaya	Superficie (ha)	Coordonnées
Réserve Intégrale du Lac Oubeïra	novembre 1983	El Tarf	3 160	33° 17' 10" N, 3° 44' 44" E
Réserve Intégrale du Lac Tonga	4 novembre 1983	El Tarf	2 700	36° 53' N, 8° 31' E
La Réserve Naturelle du Lac des Oiseaux	22 mars 1999	El Tarf	120	36° 42' N, 8° 07' E
Chott Ech Chergui	2 février 2001	Saïda	855 500	34° 27' N, 0° 50' E

Chapitre 1 : Revue bibliographique sur les zones humides et leur rôle écologique

Chott el Hodna	2 février 2001	M'Sila, Batna	362 000	35° 18' N, 4° 40' E
Chott Merrouane et Oued Khrouf	2 février 2001	El Oued	337 700	33° 55' N, 6° 10' E
Sebkha d'Oran	2 février 2001	Oran	56 870	35° 31' N, 0° 50' O
Complexe de zones humides de la plaine de Guerbes-Sanhadja	2 février 2001	Skikda, Annaba	42 100	36° 53' N, 7° 16' E
La Vallée d'Iherir	2 février 2001	Illizi	6 500	25° 24' N, 8° 25' E
Les Gueltates d'Issakarassene	2 février 2001	Tamanrasset	35 100	22° 25' N, 5° 45' E
Marais de la Macta	2 février 2001	Mascara, Mostaganem, Oran	44 500	35° 41' N, 0° 10' E
Oasis de Ouled Saïd	2 février 2001	Adrar	25 400	29° 24' N, 0° 18' E
Oasis de Tamantit et Sid Ahmed Timmi	2 février 2001	Adrar	95 700	27° 45' N, 0° 15' E
Aulnaie de Aïn Khiar	2 février 2001	El Tarf	180	36° 40' N, 8° 20' E
Chott de Zehrez Chergui	4 juin 2003	Djelfa	50 985	35° 15' N, 3° 30' E
Chott de Zehrez Gharbi	4 juin 2003	Djelfa	52 200	34° 58' N, 2° 44' E
Chott Melghir	4 juin 2003	El Oued, Biskra, Khenchela	551 500	34° 15' N, 6° 19' E
Grotte karstique de Ghar Boumâaza	4 juin 2003	Tlemcen	20 000	34° 42' N, 1° 18' E
Gueltates Afilal	4 juin 2003	Tamanrasset	20 900	23° 09' N, 5° 46' E
Lac de Fetzara	4 juin 2003	Annaba	20 680	36° 47' N, 7° 32' E
Le Cirque de Aïn Ouarka	4 juin 2003	Naâma	2 350	32° 44' N, 0° 10' E

Chapitre 1 : Revue bibliographique sur les zones humides et leur rôle écologique

Marais de la Mekhada	4 juin 2003	Naâma	8 900	36° 48' N, 8° 00' E
Marais de la Mekhada	4 juin 2003	El Tarf	8 900	36° 48' N, 8° 00' E
Oasis de Moghrrar et Tiout	4 juin 2003	Naâma	195 500	32° 53' N, 0° 40' E
Réserve Naturelle du Lac de Béni-Bélaïd	4 juin 2003	Jijel	600	36° 53' N, 6° 05' E
Lac de Réghaïa	4 juin 2003	Alger	842	36° 46' N, 3° 20' E
Tourbière du Lac Noir	4 juin 2003	El Tarf	5	36° 54' N, 8° 12' E
Chott Aïn El Beïda	12 décembre 2004	Ouargla	6 853	31° 48' N, 5° 22' E
Chott El Beïdha Hammam Essoukhna	12 décembre 2004	Sétif, Batna	12 223	35° 55' N, 5° 45' E
Chott Oum El Raneb	12 décembre 2004	Ouargla	7 155	32° 02' N, 5° 22' E
Chott Sidi Slimane	12 décembre 2004	Ouargla	616	33° 17' 15" N, 6° 05' 04" E
Chott Tinsilt	12 décembre 2004	Oum El Bouaghi	2 154	35° 53' N, 6° 29' E
Dayet El Ferd	12 décembre 2004	Tlemcen	3 323	34° 28' N, 1° 15' E
Garaet Annk Djemel et El Merhsel	12 décembre 2004	Oum El Bouaghi	18 140	35° 47' N, 6° 51' E
Garaet El Taref	12 décembre 2004	Oum El Bouaghi	33 460	35° 41' N, 7° 08' E
Garaet Guellif	12 décembre 2004	Oum El Bouaghi	24 000	35° 47' N, 6° 59' E
Lac de Télamine	12 décembre 2004	Oran	2 399	35° 43' N, 0° 23' E
Réserve Intégrale du Lac El Mellah	12 décembre 2004	El Tarf	2 257	36° 53' N, 8° 20' E
Les Salines d'Arzew	12 décembre 2004	Oran, Mascara	5 778	35° 41' N, 0° 18' O
Oglat Ed Daïra	12 décembre 2004	Naâma	23 430	33° 18' 15" N, 0° 48' 15" O

Sebkhet Bazer	12 décembre 2004	Sétif	4 379	36° 05' N, 5° 41' E
Sebkhet El Hamiet	12 décembre 2004	Sétif	2 509	35° 55' N, 5° 33' E
Garaet Timerganine	18 décembre 2009	Oum El Bouaghi	1 460	35° 40' N, 6° 58' E
Marais de Bourdim	18 décembre 2009	El Tarf	11	36° 48' N, 8° 15' E
Site classé Sebkhet Ezzmoul	18 décembre 2009	Oum El Bouaghi	6 765	35° 05' N, 6° 30' E
Site Ramsar du Lac Boulhilet	18 décembre 2009	Oum El Bouaghi	856	35° 45' N, 6° 48' E
Vallée de l'oued Soummam	18 décembre 2009	Béjaïa	12 453	35° 45' N, 6° 48' E
Oum Lâagareb	5 juin 2011	El Tarf	729	36° 49' N, 8° 12' E
Lac du barrage de Boughezoul	5 juin 2011	Médéa	9	35° 44' N, 2° 47' E
Ile de Rachgoun	5 juin 2011	Aïn Témouchent	66	35° 19' N, 1° 28' O



Figure 1.5. Cirque de Aïn Ouarka (Convention Ramsar)

📍 Localisation : Wilaya de Naâma

🌿 Type : Zone humide naturelle – Oasis/Gueltas



Figure 1.6. Lac El Mellah (Convention Ramsar)

📍 Localisation : Wilaya d'El Tarf, Parc National d'El Kala

🌿 Type : Zone humide côtière – Lagune d'eau saumâtre



Figure 1.7. La Vallée d'Ihérir (Convention Ramsar)

📍 Localisation : Wilaya d'Ilizi, massif du Tassili n'Ajjer

🌿 Type : Zone humide saharienne – Guelta et vallée rocheuse

1.9. Problématiques liées aux zones humides et lacs en Algérie

Les zones humides d'Algérie, notamment ses lacs, connaissent depuis plusieurs décennies une régression inquiétante, causée par un ensemble de facteurs d'origine anthropique et naturelle. Cette dégradation affecte gravement la biodiversité, la qualité des eaux et les services écosystémiques essentiels qu'elles fournissent (Convention Ramsar, 2013). Les principales causes de ce déclin sont le drainage excessif, la pollution, la surexploitation des ressources, ainsi que les impacts directs de l'agriculture et de la pêche (Medouni, 1996 ; Raachi, 2007 ; Boumezbeur, 2002).

1.9.1. Le drainage des zones humides

Depuis l'Antiquité, les populations humaines ont cherché à assécher les zones humides, principalement pour exploiter leurs sols fertiles à des fins agricoles. Cependant, ce n'est qu'au XX^e siècle, avec la mécanisation et les travaux publics à grande échelle, que des opérations de drainage d'envergure ont pu être menées. Durant cette période, une grande partie des zones humides méditerranéennes, dont plusieurs en Algérie, a été asséchée pour être convertie en terres cultivables, souvent soumises à une agriculture intensive (DGF, 2006).

Cette politique de drainage, bien que répondant à des besoins économiques, s'est révélée source de nombreux problèmes. En réalité, les modèles de gestion adoptés ont souvent engendré des conséquences négatives, telles qu'une réduction des ressources en eau, des accumulations anormales et des inondations localisées, une baisse du niveau des nappes phréatiques, une salinisation croissante des sols, voire l'abandon de certaines terres agricoles en raison de leur dégradation (DGF, 2007). Ces impacts sont particulièrement visibles autour de plusieurs lacs algériens emblématiques, comme le lac Fetzara, le lac Oubeira ou encore le lac Mellah. Face à ces dérives, les opérations de drainage à vocation agricole ont été progressivement restreintes.

1.9.2. La pollution des lacs et zones humides

La pollution constitue une menace majeure pour les lacs côtiers et les zones humides algériennes. Elle est principalement liée au rejet massif et souvent non traité de déchets

solides et liquides issus des zones urbaines et industrielles. Ce phénomène est particulièrement marqué dans les régions côtières, où les industries chimiques et pétrochimiques, concentrées autour des villes, génèrent des pollutions importantes (Zaafour, 2012).

À ces sources urbaines et industrielles s'ajoute désormais une pollution agricole croissante, liée à l'utilisation intensive d'engrais, de pesticides et d'autres produits chimiques, qui sont lessivés vers les milieux aquatiques. Ces polluants combinés ont des effets délétères sur la santé humaine, la faune et la flore, même s'il est important de noter que ces impacts ne sont pas nécessairement irréversibles. En effet, l'arrêt ou la réduction des sources polluantes permet souvent une restauration significative de la biodiversité (Azevedo et al., 2015 ; World Health Organization, 2022 ; Moreno et al., 2012).

1.9.3. La surexploitation des ressources naturelles

Les populations riveraines des lacs et zones humides tirent leurs moyens de subsistance de ces milieux, en exploitant les ressources alimentaires, les fibres végétales et la biomasse. Cependant, une exploitation excessive et non contrôlée de ces ressources conduit souvent à leur épuisement. Un exemple frappant est la pêche dans les lagunes et les lacs côtiers, où l'emploi de méthodes destructrices, telles que les filets à mailles trop fines, ont entraîné une baisse drastique des captures. Parallèlement, la chasse excessive d'oiseaux aquatiques dans ces zones, dépassant largement les capacités de renouvellement naturel, a conduit à une diminution alarmante de ces populations (DGF, 2015 ; Raachi, 2007). Le surpâturage dans les zones littorales a également provoqué la disparition totale de la végétation, avec pour conséquence une forte érosion des sols. En outre, la pression démographique croissante engendre une demande accrue en eau douce (DGF, 2007).

Cette situation s'accompagne souvent d'une gestion inadéquate des ressources hydriques, caractérisée par le drainage systématique des zones humides, le détournement des cours d'eau, et la surexploitation excessive des nappes phréatiques, parfois sur plusieurs centaines de mètres de profondeur. Ces pratiques provoquent une salinisation progressive des nappes et une dégradation généralisée des milieux aquatiques (DGF, 2016).

Or, l'eau douce est indispensable à la survie des écosystèmes liés aux zones humides, qui jouent un rôle fondamental dans le cycle de l'eau, notamment en régulant les flux et en assurant la recharge des nappes. Leur dégradation engendre un cercle vicieux aggravant le déficit en eau (Convention Ramsar, 2013 ; Sayad, 2008).

1.9.4. Impacts agricoles

Certaines zones humides, telles que les marais ou les zones inondables, sont utilisées à des fins agricoles ou pastorales, comme c'est le cas du marais de Mekhada, où le pâturage extensif est pratiqué. Cette activité se concentre souvent sur des zones où la végétation naturelle commence à être remplacée par des prairies humides. Toutefois, les prélèvements illégaux d'eau pour l'irrigation, ainsi que les méthodes archaïques d'irrigation employées, entraînent une perte considérable d'eau nécessaire à la faune aquatique, notamment à l'avifaune (WWF & DGF, 2017 ; DGF, 2007).

1.9.5. Problèmes liés à la pêche

Certaines pratiques de pêche constituent une menace grave pour le renouvellement des ressources halieutiques. Par exemple, l'utilisation d'explosifs dans les milieux aquatiques modifie radicalement les substrats et entraîne la disparition quasi totale de la faune locale, compromettant durablement l'équilibre écologique (Raachi, 2007 ; Zaafour, 2012).

1.9.6. Autres menaces diverses

Enfin, plusieurs autres problèmes affectent les zones humides algériennes, notamment la mise à feu délibérée des roselières, le surpâturage intensif, le braconnage, ainsi que le manque d'équipements et d'infrastructures pour la surveillance efficace des écosystèmes (Boumezbeur, 2002 ; DGF, 2015). Par ailleurs, la législation actuelle est insuffisante pour encadrer et protéger de manière adéquate ces milieux vulnérables, notamment en ce qui concerne les activités d'exploitation et de conservation (WWF & DGF, 2017).

1.10. Méthodes d'évaluation de la qualité des eaux

L'évaluation de la qualité des ressources hydriques constitue un axe majeur de la recherche environnementale. Les approches classiques reposent principalement sur l'analyse physico-chimique des principaux paramètres de l'eau, permettant de caractériser son faciès hydrochimique et de comprendre les processus géochimiques liés aux interactions eau-roche et aux activités anthropiques (APHA, 2017).

Face à la complexité des données hydrochimiques, des outils synthétiques ont été développés afin de faciliter l'interprétation globale de la qualité des eaux. Parmi eux, les indices de qualité de l'eau (IQE) permettent de regrouper plusieurs paramètres en un indicateur unique facilitant la classification des ressources hydriques (Sahu & Sikdar, 2008). En milieu aride et semi-aride, où la pression sur les ressources en eau est particulièrement élevée, l'Irrigation Water Quality Index (IWQI) est largement utilisé pour évaluer l'aptitude des eaux à l'irrigation et soutenir la gestion durable des ressources en eau (Meireles et al., 2010). Par ailleurs, l'intégration de méthodes d'analyse statistique et de techniques d'intelligence artificielle sont de plus en plus utilisées pour améliorer l'analyse et la prédiction de la qualité des eaux, notamment dans les systèmes environnementaux complexes tels que les zones humides (Singh et al., 2021).

1.11. Travaux antérieurs et état de l'art

De nombreuses études ont mis en évidence le rôle des zones humides dans la régulation de la qualité des eaux et le maintien des équilibres biogéochimiques. Selon Mitsch et Gosselink (2015), ces écosystèmes contribuent à la réduction des polluants, à la rétention des nutriments et à la stabilisation des cycles biogéochimiques. Toutefois, leur efficacité dépend fortement des conditions hydrologiques et des pressions anthropiques exercées sur leur bassin versant. Dans les régions méditerranéennes ainsi qu'en milieux arides et semi-arides, plusieurs recherches ont montré que les phénomènes d'évaporation intense et de concentration des sels peuvent favoriser la salinisation des eaux et la dégradation progressive des ressources hydriques (Williams, 1999 ; Zedler & Kercher, 2005 ; Mitsch et al., 2013).

Le lac Fetzara a notamment été identifié comme une zone humide sensible, marquée par des perturbations hydrologiques et une augmentation progressive de la salinité des eaux (Mebarki et al., 2012). Cependant, peu d'études ont adopté une approche intégrée combinant analyses hydrochimiques, indices de qualité des eaux et outils de modélisation avancée. Cette insuffisance scientifique souligne l'intérêt de la présente recherche, qui s'inscrit dans une démarche intégrée visant à mieux comprendre l'impact des zones humides sur la qualité des eaux à travers l'utilisation d'indices de qualité et d'approches d'intelligence artificielle.

1.12. Conclusion

Ce premier chapitre, consacré à une revue bibliographique approfondie, a permis de mettre en lumière la complexité et l'importance des zones humides en tant que systèmes écologiques à haute valeur ajoutée. Leur rôle est multiple : elles interviennent dans la régulation des cycles hydrologiques, la filtration des eaux, la protection contre les inondations, la conservation de la biodiversité et le soutien à diverses activités humaines. Ces fonctions en font des écosystèmes essentiels, tant sur le plan environnemental que socio-économique.

Cependant, cette analyse a également révélé la fragilité structurelle des zones humides, particulièrement exposées aux impacts des activités anthropiques : urbanisation non planifiée, drainage, pollution diffuse et ponctuelle, surexploitation des ressources, et effets du changement climatique. Le cas algérien illustre parfaitement cette dynamique, avec une pression croissante exercée sur les milieux humides.

Les connaissances théoriques exposées dans ce chapitre constituent ainsi un socle indispensable à la compréhension des enjeux liés à la préservation et à la valorisation durable des zones humides. Elles fournissent également un cadre conceptuel pertinent pour l'analyse du lac Fetzara, zone humide classée Ramsar, qui fera l'objet du chapitre suivant. Cette prochaine partie s'attachera à décrire les caractéristiques géographiques, hydrologiques et écologiques de ce site, tout en examinant les pressions environnementales qui affectent sa dynamique et sa qualité écologique.

CHAPITRE 2 :
PRESENTATION DU SITE
D'ETUDE – LAC
FETZARA

2.1. Introduction

L'évaluation de la qualité des eaux autour du lac Fetzara requiert une compréhension globale du contexte environnemental local. En effet, les caractéristiques géographiques, géologiques, climatiques et hydrologiques de cette zone influencent directement la dynamique des eaux de surface et souterraines, ainsi que leur composition physico-chimique.

Situé dans la wilaya d'Annaba, au nord-est de l'Algérie, le lac Fetzara constitue une zone humide d'importance internationale, inscrite à la Convention de Ramsar depuis 2002. Son positionnement stratégique et ses fonctions écologiques en font un site d'intérêt majeur, à la fois pour la biodiversité et pour les ressources en eau. Cependant, cet écosystème est soumis à des pressions croissantes, notamment d'origine anthropique, qui accentuent sa vulnérabilité.

Ce chapitre vise à présenter les composantes naturelles et physiques du site d'étude afin de fournir un cadre de référence aux analyses ultérieures. Il commence par la localisation géographique et la situation administrative du lac, puis décrit le contexte géologique et géomorphologique, déterminant pour la circulation des eaux. L'occupation du sol, les données climatiques et les paramètres hydrologiques sont ensuite abordés pour évaluer leur influence sur le régime hydrique local. La présentation inclut également un aperçu du fonctionnement hydrogéologique du bassin, des interactions entre le lac et les aquifères, ainsi qu'un exposé sur la richesse biologique du site, notamment sa biodiversité floristique et faunistique. Enfin, une synthèse des caractéristiques physico-chimiques des eaux du lac permettra de mieux cerner les processus environnementaux en jeu.

Ce chapitre constitue le socle fondamental sur lequel repose l'interprétation scientifique des résultats présentés dans les chapitres ultérieurs. En intégrant les dimensions géographique, géologique, climatique, hydrologique, biologique et physico-chimique, il fournit un cadre d'analyse cohérent et rigoureux pour l'étude de l'impact environnemental du lac Fetzara sur la qualité des eaux de son bassin.

2.2. Localisation géographique et situation administrative

Le lac Fetzara, l'un des plus importantes zones humides de l'extrême Nord-Est algérien, est situé à 18 km au sud ouest de la wilaya d'Annaba et à 14 km de la mer Méditerranée. S'étendant sur 17 km de longueur (est-ouest) et 13 km de largeur (nord-sud), il couvre une superficie totale d'environ 18 600 hectares (DGF, 2015 ; Convention Ramsar, 2024).

Géographiquement, le lac Fetzara est compris entre les coordonnées approximatives 36°45' et 36°50' de latitude Nord, et 7°24' et 7°39' de longitude Est. Son altitude moyenne est d'environ 12 à 16 m au-dessus du niveau de la mer. La région est caractérisée par un climat méditerranéen subhumide à influence semi-aride, marqué par des précipitations irrégulières et une forte évaporation durant la saison sèche, favorisant les phénomènes de salinisation des eaux et des sols (Zenati, 2010 ; Habes et al., 2012).

Sur le plan administratif, le lac Fetzara relève de la ville d'Annaba, plus précisément de la daïra et commune de Berrahal. Le lac est entouré par plusieurs localités : au nord, il est bordé par le chef-lieu de la commune de Berrahal ; au sud, il touche les communes d'El Eulma (Oued El Hout) et de Cheurfa ; à l'est se trouvent les villages d'El Gantra et d'Oued Zied, tandis qu'à l'ouest, il est voisin d'Oued Mellah. (Fig 2.1).

Le bassin versant du lac, incluant les oueds et châabets, s'étend sur 500,5 km², avec des altitudes variant selon les zones : 300 à 400 mètres au sud (reliefs ondulés), environ 100 mètres au nord (pentes raides), et 20 à 50 mètres à l'est et à l'ouest (Habes et al., 2012 ; Zahi, 2008). Reconnu pour son importance écologique, le lac Fetzara a été classé en 2002 comme zone humide d'importance internationale par la convention de Ramsar (Ramsar Sites Information Service, 2002).

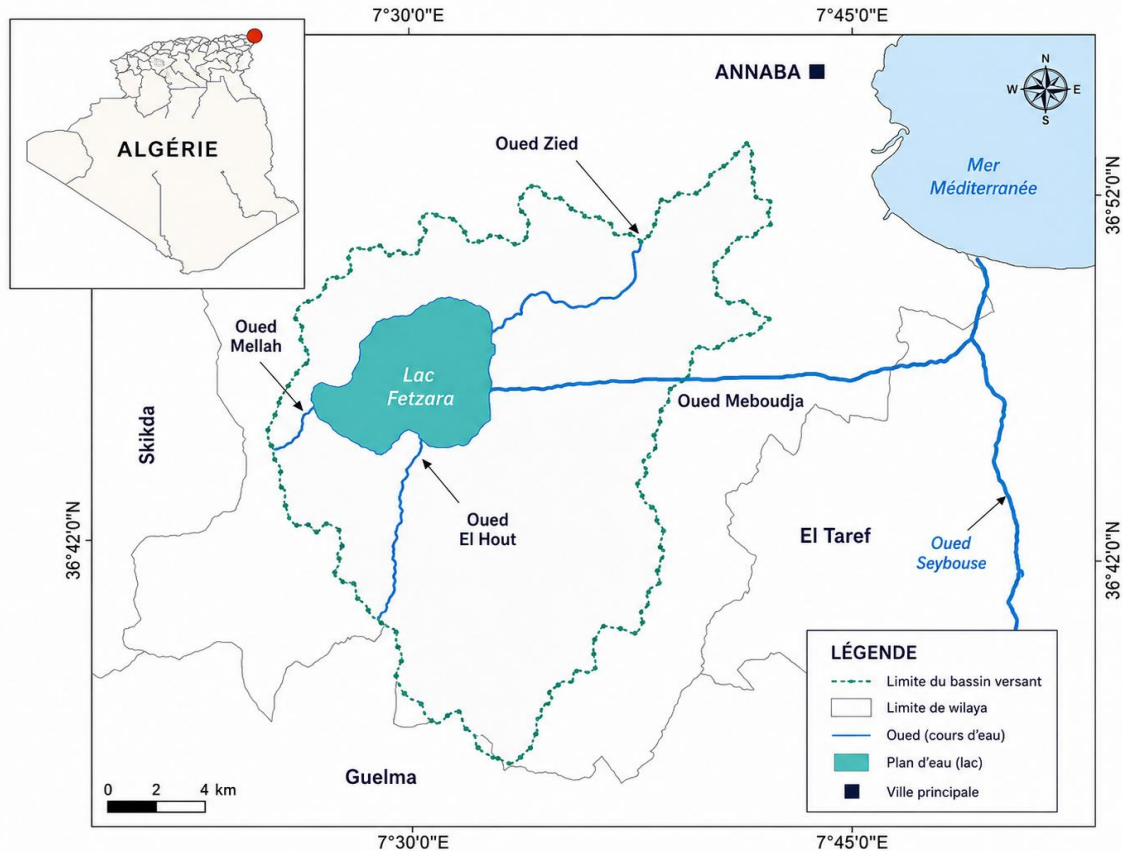


Figure 2.1. Situation géographique du lac Fetzara (élaborée par l’auteure, 2026)

2.3. Contexte géologique et géomorphologique

2.3.1. La géologie

La région du lac Fetzara, située dans le Nord-Est algérien, présente une géologie complexe façonnée par une alternance de processus tectoniques, sédimentaires et érosifs du Paléozoïque à l’époque actuelle. Elle s’inscrit dans l’ensemble géologique du Tell nord-oriental, qui s’étend de Constantine à la frontière tuniso-algérienne, et a fait l’objet de plusieurs études fondamentales (Joleaud, 1936 ; Hilly, 1962 ; Vila, 1980). Le site se caractérise par une dépression tectonique dissymétrique active au Quaternaire, encadrée au nord par le massif métamorphique et éruptif de l’Edough (composé de gneiss, de schistes cristallins et de granites triasiques) et au sud par les collines miocènes de Aïn Berda, constituées de flysch, de grès et de schistes mélangés à des alluvions.

À l'ouest, la dépression s'étend vers la côte de Skikda, tandis qu'à l'est, elle rejoint la plaine littorale d'Annaba, formée de deux sous-unités distinctes : la plaine d'El Hadjar et celle d'Annaba, séparées par les buttes éruptives de Belelieta et Bouhamra (Mebarki et al., 2012 ; Djabri et al., 2008).

Le substratum sédimentaire de la plaine, formé du Paléozoïque au Quaternaire, comprend des dolomies, gypses et calcaires (Trias-Jurassique), ainsi que des dépôts fluviatiles et marins du Cénozoïque liés aux fossés d'effondrement de Ben Ahmed et Ben M'Hidi. Durant le Quaternaire, des oscillations eustatiques ont façonné des terrasses alluviales (15-150 m) et isolé le lac Fetzara derrière des cordons dunaires, créant une cuvette marécageuse comblée par des dépôts détritiques (galets, sables, limons) issus de l'érosion des reliefs voisins (Joleaud, 1977 ; Vila, 1980).

Ainsi, la géologie du lac Fetzara résulte d'une interaction dynamique entre un socle ancien, une sédimentation tertiaire et quaternaire, et des processus morphogéniques récents (Fig 2.2).

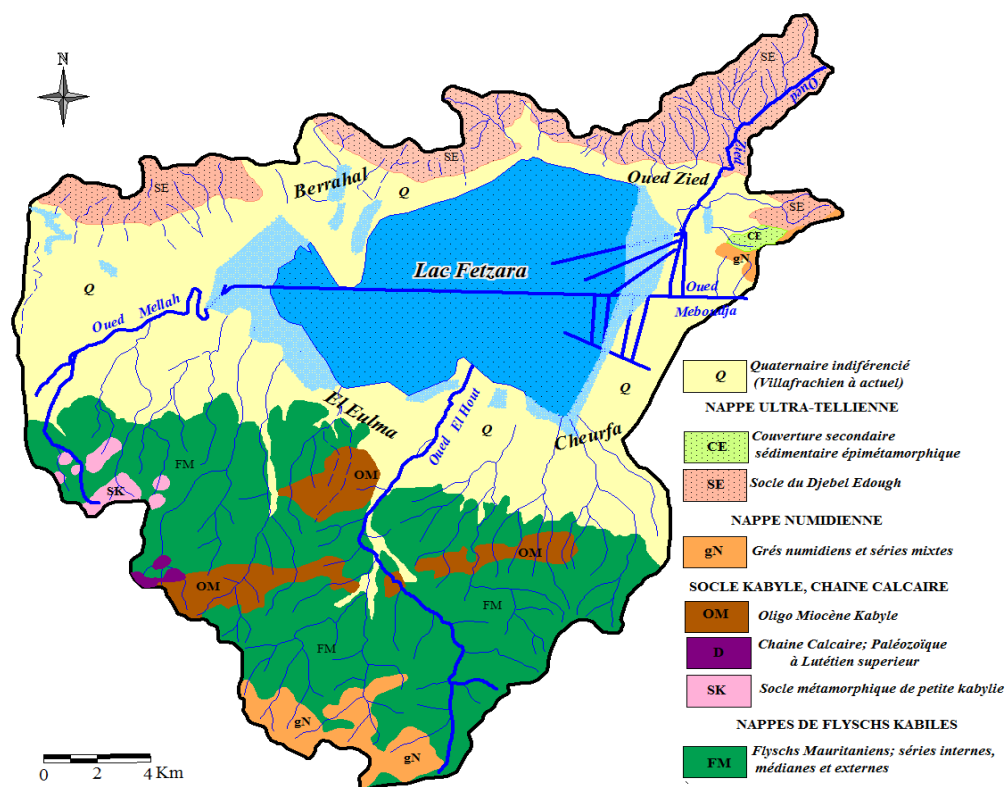


Figure 2.2. Carte géologique de la région du lac Fetzara (Zahi, 2014).

2.3.2. La géomorphologie

La région du lac Fetzara présente une géomorphologie variée, structurée autour d'une vaste cuvette tectonique dissymétrique résultant d'interactions entre la tectonique active, l'érosion et la sédimentation (Vila, 1980). Cette dépression centrale, d'environ 18 600 hectares, est inclinée d'ouest en est, avec une altitude comprise entre 2 et 40 mètres. Elle est délimitée (Fig 2.3) :

- Au nord, par le massif de l'Edough et les buttes de Belelieta, formés de roches métamorphiques et éruptives triasiques (schistes, granites), sujets à une forte désagrégation physique ;
- Au sud, par des collines miocènes constituées de flyschs, de grès et de schistes, formant un piémont marqué par des glacis étagés ;
- À l'est et à l'ouest, par des cordons dunaires qui isolent partiellement le lac et contribuent à la fermeture morphologique de la cuvette (Joleaud, 1977).

La morphologie actuelle est aussi influencée par la division en deux grands sous bassins versants : celui du lac Fetzara à l'ouest (environ 515 km²) et celui de l'Oued Meboudja à l'est (environ 252 km²), qui drainent les eaux vers la cuvette lacustre.

Sur le plan pédologique, la diversité topographique s'accompagne de quatre grands types de sols : sols peu évolués (colluvions et alluvions), vertisols fissurés en période sèche, sols hydromorphes engorgés et sols hélomorphes à forte salinité (Hilly, 1962 ; Vila, 1980).

Cette diversité géomorphologique conditionne fortement les dynamiques hydrologiques, les usages agricoles ainsi que les caractéristiques écologiques de la zone humide du lac Fetzara.

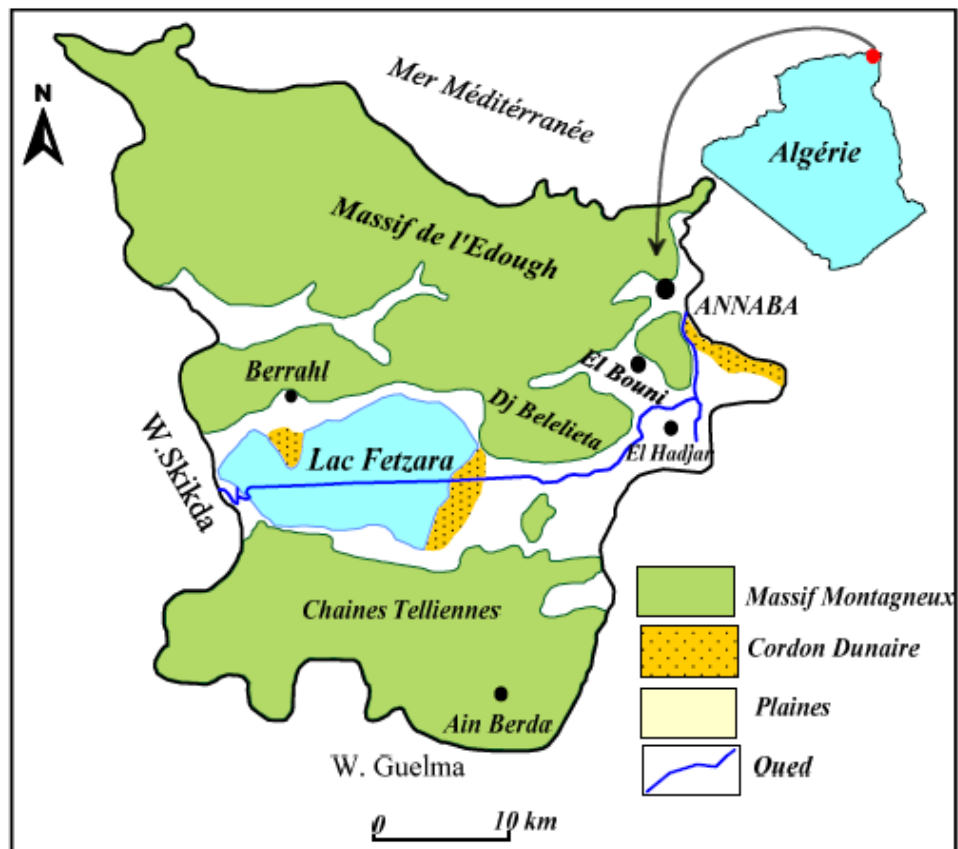


Figure 2.3. Carte géomorphologique de la région du lac Fetzara (Zahi, 2014).

2.4. Occupation du sol dans la région

L'occupation du sol autour du lac Fetzara est caractérisée par une mosaïque de formations végétales naturelles, de terres agricoles et de zones forestières, révélant un paysage diversifié fortement influencé par l'altitude et les conditions pédoclimatiques. Environ un tiers de la superficie du site est consacré à l'agriculture, notamment sur les terrains situés au-delà de 12 mètres d'altitude. Ces terres sont dédiées à la céréaliculture, au maraîchage, à l'arboriculture fruitière irriguée (agrumes, fruits à noyaux) et à la culture fourragère. La végétation naturelle occupe également une part importante du territoire : une vaste prairie marécageuse, composée essentiellement de roseaux, joncs, massettes et d'autres espèces aquatiques, couvre les zones basses et humides, offrant un pâturage dense pour le cheptel local, bien que menacé par le surpâturage (Zahi, 2008 ; Mebarki et al., 2012).

Les versants des bassins versants sont majoritairement couverts de broussailles, de maquis méditerranéen ainsi que de formations forestières naturelles dominées par le chêne-liège, principalement dans les zones plus élevées comme le massif de Berrahal. Par ailleurs, des reboisements à base d'eucalyptus et de pin maritime ont été mis en œuvre, contribuant à la régénération forestière et à la stabilisation des pentes. Cette configuration paysagère est le résultat d'interactions complexes entre les dynamiques naturelles et les pressions anthropiques, telles que l'exploitation forestière, les incendies, le pacage ou encore l'expansion agricole (Bensaci et al, 2005 ; DGF, 2007).

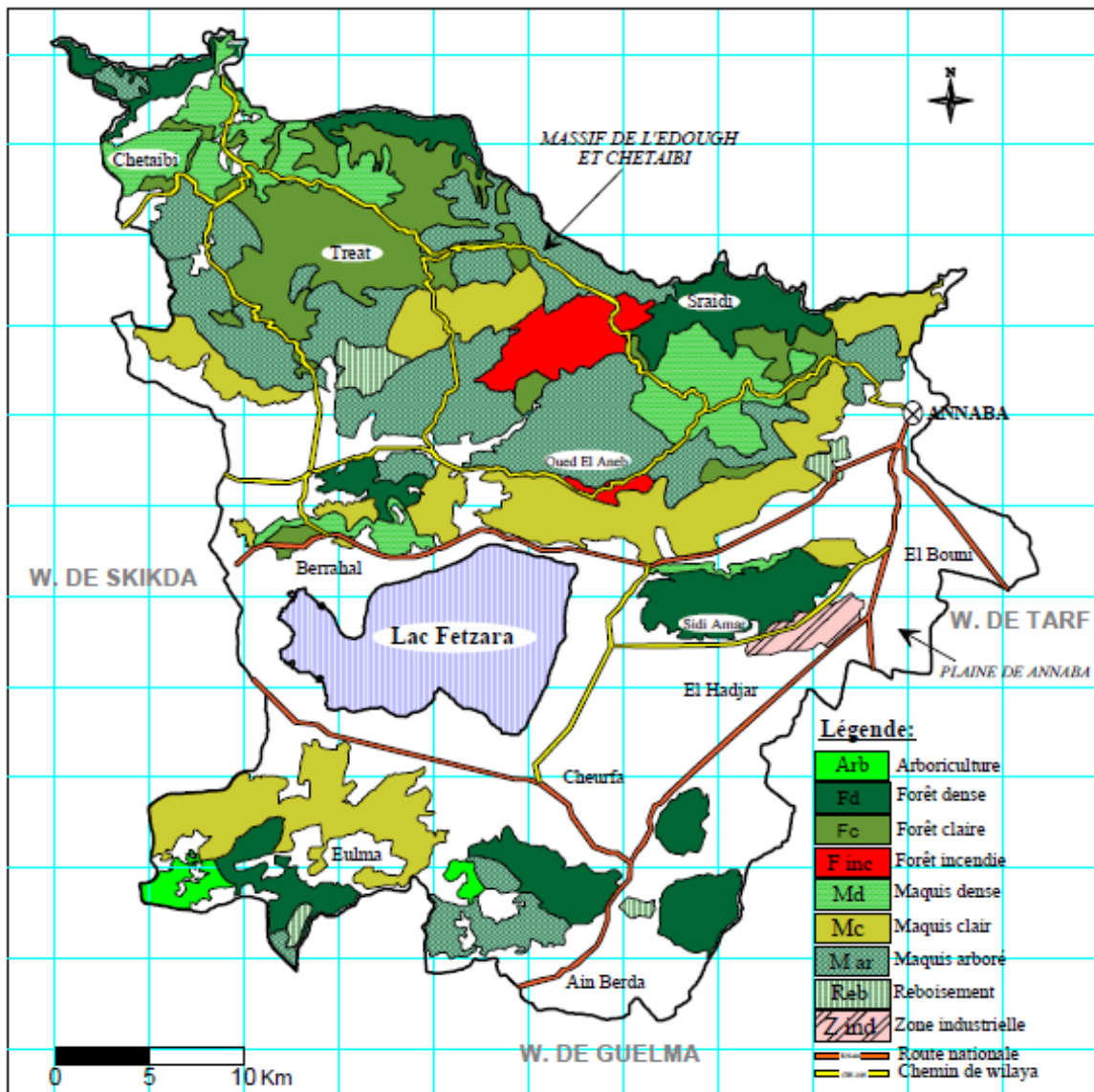


Figure 2.4. Carte de l'occupation du sol de la wilaya de Annaba (DGF, 2007).

2.5. Climat et données météorologiques

La région du lac Fetzara bénéficie d'un climat méditerranéen à tendance tempérée, marqué par des hivers relativement doux et humides ainsi que par des étés chauds et secs. Ce type de climat exerce une influence notable sur les dynamiques d'alimentation et de circulation des eaux, tant en surface qu'en profondeur, et constitue un facteur essentiel dans l'établissement du bilan hydrique du bassin versant.

Les précipitations annuelles varient entre 600 et 700 mm, avec environ 80 % des pluies concentrées entre Octobre et Mai, période correspondant à la saison humide. En parallèle, la température moyenne est de 11 °C en hiver et de 25 °C en été, reflétant une forte amplitude saisonnière. Le mois le plus sec est le mois de Juillet avec une précipitation moyenne de 2,3 mm (Figure 2.5).

L'humidité relative moyenne mensuelle est de 75.1 % avec une valeur maximale de 79 % en janvier et une valeur minimale de 71 % en juillet. Elle demeure donc relativement stable tout au long de l'année, contribuant à la dynamique hydrologique locale.

En ce qui concerne l'évaporation, la valeur annuelle moyenne est de l'ordre de 1220 mm/an, et la moyenne mensuelle est de 102 mm. L'évaporation maximum est enregistrée en Août avec une valeur moyenne mensuelle de 154,3 mm ce qui influence négativement le stock hydrique durant ces périodes (Mars → Novembre : Figure 2.5), le minimum est enregistré en janvier 61,9 mm. (Tab.2.1).

Concernant la dynamique éolienne autour du lac Fetzara, les vents dominants en hiver proviennent du Nord-Est et du Nord-Ouest, tandis qu'en été, ils viennent principalement du Nord-Est. Par ailleurs, le Sirocco, vent chaud et sec en provenance du sud, souffle en moyenne 18 jours par an, aggravant l'assèchement estival.

Les valeurs moyennes mensuelles des données météorologiques enregistrées par la station d'Annaba pour la période (1989-2008) sont représentées dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1 Les valeurs moyennes mensuelles des données météorologiques (Centre National de Climatologie :1989-2008)

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
P (mm)	29,1	59,2	75,3	117,2	98,4	73,8	68,4	56,6	34,9	12,2	2,3	7,2
T (C°)	23,9	20,8	16,1	12,8	11,6	11,9	13,7	15,5	18,8	22,3	25,0	26,1
HR %	73	75	75	78	79	78	76	75	76	74	71	71
Evap (mm)	127,9	99,8	79,7	66,0	61,9	66,9	88,0	87,3	103,9	130,4	153,9	154,3
Vent (m/s)	3,7	3,4	3,7	4	3,6	3,9	3,9	3,9	3,7	3,9	4,1	3,8

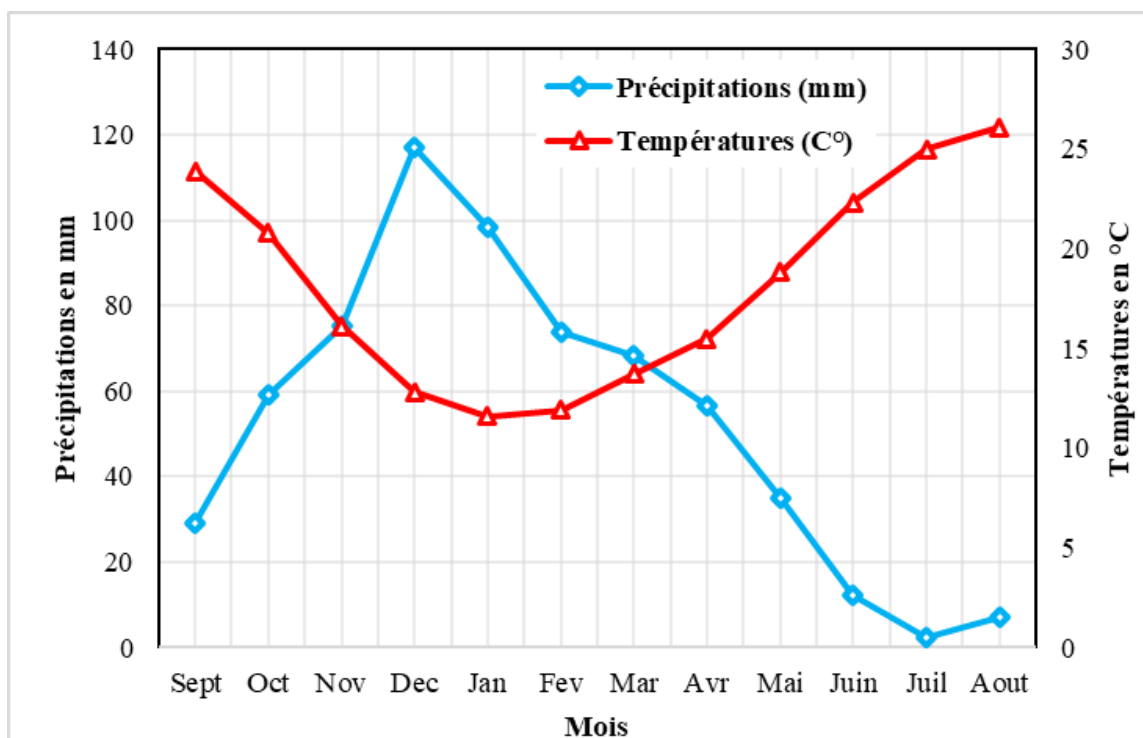


Figure 2.5. Diagramme ombrothermique de la région du lac Fetzara (élaborée par l'auteure à partir des données climatiques de la période 1989–2008).

2.6. Hydrologie du lac Fetzara

2.6.1. Alimentation hydrologique du lac (Mebarki, 2009 ; Djabri et al., 2003)

Le lac Fetzara est principalement alimenté par les eaux de ruissellement issues des montagnes environnantes, à travers de nombreux ruisseaux et trois oueds principaux : Oued El Hout, Oued Zied et Oued Mellah (Figure 2.6).

- **Oued El Hout**, au Sud, est le plus important contributeur. Il prend sa source au djebel Menchoura (795 m d'altitude) dans le Tell nord guelmien, et s'écoule sur environ 10 km du sud vers le nord.
- **Oued Zied**, au Nord, naît à environ 900 m d'altitude, entre les djebels Edough et Bougantas. Il coule du Nord vers le Sud-Ouest sur 10,5 km avant d'atteindre le lac.
- **Oued Mellah**, à l'Ouest, naît sur les hauteurs de Koudiat Guendoul (100–130 m d'altitude), près de l'Oued El Kébir Ouest, et se dirige vers le canal d'assèchement sur une distance de près de 8 km.

2.6.2. Évacuation hydrologique du lac

- **Oued Meboudja** : La Meboudja joue le rôle de collecteur intermédiaire entre le lac Fetzara et l'oued Seybouse. Elle draine les eaux provenant du bassin versant du lac, dont la superficie s'étend sur environ 515 km, ainsi que celles du bassin versant de l'oued El Ressoul. Ce collecteur reçoit deux affluents principaux : l'oued Taieb et l'oued El Ressoul. La Meboudja connaît une crue quinquennale atteignant un débit de 20 m³/s (Bounnouna et al., 1986). La Meboudja se draine dans l'oued Seybouse à environ 8 km de son embouchure.
- **Oued Seybouse** : L'oued Seybouse, considéré comme le deuxième cours d'eau le plus important d'Algérie, prend naissance dans la région de Guelma à la confluence des oueds Bouhamdane et Cherf. Il s'écoule d'abord dans une vallée étroite orientée du sud vers le nord, avant de traverser la vaste plaine d'Annaba, drainant un bassin versant d'environ 7 045 km². Dans la région d'Annaba, il reçoit plusieurs affluents : l'oued Meboudja, l'oued Mellah et l'oued Bou Athou.

Bien qu'il constitue le principal exutoire hydrique de la région, sa capacité de drainage reste limitée en raison de l'étroitesse de son lit et de l'envasement dû à une forte charge en limon. Lors des crues, le débordement de l'oued Seybouse peut provoquer un reflux vers l'oued Meboudja, entraînant des inondations en aval (A.J.C.I, 1985).

2.6.3. Régime hydrologique

Ces oueds présentent un régime hydrologique irrégulier, avec un débit torrentiel en hiver et quasi nul en été, ce qui entraîne une forte variabilité saisonnière des apports au lac. En période sèche, seul Oued El Hout maintient un écoulement continu (DGF, 2003). En période hivernale, la surface inondée atteint environ 60 km², mais elle diminue progressivement de juin à septembre, en raison de précipitations quasi inexistantes et d'un taux d'évaporation élevé durant ces mois. (A.J.C.I, 1985).

Selon Marre (1992), les affluents secondaires fournissent également un débit appréciable de 141 à 145 m³/s. L'évacuation des eaux du lac est assurée par un canal d'assèchement principal, traversant le centre du plan d'eau. Ce dispositif vise à réguler les niveaux, prévenir les inondations et favoriser l'écoulement interne. Il se termine par un pont-vanne, qui alimente l'Oued Meboudja, se jetant ensuite dans l'Oued Seybouse, avant d'atteindre la mer Méditerranée à l'est du site (DGF, 2003). Cependant, ce système reste insuffisant, entraînant des phénomènes d'hydromorphie et une salinisation importante des sols (Habes, 2006).

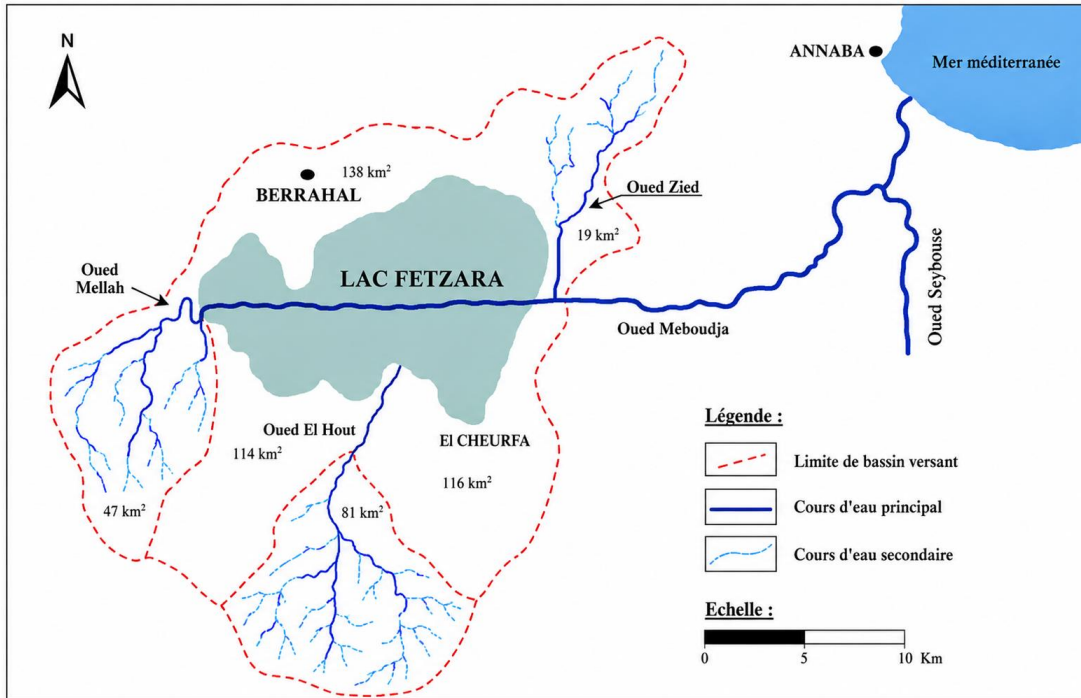


Figure 2.6 : Réseau hydrographique du bassin versant du lac Fetzara (élaborée par l’auteure, 2026).

Le bassin versant du lac Fetzara couvre une superficie totale estimée à environ 515 km², répartie en 30 sous-bassins versants de tailles petites à moyennes. Parmi les plus importants figurent ceux des oueds Zièd, El Hout et El Mellah, dont les superficies respectives sont de 19 km², 81 km² et 47 km². À eux seuls, ces trois sous bassins représentent près de 29 % de la superficie totale (Tab 2.2). Ils s’intègrent dans un réseau hydrographique de type endoréique, caractéristique de cette région (Zenati, 2010).

Tableau 2.2. Principaux sous-bassins versants du lac Fetzara (Zenati, 2010).

Sous bassin versant	Situation par rapport au lac	Longueur (km)	Superficie (km ²)	Superficie (%)
Oued El Hout	Sud	10	81	15,73%
Oued El Mellah	Ouest	8	47	9,13%
Oued Zièd	Nord-Est	10,5	19	3,69%

2.6.4. Dynamique hydrologique et son impact sur les fonctions écosystémiques et la biodiversité

Le plan d'eau présente des variations saisonnières marquées, avec une extension maximale de 5 800 hectares en période humide (AJCI, 1985) et une profondeur atteignant 10 mètres dans sa partie centrale (DGF, 2003). Ce cycle hydrologique particulier, alternant inondations hivernales et assèchements estivaux, engendre une minéralisation cyclique des eaux favorable au développement d'une biodiversité spécifique, notamment pour les oiseaux aquatiques migrateurs. Le système de drainage, bien que fonctionnel, montre certaines limites techniques, particulièrement durant la saison sèche où le lac peut s'assécher complètement. Ces fluctuations hydrologiques confèrent au site plusieurs fonctions écologiques majeures : régulation naturelle des crues, filtration des sédiments et des nutriments, ainsi qu'un rôle important dans la recharge des nappes phréatiques locales. Ces caractéristiques en font un élément indispensable à l'équilibre hydrique régional (Mebarki et al., 2012 ; Zahi, 2008).

2.7. Hydrogéologie du lac

L'analyse hydrogéologique représente un outil essentiel pour appréhender le fonctionnement des nappes et leur régime. Elle permet, entre autres, d'évaluer les propriétés hydrodynamiques en lien avec le contexte géologique de l'aquifère, de déterminer les axes d'écoulement des eaux souterraines, et de mettre en évidence les interactions entre les nappes, le lac et les oueds avoisinants. Les travaux réalisés ont ainsi permis de mieux caractériser la lithologie, la configuration spatiale et les propriétés hydrodynamiques des principaux aquifères de la région. Ces derniers présentent des importances variables tant sur le plan quantitatif que qualitatif, avec une distinction marquée entre l'aquifère superficiel et l'aquifère profond. Le lac Fetzara se distingue par une hydrogéologie complexe, marquée par la présence de plusieurs systèmes aquifères aux potentialités hydrauliques hétérogènes. Ces systèmes, composés de nappes superficielles et profondes, jouent un rôle déterminant dans la qualité des eaux ainsi que dans les dynamiques d'échange avec les zones humides avoisinantes. (Derradji et al., 2005 ; Zenati et al., 2010).

2.7.1 Nappes superficielles (Fig 2.7)

• **Nappe des gneiss altérés**

- Localisation : Nord-Est du lac, sur les massifs métamorphiques de Bouhamra et Beleleita.
- Caractéristiques :
 - Épaisseur moyenne : 15 m.
 - Perméabilité : 10^{-6} à 10^{-5} m/s.
 - Débit moyen des captages : 2 l/s (usage industriel et domestique).
 - Alimentation : Eaux de pluie.

• **Nappe des alluvions**

- Répartition : Plaine d'Annaba, autour du lac Fetzara (discontinue à l'Ouest).
- Lithologie : Alluvions argilo-sableuses à argilo-limoneuses (épaisseur : 2–10 m).
- Paramètres hydrodynamiques :
 - Transmissivité : $2,14 \times 10^{-3}$ à $4,2 \times 10^{-3}$ m²/s (Zenati et al., 2010).
 - Taux d'infiltration : 0,05–0,10 m/jour.
- Alimentation : Précipitations et crues des oueds (Zenati, 1999 ; Belhamra, 2001).

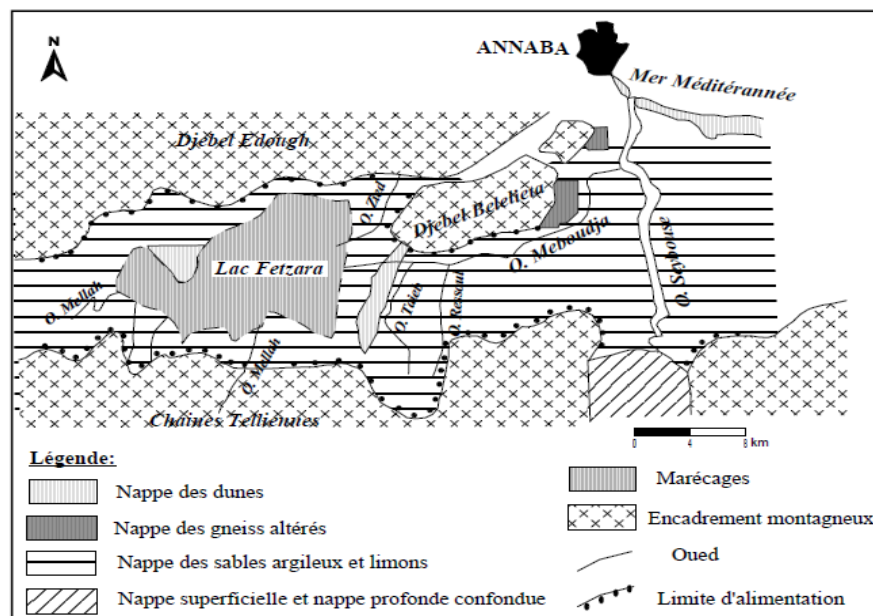


Figure 2.7. Les nappes superficielles de la plaine de Annaba (Zenati, 1999).

2.7.2 Nappes profondes (Fig 2.8)

- **Nappe des cipolins (calcaires métamorphiques fissurés)**
 - Localisation : Massifs de Bouhamra et Beleleita.
 - Caractéristiques :
 - Profondeur : 12–80 m (épaisseur ≤ 70 m).
 - Transmissivité : 5×10^{-5} à 10^{-3} m²/s (Derradji et al., 2005).
 - Débit des forages : 15 l/s.
- **Nappe des graviers (Plio-Quaternaire)**
 - Statut : Libre (région de Dréan) ou captive (Annaba).
 - Caractéristiques :
 - Perméabilité : 10^{-5} à 10^{-4} m/s.
 - Transmissivité : 3×10^{-2} à 5×10^{-3} m²/s (variable selon la zone).
 - Coefficient d'emmagasinement : 10^{-4} (captive) à 10^{-2} (libre).
 - Interaction : Drainance possible avec la nappe superficielle (Derradji et al., 2005).

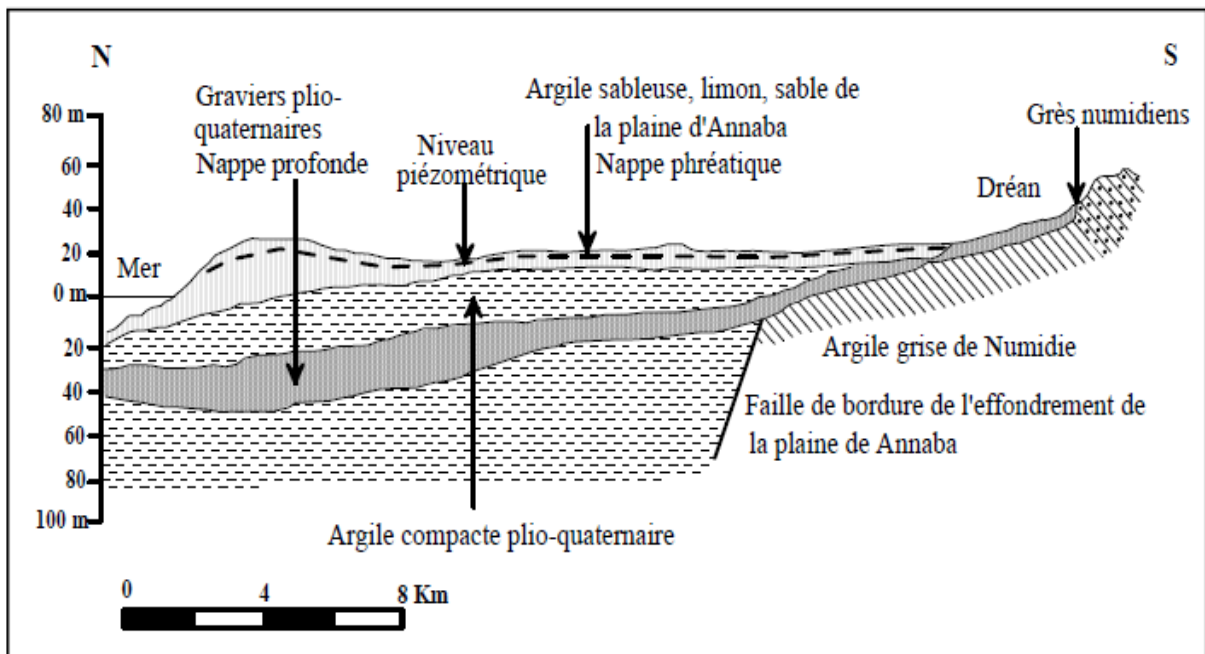


Figure 2.8. Système aquifère de la région de Fetzara (Derradji et al., 2005)

2.8. Biodiversité et patrimoine écologique du lac Fetzara

Le lac Fetzara, classé zone humide d'importance internationale par la Convention de Ramsar depuis 2002, constitue un écosystème méditerranéen remarquable par sa biodiversité et ses fonctions écologiques (Ramsar, 2002).

2.8.1. Biodiversité animale

Le lac représente un site stratégique pour l'avifaune migratrice, accueillant chaque hiver entre 20 000 et 50 000 oiseaux d'eau. On peut citer, parmi les espèces les plus représentatives, le Canard souchet (*Anas clypeata*), le Canard siffleur (*Anas penelope*), la Foulque macroule (*Fulica atra*), l'Oie cendrée (*Anser anser*) et le Flamant rose (*Phoenicopterus roseus*). Historiquement, le lac fut également un site de nidification pour plusieurs espèces d'Anatidés, bien que cette fonction ait été altérée par les travaux d'assèchement passés.

2.8.2. Biodiversité végétale

La végétation aquatique, variée et adaptée aux conditions fluctuantes, comprend des roselières (*Phragmites australis*), des herbiers à *Potamogeton* et *Ceratophyllum*, ainsi que des communautés halophytes. La flore compte 226 taxons répartis en 166 genres et 58 familles, dominée par des thérophytes reflétant une adaptation aux milieux instables. On y observe :

- **Hydrophytes** : *Juncus heterophyllus*, *Myriophyllum alternifolium*, *Callitriche obtusangula* ;
- **Plantes amphibies** : *Cyperus longus*, *Typha domingensis* ;
- **Hygrophytes** : *Tamarix gallica*, *Lythrum junceum*.

La majorité des espèces sont d'origine méditerranéenne, avec plusieurs endémiques et à haute valeur conservatoire (Ramsar, 2002).

2.8.3. Rôles écologiques et menaces

Outre sa richesse biologique, le lac Fetzara joue un rôle écologique fondamental comme corridor biologique méditerranéen, zone de reproduction et d'hivernage pour des espèces menacées, et site d'observation privilégié des effets du changement climatique. Cependant, il est soumis à de multiples pressions : envasement, salinisation progressive des sols, pollution agricole, surpâturage, urbanisation croissante et perturbations hydrologiques (Zahi, 2018). Ces menaces compromettent l'équilibre écologique du site et nécessitent une gestion intégrée et durable pour préserver ce patrimoine écologique d'importance régionale et internationale.



Figure 2.9. Biodiversité du lac Fetzara (Ramsar Sites Information Service, 2002)

2.9. Caractéristiques physico-chimiques

La région du lac Fetzara présente des caractéristiques physico-chimiques des sols et des eaux fortement influencées par la géologie locale, le climat méditerranéen semi-aride ainsi que les processus hydrologiques et anthropiques. Ces conditions favorisent notamment une salinité élevée et une forte minéralisation des milieux naturels.

2.9.1 Caractéristiques physico-chimiques des sols

D'après une analyse bibliographique basée sur les études de Djamaï (1993 et 2000), les sols de la région du lac Fetzara présentent les propriétés suivantes :

- **Salinité élevée** : Les sols autour du lac Fetzara sont des sols classés comme salins ($ESP \leq 15 \%$, $CE > 4 \text{ mS/cm}$) ; Avec une conductivité électrique (CE) très variable : 6,52 à 24,3 mS/cm pouvant atteindre 24,3 mS/cm, particulièrement dans les zones Sud-Est (commune de Cheurfa) et Nord-Est (commune d'Oued Zied).
- **Texture argileuse** : Dominée par des compositions argileuses à argilo-limoneuses, avec des proportions d'argile particulièrement élevées dans les horizons profonds (jusqu'à 68%) ; ce qui influence leur capacité de rétention d'eau et leur comportement hydrique.
- **pH** : Les sols sont légèrement alcalins à alcalins dans l'ensemble des stations étudiées avec des valeurs généralement supérieures à 8 (réaction légèrement à très franchement alcaline), ce qui est typique des sols salins dans des régions méditerranéennes.
- **Teneur en calcaire** : Présence généralement modérée (teneur maximale de 7,13%, localisée au centre du lac) Nord et Ouest, mais élevé dans les transects Sud et Est (entre 12,13 % et 15,42 %), en rapport avec l'écoulement des eaux des oueds et des canaux de drainage.
- **Matière organique** : La teneur en matière organique est relativement faible dans les zones inondées du lac, variant entre 1 et 4% ce qui peut limiter la fertilité des sols.

2.9.2. Caractéristiques physico-chimiques des eaux

Les études réalisées sur les eaux du lac Fetzara montrent une forte variabilité physico-chimique résultant à la fois des conditions naturelles (évaporation intense, dissolution géochimique, dynamique hydrologique) et des activités anthropiques (agriculture, rejets domestiques et drainage) (Habes, 2006 ; Zahi, 2018).

Les principaux résultats rapportés dans la littérature indiquent que :

- **Salinité et conductivité électrique** : La salinité des eaux de surface et souterraines est excessivement élevée variant de 2,5 à 4,5 g/L. La conductivité électrique des eaux souterraines peut atteindre 20,9 mS/cm, tandis que celle des eaux de surface varie entre 0,162 et 8,99 mS/cm, avec des valeurs les plus élevées à la sortie du lac (Oued Meboudja).
- **Variabilité saisonnière** : Les concentrations en sels et en ions varient selon la saison, avec une dilution des eaux pendant la saison humide due aux précipitations, et une concentration accrue pendant la saison sèche en raison de l'évaporation intense.
- **Composition chimique** : Les eaux présentent des concentrations élevées en chlorures, sulfates, et autres ions minéraux, influencées par la dissolution des formations géologiques traversées et les phénomènes d'évaporation et de lessivage.
- **Métaux traces** : Les eaux souterraines et superficielles contiennent des faibles concentrations en fer, chrome, manganèse, zinc et cuivre. En revanche, le plomb et le nickel sont présents en concentrations élevées dépassant les normes admises, probablement en raison des rejets anthropiques, de la nature géologique locale et du lessivage.
- **Azote minéral** : Les concentrations en nitrates et autres formes d'azote minéral varient spatialement et temporellement, avec des pics dans certaines stations du lac, liés aux activités agricoles et à la dynamique hydrologique (Boulakkaa, 2020).

2.9.3. Facteurs influençant ces caractéristiques

- ✚ La salinisation résulte essentiellement du lessivage des formations géologiques traversées, de l'infiltration des eaux de surface, de l'évaporation marquée durant la saison estivale, ainsi que des échanges ioniques entre les solutions et le complexe adsorbant des sols.
- ✚ Le climat méditerranéen, avec un changement de saisons sèches et humides, joue un rôle clé dans la variation temporelle des paramètres physico-chimiques des eaux et des sols.
- ✚ La géologie locale, notamment les formations triasiques et mésozoïques, influence la composition minérale des eaux et des sols par dissolution et apport ionique.

2.10. Conclusion

L'étude du cadre environnemental du lac Fetzara met en lumière un système naturel aux interactions complexes, façonné par une combinaison de facteurs climatiques, géologiques et anthropiques. Les caractéristiques physiques et chimiques des eaux du lac, fortement influencées par la salinité des sols, la nature des formations traversées, ainsi que les apports externes d'origine agricole et fluviale, traduisent un équilibre écologique fragile.

Cette analyse intégrée a permis d'identifier les éléments clés qui conditionnent le fonctionnement hydrologique et hydrogéologique du site, tout en révélant les principaux enjeux liés à la qualité de l'eau, notamment la variabilité saisonnière, la charge en éléments dissous, et la présence ponctuelle de métaux lourds. Ces observations soulignent la nécessité d'un suivi régulier et d'une gestion raisonnée des ressources.

En fournissant une vision d'ensemble cohérente du contexte naturel du lac Fetzara, ce chapitre constitue une base essentielle pour interpréter les données et les analyses de qualité des eaux, orienter les investigations scientifiques, et appuyer les décisions en matière de préservation de ce patrimoine écologique singulier.

CHAPITRE 3 : MATERIEL ET METHODES

3.1. Introduction

L'évaluation de la qualité des eaux souterraines constitue un enjeu fondamental dans le contexte actuel de dégradation croissante des ressources hydriques, tant sur le plan quantitatif que qualitatif. En Algérie, et notamment dans la région du lac Fetzara, les eaux de puits représentent une ressource essentielle pour les usages agricoles et domestiques. Toutefois, ces eaux sont de plus en plus exposées à la pollution d'origine anthropique (pratiques agricoles intensives, rejets domestiques non traités, surexploitation des nappes) et à des éléments naturels tels que les conditions géologiques, le climat et les processus hydrogéochimiques (Ahmed et al., 2019 ; Trabelsi et al., 2022). Ces influences combinées modifient les caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines et peuvent compromettre leur aptitude à l'irrigation et à la consommation humaine (Zheng et al., 2024).

Dans ce contexte, ce chapitre présente la démarche méthodologique adoptée pour évaluer la qualité des eaux de puits autour du lac Fetzara, en mobilisant à la fois des approches conventionnelles et des outils issus de l'intelligence artificielle. La méthode repose sur l'analyse de paramètres physico-chimiques prélevés dans 37 puits répartis autour du lac, entre mai et août 2015. Ces paramètres ont été choisis pour leur pertinence dans l'estimation de la qualité des eaux à des fins d'irrigation.

Dans un premier temps, une évaluation qualitative a été réalisée à travers le calcul de l'Indice de Qualité des Eaux pour l'Irrigation (IWQI), développé par Meireles et al. (2010), largement reconnu pour sa capacité à intégrer de multiples paramètres chimiques en un seul indicateur synthétique.

Dans un second temps, afin de surmonter les limites des méthodes traditionnelles (temps d'analyse, coût, complexité), une approche innovante fondée sur les modèles d'apprentissage automatique (Machine Learning) a été mise en œuvre pour prédire l'IWQI. Quatre algorithmes ont été testés et comparés : régression linéaire (LR), régression par machines à vecteurs de support (SVR), arbres de décision (DT), et XGBoost.

Ces modèles permettent de détecter les relations non linéaires entre les paramètres hydrochimiques, d'identifier les variables les plus influentes et de réduire significativement le besoin en données pour des prédictions fiables (Bouhali et al., 2022 ; Sidek et al., 2024). Les performances des modèles ont été évaluées à l'aide de métriques classiques de validation (R^2 , RMSE, MAE), afin de déterminer le modèle le plus apte à prédire la qualité des eaux de manière rapide et précise.

3.2. Caractérisation des données hydrochimiques collectées autour du lac Fetzara

Les données utilisées pour évaluer la qualité des eaux souterraines proviennent d'une campagne d'échantillonnage réalisée en 2015 autour du lac Fetzara, sous la direction du professeur Djabri. Au total, 37 puits répartis dans le bassin versant ont été investigués (Figure 3.1). Les prélèvements ont été effectués entre les mois de mai et août, période correspondant à une forte demande en eau pour l'irrigation, en raison d'un important déficit hydrique dû à de faibles précipitations.

Le bassin versant du lac Fetzara se caractérise par une vocation agricole marquée, les terres cultivées couvrant environ un tiers de sa superficie. Cette situation justifie pleinement la nécessité d'évaluer la qualité des eaux souterraines disponibles pour l'irrigation.

Les données collectées portent principalement sur les éléments majeurs responsables de la minéralisation des eaux. Les échantillons ont été prélevés conformément à des protocoles standards, assurant ainsi la fiabilité et la reproductibilité des analyses. Ces dernières ont concerné les principaux cations (sodium Na^+ , calcium Ca^{2+} , magnésium Mg^{2+}) et anions (chlorures Cl^- , bicarbonates HCO_3^- , sulfates SO_4^{2-}), ainsi que la conductivité électrique (EC), paramètre représentant la charge ionique totale dissoute dans l'eau.

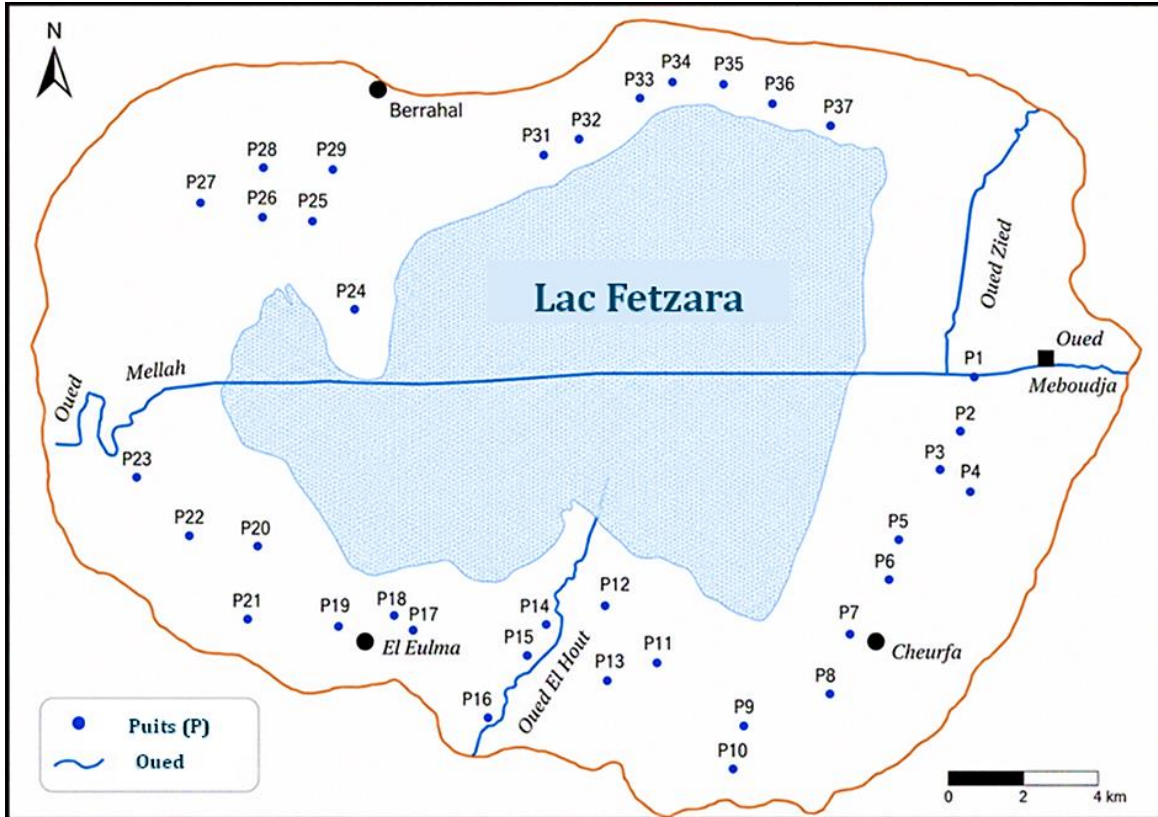


Figure 3.1. Localisation des puits de prélèvement autour du lac Fetzara (élaborée par l’auteure, 2026)

3.3. Paramètres analysés et leur influence majeurs sur la qualité de l'eau d'irrigation

- Sodium (Na^+) :** Le sodium est considéré comme l’un des éléments les plus problématiques dans les eaux destinées à l’irrigation, en raison de son impact négatif sur la perméabilité des sols. Une concentration élevée en sodium peut entraîner le remplacement du calcium et du magnésium fixé sur les particules d’argile, ce qui provoque la dispersion de ces particules et altère la structure du sol. Cela entraîne un sol dur, compact et imperméable à l’eau, ce qui nuit à l’infiltration et à la rétention d’eau par les racines des plantes. Un rapport élevé de sodium (mesuré par le Sodium Adsorption Ratio, SAR) peut causer des problèmes d’alcalinisation et de déstructuration du sol, surtout si le SAR dépasse 9. Des valeurs de SAR entre 0 et 6 sont généralement acceptables, tandis que des valeurs entre 6 et 9 nécessitent une surveillance régulière du sol (Ayers & Westcot, 1985 ; FAO,1985).

- **Calcium (Ca^{2+}) et Magnésium (Mg^{2+})** : Ces ions contribuent à la dureté de l'eau et jouent un rôle positif en maintenant la structure du sol en compétition avec le sodium. Ils aident à stabiliser les particules du sol et à prévenir la dispersion causée par le sodium. Leur présence est donc bénéfique pour l'irrigation, mais leur concentration doit être équilibrée avec celle du sodium (Ayers & Westcot., 1985 ; FAO, 1994).
- **Chlorures (Cl^-)** : Les chlorures, souvent en forte concentration, peuvent causer un goût salé à l'eau et, en combinaison avec un sodium élevé, ils peuvent être toxiques pour certaines cultures sensibles. Ils contribuent également à la salinité totale de l'eau, ce qui peut provoquer des brûlures racinaires et affecter la croissance des plantes (Ayers & Westcot., 1985 ; FAO, 1994).
- **Bicarbonates (HCO_3^-)** : Les bicarbonates influencent l'alcalinité de l'eau, ce qui affecte le pH et la capacité tampon de l'eau. Un excès de bicarbonates peut causer des problèmes d'alcalinisation du sol, surtout en présence de sodium élevé, car ils favorisent la formation de carbonates qui précipitent le calcium, réduisant ainsi sa disponibilité et aggravant les effets du sodium (Richards, 1954 ; Ayers & Westcot., 1985).
- **Sulfates (SO_4^{2-})** : Les sulfates sont généralement moins problématiques que les chlorures mais contribuent aussi à la salinité totale. Leur concentration doit être surveillée pour éviter un excès de sels dans le sol (Bauder et al., 2011 ; Wilcox, 1955).
- **La conductivité électrique (CE)** : La conductivité électrique est une mesure indirecte de la salinité de l'eau, exprimée en mS/cm (millisiemens par centimètre). Elle reflète la concentration totale des ions dissous dans l'eau. Une CE élevée indique une forte salinité, ce qui augmente la pression osmotique dans le sol et empêche les racines d'absorber l'eau, provoquant une sécheresse physiologique même si le sol semble humide. Cela peut entraîner un flétrissement des plantes et une réduction de la productivité agricole. Une eau d'irrigation avec une CE élevée peut causer des problèmes de toxicité saline, brûlures racinaires, ainsi que l'accumulation de sels dans le sol, ce qui entrave le développement des plantes.

La CE est souvent utilisée conjointement avec des indices comme le SAR pour évaluer la qualité de l'eau et ses effets potentiels sur le sol et les cultures (Richards, 1954 ; FAO, 1994).

Tableau 3.1. Classification de la qualité des eaux d'irrigation selon la conductivité électrique (CE) (Ayers & Westcot, FAO, 1985 ; Richards, 1954)

Classe de salinité	CE (dS/m à 25°C)	Qualité de l'eau d'irrigation	Effets potentiels sur les cultures et les sols
C1	< 0,25	Excellente – faible salinité	Convient à presque toutes les cultures et tous les sols
C2	0,25– 0,75	Bonne – salinité modérée	Utilisable pour la plupart des cultures avec un lessivage modéré
C3	0,75– 2,25	Qualité moyenne à douteuse – salinité élevée	Peut affecter les cultures sensibles ; nécessite un drainage adéquat
C4	2,25– 5,00	Mauvaise – très forte salinité	Utilisable seulement pour les cultures tolérantes au sel
C5	> 5,00	Très mauvaise – salinité excessive	Eau impropre à la plupart des usages agricoles

La qualité des eaux souterraines pour l'irrigation dépend fortement des concentrations relatives de Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} et de la conductivité électrique. Leur équilibre influence directement la salinité, la sodicité, l'alcalinité et la dureté de l'eau, des paramètres essentiels pour la qualité des sols et la performance des cultures agricoles. Une gestion adaptée et un suivi régulier de ces paramètres sont essentiels pour assurer une irrigation durable et éviter la dégradation des sols.

3.4. Les Indices de Qualité des Eaux

3.4.1. Principe général des indices de qualité de l'eau

Les indices de qualité de l'eau (Water Quality Indices : WQI) sont des outils synthétiques qui permettent de résumer en une seule valeur la qualité globale d'un échantillon d'eau (Horton, 1965 ; Brown et al., 1970). Il a été largement utilisé dans de nombreuses études, pour évaluer la qualité des eaux souterraines et de surface à diverses fins (eau potable, irrigation et industrie) (Sahu & Sikdar, 2008 ; Tyagi et al., 2013).

Cet indice (WQI) constitue un outil d'évaluation synthétique permettant de transformer un ensemble complexe de données physico-chimiques et/ou biologiques, en une valeur numérique unique. Cette approche simplifie considérablement l'interprétation de la qualité de l'eau, tant pour les scientifiques que pour les gestionnaires et décideurs (Abbasnia et al., 2019 ; Uddin et al., 2021).

3.4.2. Étapes fondamentales de développement des WQI

Abbasi (2012) a synthétisé la conception des WQI en quatre étapes fondamentales, qui sont devenues une référence dans l'évaluation de la qualité des eaux :

- **Sélection des paramètres de qualité de l'eau**

Choix des paramètres physico-chimiques, biologiques ou bactériologiques pertinents à inclure dans l'indice, en fonction de l'objectif de l'évaluation (potabilité, irrigation, vie aquatique, etc.). La sélection doit être adaptée au contexte local et à la disponibilité des données.

- **Obtention des sous-indices (sub-indices)**

Transformation des valeurs brutes des paramètres en sous-indices sans unité, normalisés sur une même échelle commune (par exemple de 0 à 100).

- **Attribution des poids (pondérations) aux paramètres**

Affectation d'un poids relatif à chaque paramètre selon son importance pour l'évaluation entière de la qualité de l'eau. Les poids reflètent la participation de chaque paramètre à la qualité de l'eau et peuvent être déterminés par expertise locale ou méthodes statistiques. La somme des poids est généralement égale à 1.

- **Agrégation des sous-indices pour calculer le WQI final**

Combinaison des sous-indices pondérés par une fonction d'agrégation (souvent additive) pour obtenir un indice unique. Par exemple, la formule additive classique est :

$$WQI = \sum_{i=1}^n w_i S_i \quad (3.1)$$

Où w_i est le poids du paramètre i et S_i son sous-indice.

3.4.3. Catégorisation des WQI en fonction de leur approche méthodologique

Selon Abbasi (2012), les indices de qualité des eaux (WQI) peuvent être classés en plusieurs catégories, en fonction de leur méthodologie de calcul et de leur domaine d'application :

- **Indices génériques** : Ces indices sont construits à partir de paramètres standards communément utilisés pour évaluer la qualité globale de l'eau, tels que le pH, l'oxygène dissous, la turbidité ou encore la concentration en métaux lourds. Ils visent à fournir une vue d'ensemble de l'état de la ressource hydrique. Parmi les exemples les plus connus figurent le **NSF-WQI** (National Sanitation Foundation Water Quality Index) et l'**OWQI** (Oregon Water Quality Index).
- **Indices spécifiques** : Développés pour répondre à des besoins particuliers, ces indices se concentrent sur les critères de qualité liés à un usage donné, comme l'eau potable, l'irrigation agricole ou la protection des écosystèmes aquatiques. Le **CCME-WQI** (Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index) est un exemple largement utilisé pour les eaux destinées à la consommation humaine ou à la vie aquatique. Le **Bascaron WQI**, quant à lui, est spécifiquement conçu pour évaluer la qualité des eaux de baignade.
- **Indices statistiques ou intelligents** : Ces approches modernes s'appuient sur des techniques d'analyse de données avancées pour modéliser la complexité et l'incertitude inhérentes aux systèmes hydriques. Elles intègrent des méthodes telles que l'analyse en composantes principales (**ACP**), les réseaux de neurones

artificiels ou encore la logique floue. Des exemples représentatifs incluent le **Minimax Fuzzy Inference WQI** et l'Entropy Weight Water Quality Index (**EWQI**).

3.4.4. Justification du choix de l'indice IWQI

La sélection d'un indice d'évaluation de la qualité des eaux est étroitement liée aux objectifs particuliers de la recherche, ainsi qu'à la nature et à la disponibilité des données analytiques disponibles. Dans le cadre de la présente recherche portant sur l'évaluation de la qualité des eaux souterraines autour du lac Fetzara à des fins d'irrigation, l'indice retenu est celui développé par Meireles et al. (2010), connu sous l'appellation Irrigation Water Quality Index (IWQI).

Ce choix repose sur plusieurs raisons fondamentales :

- **Adéquation avec l'objectif de l'étude** : L'indice IWQI est spécifiquement conçu pour évaluer la suitability des eaux souterraines à l'irrigation, ce qui correspond précisément à la problématique agricole de la région du lac Fetzara, où près d'un tiers de la superficie du bassin versant est utilisé à des fins agricoles.
- **Simplicité et efficacité méthodologique** : L'indice IWQI permet une intégration synthétique de plusieurs paramètres majeurs influençant la qualité des eaux pour l'irrigation. Il transforme des valeurs individuelles de paramètres chimiques en un score global facilement interprétable, facilitant la prise de décision en gestion des ressources hydriques.
- **Disponibilité des données** : Les données collectées lors de la campagne de 2015 incluent précisément les paramètres requis pour le calcul du IWQI.
- **Reconnaissance scientifique et application dans des contextes similaires** : L'indice IWQI est largement utilisé dans la littérature scientifique pour des études en climat semi-aride, notamment dans des régions présentant des problématiques comparables à celle de l'Algérie nord-est. Sa robustesse et sa flexibilité ont été démontrées dans plusieurs travaux antérieurs.

3.5. Indice de qualité des eaux d'irrigation IWQI

Indice de qualité de l'eau pour l'irrigation (IWQI), développé par Meireles et al en 2010, est une méthode spécifique d'évaluation de l'aptitude des eaux à l'irrigation agricole. Il repose sur l'intégration de plusieurs paramètres en un indicateur synthétique, facilitant ainsi la classification rapide et objective des eaux selon leur compatibilité avec les sols et les cultures. Ce procédé permet également de tenir compte des effets cumulés à long terme, notamment ceux liés à la salinisation ou à la sodicité.

Contrairement à d'autres indices classiques, l'IWQI adopte une approche pondérée qui prend en considération des facteurs essentiels tels que la conductivité électrique, le rapport sodium-absorption (SAR), et les concentrations en ions majeurs, ce qui le rend particulièrement adapté aux zones agricoles à climat semi-aride ou méditerranéen, comme celle du lac Fetzara. Son efficacité et sa simplicité d'interprétation expliquent son adoption croissante dans de nombreuses études (Meireles et al., 2010 ; Ayers & Westcot, 1994 ; Ramesh et al., 2019).

Afin de mieux comprendre les étapes de calcul d'un indice de qualité de l'eau (WQI), Il est pertinent de présenter de manière schématique le processus de construction. La figure ci-dessous illustre la structure générale d'un modèle WQI, depuis la sélection des paramètres jusqu'à l'obtention de la valeur finale de l'indice.

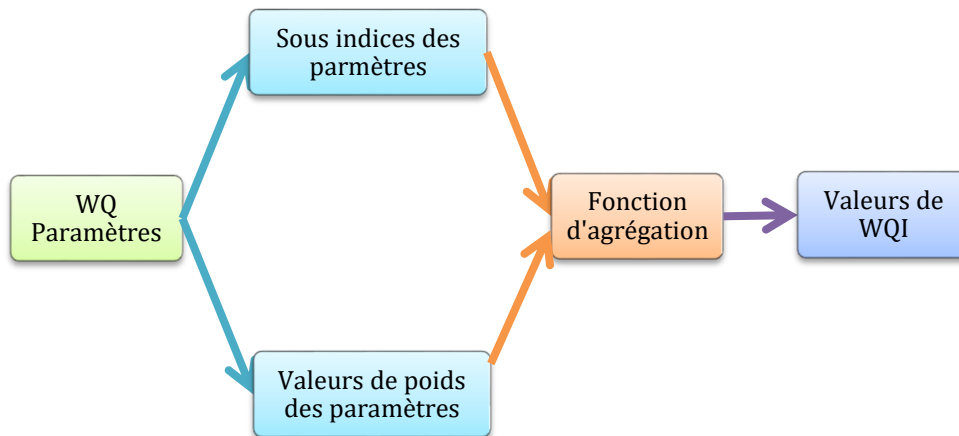


Figure 3.2. Processus de calcul de l'indice de qualité des eaux WQI (élaborée par l'auteure, 2026)

La méthode de Meireles repose sur une normalisation des paramètres de qualité de l'eau par rapport à des seuils critiques définis pour l'irrigation. Le calcul de l'indice IWQI implique plusieurs étapes :

Dans un premier temps, les variables influençant et contrôlant la qualité de l'eau à usage agricole sont déterminées, à savoir : la conductivité électrique (CE), les concentrations en sodium (Na^+), chlorures (Cl^-), bicarbonates (HCO_3^-), ainsi que le rapport d'absorption du sodium (SAR). Les concentrations initialement exprimées en [mg/L] ont été converties en [meq/L].

Dans un second temps, le poids des paramètres de qualité de l'eau, qui comprend le facteur de pondération (w_i) et la valeur du paramètre de qualité (q_i), a été déterminé en fonction des valeurs individuelles de chaque paramètre, selon les critères proposés par Ayers, R. S., and Westcot, D. W. Les valeurs de q_i correspondant aux cinq indicateurs de qualité de l'eau pour l'irrigation (q_{CE} , q_{SAR} , q_{Na^+} , q_{Cl^-} et $q_{\text{HCO}_3^-}$) ont été calculées à l'aide de l'équation (3.2).

$$q_i = q_{i\max} - \left[\frac{(x_{ij} - x_{i\inf})}{x_{i\text{amp}}} * q_{i\text{amp}} \right] \quad (3.2)$$

Où :

q_i : valeur limite du paramètre pour l'évaluation de la qualité ;

$q_{i\max}$: valeur maximale de la classe correspondante de q_i ;

x_{ij} : valeur observée du paramètre ;

$x_{i\inf}$: limite inférieure de la classe à laquelle appartient le paramètre ;

$q_{i\text{amp}}$: amplitude de la classe de q_i ;

$x_{i\text{amp}}$: amplitude de la classe à laquelle appartient le paramètre.

La limite supérieure a été prise comme égale à la valeur maximale calculée lors de l'analyse des données de qualité de l'eau, pour déterminer la valeur ($x_{i\text{amp}}$) de la classe finale pour chaque élément du Tableau 3.1.

Selon Meireles et al. (2010), le poids cumulatif (w_i) est déterminé à partir du Tableau 3.2, où les valeurs de w_i ont été normalisées, de sorte que leur somme soit égale à 1.

Enfin, l'équation (3.3) est utilisée pour déterminer l'indice de qualité de l'eau (IWQI).

$$IWQI = \sum_{i=1}^5 q_i * w_i \quad (3.3)$$

L'(IWQI) est une valeur non dimensionnelle comprise entre 0 et 100. Selon le Tableau 3.1, plus la valeur de l'(IWQI) est élevée, plus la qualité de l'eau est bonne pour chaque échantillon.

Tableau 3.2. Valeur limite du paramètre de mesure de la qualité de l'eau (q_i) (Ayers,1985).

q_i	E.C ($\mu\text{s/m}$)	SAR (mmol.^{-1}) ^{0.5}	Na ⁺ (meq/L)	Cl ⁻ (meq/L)	HCO ₃ ⁻ (meq/L)
85-100	[200 ;750)	[2 ;3)	[2 ;3)	[1 ;4)	[1 ;1.5)
60-85	[750 ;1500)	[3 ;6)	[3 ;6)	[4 ;7)	[1. ;4.5)
35-60	[1500 ;3000)	[6 ;12)	[6 ;9)	[7 ;10)	[4.5 ;8.5)
0-35	EC < 200 or EC ≥ 3000	SAR < 2 or SAR ≥ 12	Na < 2 or Na ≥ 9	Cl <1 or Cl ≥ 10	HCO ₃ <1 or HCO ₃ ≥ 8.5

Rapport d'adsorption du sodium (SAR) : Le rapport d'adsorption du sodium (Sodium Adsorption Ratio – SAR) est un indicateur essentiel utilisé pour évaluer le risque de sodisation des sols lors de l'irrigation. Il permet de quantifier l'équilibre entre les cations bivalents (calcium et magnésium) et le sodium présent dans l'eau. Un excès de sodium par rapport au calcium et au magnésium peut entraîner une dispersion des particules du sol, réduisant ainsi son infiltration et sa perméabilité. Le SAR est calculé selon la formule suivante, avec les concentrations exprimées en milléquivalents par litre (meq/L) (Richards, 1954 ; Ayers & Westcot, 1985).

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{([Ca^{2+}] + [Mg^{2+}])}{2}}} \quad (3.4)$$

Tableau 3.3. Poids des paramètres de l’IWQI (w_i) adoptés de (Meireles et al., 2010).

Parameters	w_i
EC	0.211
SAR	0.189
Na ⁺	0.204
Cl ⁻	0.194
HCO ₃ ⁻	0.202
Total	1

Face à la pression croissante sur les ressources en eaux souterraines, les techniques de machine learning ont été explorées pour prédire l’IWQI avec une grande précision. Cette approche permet de réduire le recours à des analyses en laboratoire coûteuses et de faciliter une évaluation en temps réel de la qualité de l’eau.

3.6. Application du Machine Learning pour la prédiction de la qualité de l’eau

3.6.1. Contexte et justification

L’évaluation de la qualité de l’eau à l’aide de méthodes traditionnelles en laboratoire est souvent longue et coûteuse. Pour surmonter ces limitations, les avancées récentes en intelligence artificielle, notamment les techniques d’apprentissage automatique (machine learning), offrent une alternative prometteuse pour une évaluation précise et efficace de la qualité de l’eau (Sidek et al., 2024). Les modèles d’apprentissage automatique ont été largement appliqués dans diverses études antérieures (Ahmed et al., 2019 ; Trabelsi et al., 2022 ; Bouhali et al., 2022 ; Sidek et al., 2024 ; Dabire et al., 2024 ; Mo et al., 2024), notamment pour la prédiction de la qualité des eaux souterraines, démontrant leur capacité à analyser des ensembles de données complexes, à détecter des relations non linéaires entre les variables et à améliorer la précision des prédictions.

Cette section vise principalement à élaborer des modèles prédictifs de l'indice de qualité de l'eau pour l'irrigation (IWQI) en s'appuyant sur les données issues des eaux souterraines. L'utilisation des techniques d'intelligence artificielle (IA) pour estimer l'IWQI permet d'améliorer l'efficacité des programmes de surveillance, de diminuer les coûts liés aux analyses, et d'offrir des outils d'aide à la décision pour une gestion durable des ressources hydriques. Dans notre étude, Nous avons utilisé quatre algorithmes de machine learning : la régression linéaire (LR), la régression par vecteurs de support (SVR), les arbres de décision (DT) et XGBoost pour modéliser l'indice de qualité de l'eau d'irrigation (IWQI) sur la base de paramètres hydrochimiques collectées de 37 puits situés autour du lac Fetzara. Les paramètres d'entrée utilisées dans les modèles comprennent la conductivité électrique (EC), le chlorure (Cl^-), le sulfate (SO_4^{2-}), le bicarbonate (HCO_3^-), le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}) et le sodium (Na^+).

3.6.2. Prétraitement des données

Avant l'application des modèles de Machine Learning, les données hydrochimiques collectées à partir des puits situés autour du lac Fetzara ont fait l'objet d'un prétraitement afin d'améliorer la qualité des données et d'optimiser les performances prédictives des modèles. Cette étape est considérée comme essentielle dans les études de modélisation environnementale, car la présence de valeurs aberrantes, les disparités d'échelle entre les variables ainsi que les données incomplètes peut fortement influencer la précision des prédictions (Han et al., 2012 ; Géron, 2019).

Les données recueillies ont d'abord été vérifiées afin d'identifier d'éventuelles incohérences analytiques ou valeurs extrêmes susceptibles d'altérer l'apprentissage des modèles. Par la suite, une standardisation des données a été réalisée afin d'harmoniser les échelles des variables et de réduire l'influence disproportionnée des paramètres présentant de fortes amplitudes numériques, notamment la conductivité électrique et les concentrations ioniques. Cette étape améliore la convergence des algorithmes d'apprentissage et augmente leur stabilité statistique (Bishop, 2006).

Par ailleurs, l'ensemble des données a été subdivisé en deux groupes distincts : une base d'apprentissage destinée à l'entraînement des modèles et une base de test utilisée

pour l'évaluation de leurs performances prédictives. Cette séparation permet de vérifier la capacité du modèle à généraliser les relations entre les paramètres hydrochimiques et l'indice IWQI sur des données non utilisées lors de l'apprentissage, réduisant ainsi le risque de surapprentissage (overfitting) (Goodfellow et al., 2016).

3.6.3. Approche méthodologique du Machine Learning

Le processus de modélisation adopté dans cette étude repose sur plusieurs étapes successives visant à développer un modèle prédictif fiable de l'indice IWQI des eaux souterraines du lac Fetzara. Après le prétraitement des données, les variables sélectionnées ont été introduites dans les modèles de Machine Learning afin d'établir des relations quantitatives entre les caractéristiques hydrochimiques des eaux et l'indice de qualité pour l'irrigation.

Les modèles ont été entraînés à partir de la base d'apprentissage, permettant aux algorithmes d'identifier les relations linéaires et non linéaires entre les paramètres d'entrée et la variable cible (Breiman, 2001 ; Cortes & Vapnik, 1995). Une fois l'apprentissage terminé, les modèles ont été appliqués à la base de test afin de prédire les valeurs de l'IWQI et d'évaluer leurs performances.

La qualité des prédictions a été analysée à l'aide de plusieurs indicateurs statistiques, notamment le coefficient de détermination (R^2), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'erreur absolue moyenne (MAE), largement utilisés dans les études de modélisation environnementale et hydrologique (Willmott & Matsuura, 2005). Ces indicateurs permettent d'estimer la capacité des modèles à reproduire fidèlement les variations spatiales et saisonnières de la qualité des eaux souterraines.

L'ensemble de cette démarche méthodologique permet ainsi d'exploiter les capacités du Machine Learning pour améliorer la prédiction de l'IWQI et faciliter l'évaluation de la qualité des eaux destinées à l'irrigation dans les zones humides soumises aux phénomènes de salinisation, comme le lac Fetzara.

Le schéma suivant illustre les différentes étapes du processus, de la collecte des données à la prédiction du WQI, en passant par l'entraînement et l'évaluation du modèle.



Figure 3.3. Étapes du Machine Learning pour la Prédiction de l'indice de qualité de l'eau (élaborée par l'auteure, 2026)

3.6.4. Méthodes de machine Learning adoptées

Les algorithmes sélectionnés ont été amplement appliqués dans le domaine de la prédiction de la qualité de l'eau, démontrant des résultats remarquables. Les algorithmes de régression supervisée utilisés dans notre étude sont les suivants :

- **Régression linéaire (LR)** : Méthode statistique qui modélise la relation entre les variables explicatives et la variable cible à l'aide d'une équation linéaire. Bien que simple, elle constitue une base de référence utile pour comparer les performances (Montgomery et al., 2012).
- **Support Vector Regression (SVR)** : Méthode basée sur les noyaux, capable de capturer des relations non linéaires entre les variables en projetant les données dans un espace de dimensions supérieures, ce qui permet d'optimiser les performances prédictives (Smola & Schölkopf, 2004).

- **Arbre de décision (DT)** : Une fois entraîné, l'algorithme évalue l'ensemble des paramètres d'entrée pertinents pour générer une prédiction. Il utilise le concept d'entropie pour identifier la variable racine, puis examine les autres paramètres selon cette hiérarchie. Structuré de manière hiérarchique, l'arbre prend des décisions à chaque nœud, menant à un résultat final en fonction des valeurs des paramètres (Quinlan, 1990).
- **XGBoost (Extreme Gradient Boosting)** : Algorithme de boosting d'arbres de décision évolutif, conçu pour optimiser à la fois la précision et les performances de calcul. Il construit un ensemble d'arbres de décision de manière séquentielle, en minimisant une fonction de perte régularisée afin d'améliorer la performance prédictive. XGBoost est particulièrement adapté aux grands ensembles de données, gère efficacement les valeurs manquantes et les relations complexes non linéaires, tout en réduisant le surapprentissage grâce à la régularisation. Son traitement parallèle et son optimisation de la mémoire en font un modèle puissant pour les tâches de régression à haute dimension, telles que la prédiction de l'indice de qualité de l'eau (WQI) (Chen & Guestrin, 2016).

Comparaison des modèles de régression pour la prédiction de l'WQI

Le choix de l'algorithme est une étape déterminante pour la précision de la modélisation. La **Régression Linéaire** est souvent utilisée comme modèle de référence en raison de sa grande interprétabilité et de sa simplicité de calcul. Cependant, ce modèle suppose une relation linéaire entre les variables, ce qui peut limiter sa performance face à la complexité des interactions ioniques dans les eaux (James et al., 2013). À l'opposé, les **Arbres de Décision** offrent une approche non paramétrique capable de capturer des relations non linéaires par partitionnement récursif des données. Bien qu'ils soient faciles à visualiser, ils présentent un risque élevé de surapprentissage (overfitting), particulièrement sur des jeux de données de taille restreinte (Quinlan, 1986).

Le **SVM (Support Vector Machine)** se distingue par sa robustesse et sa capacité à traiter des données de haute dimension grâce à l'utilisation de fonctions noyaux (kernels),

qui permettent de projeter les données dans des espaces de dimension supérieure pour faciliter la régression (Vapnik, 1995). Enfin, **XGBoost (Extreme Gradient Boosting)** représente l'état de l'art en matière de performance pour les données tabulaires. En tant qu'algorithme de boosting, il construit de manière itérative une suite d'arbres de décision, où chaque nouvel arbre corrige les erreurs de prédiction des précédents, offrant ainsi une précision supérieure et une excellente gestion des résidus (Chen & Guestrin, 2016).

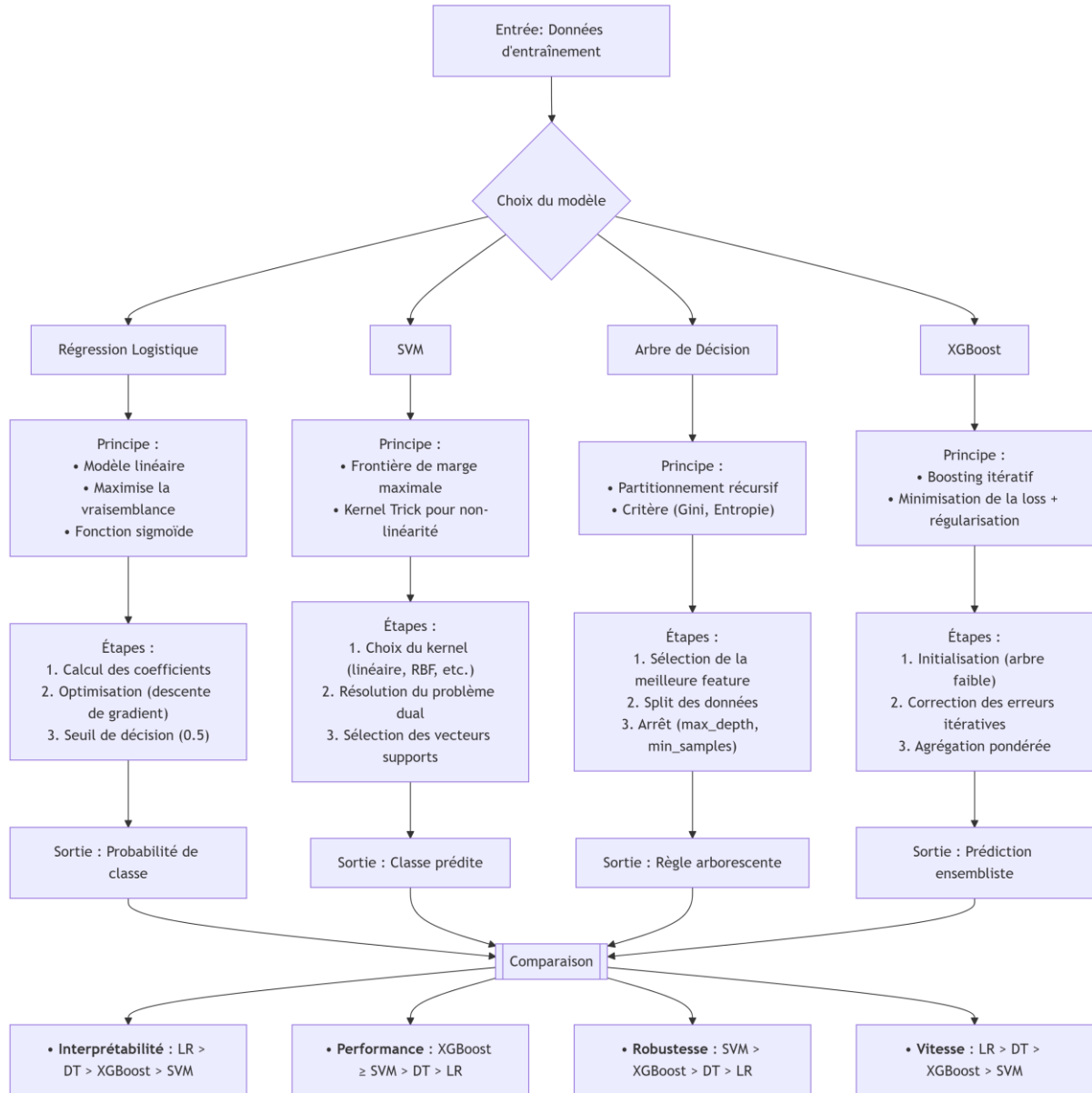


Figure 3.4. Schéma comparatif des Algorithmes de Machine Learning utilisés (élaborée par l’auteure, 2026)

3.6.5. Critères d'évaluation du modèle

Pour évaluer l'efficacité des modèles d'apprentissage automatique, plusieurs mesures de performance ont été utilisées, en se concentrant sur la précision de la régression et la minimisation de l'erreur :

- **Erreur absolue moyenne (MAE)** : Figure les différences absolues moyennes entre les valeurs prédites et observées, fournissant une mesure intuitive de la précision de la prédiction (Jatoi et al., 2023), ce qui en fait une mesure utile pour évaluer les modèles de régression, y compris ceux utilisés dans la surveillance de la qualité de l'eau et d'autres applications. L'erreur de prédiction (MAE) est calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$MAE = \frac{\sum (|x_{obs} - x_{pred}|)}{n}$$

- **Erreur quadratique moyenne racine (RMSE)** : En complément de l'erreur absolue moyenne (MAE), l'erreur quadratique moyenne racine (RMSE) a été utilisée afin de ramener les valeurs de l'erreur quadratique moyenne (MSE) à l'échelle des données observées. Le RMSE, défini comme la racine carrée de la MSE, permet une évaluation plus précise de la performance du modèle en tenant compte de l'ampleur des erreurs. Il est calculé selon l'équation suivante $RMSE = \sqrt{MSE}$, où une valeur de RMSE plus faible indique une meilleure performance du modèle (Rahu et al., 2024).

- **Erreur quadratique moyenne (MSE)** : Elle est calculée en divisant la somme des carrés des écarts entre les valeurs prédites et les valeurs observées par le nombre total de prédictions. L'équation utilisée est :

$$MSE = \frac{\sum (x_{obs} - x_{pred})^2}{n}$$

- **Coefficient de détermination (R^2)** : Le coefficient de détermination, couramment noté R^2 , est une mesure statistique qui évalue la proportion de la variance de la variable cible expliquée par le modèle de régression.

Une valeur de R^2 élevée indique une forte corrélation entre les valeurs observées et prédites, traduisant une meilleure capacité du modèle à représenter la variabilité des données (Menard, 2000).

En comparant ces différentes métriques, le modèle d'apprentissage automatique offrant les meilleures performances a été identifié sur la base de sa capacité à prédire avec précision l'indice de qualité de l'eau d'irrigation (IWQI), garantissant ainsi une évaluation fiable et robuste de la qualité des eaux.

Cette double approche méthodologique vise à améliorer l'interprétation des données hydrochimiques et à proposer un outil de gestion optimisé des ressources en eaux souterraines dans la région du lac Fetzara.

3.7. Conclusion

Ce chapitre a présenté en détail la méthodologie optée pour l'évaluation de la qualité des eaux souterraines dans la région du lac Fetzara. L'approche repose sur une combinaison pertinente entre des techniques d'analyse traditionnelles et des outils innovants d'intelligence artificielle. D'une part, les analyses hydrochimiques ont permis de quantifier les paramètres essentiels influençant la qualité des eaux d'irrigation. D'autre part, le recours à l'indice IWQI a offert une synthèse intégrée de ces paramètres, facilitant l'interprétation des résultats.

Parallèlement, l'intégration de méthodes de machine learning (régression linéaire, SVR, arbre de décision et XGBoost) a permis de modéliser et de prédire cet indice avec une précision accrue. Cette approche hybride, à la fois descriptive et prédictive, renforce la rigueur scientifique de l'étude en assurant une évaluation complète, reproductible et adaptée aux enjeux de gestion durable de la ressource. Ainsi, la méthodologie développée constitue une base solide pour l'analyse des résultats présentés dans le chapitre suivant et offre des perspectives concrètes pour l'application de l'intelligence artificielle dans le domaine.

CHAPITRE 4 : RESULTATS, ANALYSE ET DISCUSSION

4.1. Introduction

Ce chapitre présente les résultats obtenus dans le cadre de l'évaluation de la qualité des eaux souterraines autour du lac Fetzara, à travers deux approches complémentaires : l'analyse hydrochimique traditionnelle à l'aide de l'indice IWQI et la modélisation prédictive par apprentissage automatique.

Les analyses ont porté sur des échantillons prélevés à partir de 37 puits durant les mois de mai à août 2015. Les différents paramètres ont été mesurés pour évaluer leur influence sur la qualité des eaux destinée à l'irrigation.

Dans une première étape, l'indice de qualité de l'eau pour l'irrigation (IWQI), développé par Meireles et al. (2010), a été calculé pour chaque échantillon afin de déterminer l'aptitude des eaux à l'usage agricole. Les résultats ont ensuite été interprétés à l'aide de la classification standard de l'IWQI, permettant d'identifier les niveaux de restriction d'usage en fonction des caractéristiques hydrochimiques et des concentrations ioniques des eaux souterraines.

Dans une seconde étape, une approche basée sur le Machine Learning a été mise en œuvre pour prédire l'IWQI à partir de 148 paramètres d'entrées. Quatre algorithmes de régression supervisée (Linear Regression, SVR, Decision Tree, XGBoost) ont été testés et comparés en fonction de leurs performances. L'algorithme XGBoost s'est distingué par sa précision prédictive supérieure.

Le but consistait à sélectionner le modèle présentant la meilleure performance et à mettre en évidence les variables les plus déterminantes, dans le but de développer un modèle optimisé capable de fournir des prédictions précises en utilisant un nombre réduit de paramètres, permettant ainsi de réduire le coût et le temps des analyses.

Ce chapitre est organisé autour de l'exposé des résultats d'analyse, de l'évaluation de la qualité des eaux à travers l'indice IWQI, ainsi que de la modélisation prédictive utilisant des techniques d'apprentissage automatique, et se termine par une discussion des résultats à la lumière de la littérature scientifique.

4.2. Caractérisation de la qualité des eaux souterraine du lac Fetzara

4.2.1. Analyse descriptive des données hydrochimiques

Dans le cadre de cette étude, des campagnes d'échantillonnage ont été effectués sur un réseau de 37 puits répartis autour du lac Fetzara, tel qu'illustré précédemment à la figure 3.1. Ces prélèvements ont été réalisés durant la période allant de mai à août 2015, afin de couvrir une variabilité saisonnière représentative.

Les paramètres mesurés incluent la conductivité électrique (EC), le sodium (Na^+), le magnésium (Mg^{2+}), le calcium (Ca^{2+}), le chlorure (Cl^-) et le bicarbonate (HCO_3^-). Ces éléments ont été sélectionnés en raison de leur pertinence dans l'évaluation de la qualité des eaux à usage agricole, notamment en ce qui concerne leur salinité et leur impact potentiel sur les sols et les cultures. Les résultats statistiques de base pour chacun de ces paramètres, à savoir les valeurs minimales, maximales, moyennes et les écarts-types, sont présentés dans le tableau 4.1 ci-dessous. Cette analyse descriptive constitue une première étape essentielle pour comprendre les tendances générales, détecter les éventuelles anomalies, et orienter les interprétations ultérieures concernant la qualité de l'eau et son adéquation pour l'irrigation.

Tableau 4.1 Statistiques descriptives des paramètres des paramètres mesurés

Mois	Variables	CE ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	Cl (mg/L)	HCO_3 (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Na (mg/L)
Mai	Minimum	276	35.5	54.9	33.6	0	46
	Maximum	4650	2201	1004.1	460.8	109.44	966
	Moyenne	1448.6	534.7	301.4	140.8	47.4	253.4
	Écart-type	939.39	434.42	164.23	84.13	31.59	224.84
Juin	Minimum	297	142	23.18	52	1.92	23
	Maximum	6800	2996.2	1091.9	648	192	1863
	Moyenne	1618.6	569.1	335.1	185.9	43.1	302
	Écart-type	1266.65	544.64	197.27	118.82	40.53	334.28

Juillet	Minimum	506	142	34.77	44	6.24	92
	Maximum	6620	2758.35	1284.53	672	144.98	1840
	Moyenne	1739.92	760.35	363.26	167.54	52.87	410.27
	Écart-type	1233.49	500.5	208.51	123.83	33.77	292.57
Aout	Minimum	334	120.7	64.05	56	0	46
	Maximum	6170	2002	1054.1	352	886.4	1725
	Moyenne	1595.03	530.28	369.63	146.24	74.77	295.89
	Écart-type	1176.71	457.24	210.66	68.01	147.52	323.01

Les résultats des analyses mettent en évidence une minéralisation marquée des eaux souterraines dans la région entourant le lac Fetzara. Cette minéralisation se traduit par des valeurs élevées de la conductivité électrique, dépassant fréquemment les 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ce qui indique une forte concentration en sels dissous.

L'identification du faciès chimique a été réalisée à partir de l'analyse comparative des concentrations des ions majeurs mesurés dans les eaux souterraines. Les résultats montrent une dominance des ions sodium (Na^+) parmi les cations et des ions chlorure (Cl^-) parmi les anions (Tableau 4.1). Cette prédominance du couple Na–Cl suggère un faciès hydrochimique de type chloruré sodique, généralement associé aux phénomènes de salinisation des eaux souterraines et à la dissolution des sels présents dans le milieu géologique (Freeze & Cherry, 1979 ; Todd & Mays, 2005).

Cette forte concentration en sels dissous s'explique par un double mécanisme :

- D'une part, l'infiltration des eaux de surface, enrichies en sels lors des périodes estivales marquées par une évaporation intense, contribue à la minéralisation des nappes. Dans les contextes climatiques méditerranéens subhumides à semi-arides, ce processus est particulièrement marqué. Comme le souligne Fekrache (2014), « l'évaporation agit comme un concentrateur naturel, augmentant la charge ionique des eaux de ruissellement avant leur infiltration vers les nappes ».

- D'autre part, la géologie locale joue un rôle amplificateur important. Les formations argileuses, dominées par des minéraux de type smectites, favorisent les processus d'échange cationique entre la matrice solide et les eaux infiltrées, impliquant principalement les ions Na^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} . Ce mécanisme contribue à l'enrichissement progressif des eaux en éléments dissous dans les systèmes aquifères (Bougherira, 2012).

4.2.2. Interprétation des résultats analytiques

- **Conductivité Électrique (CE)**

La conductivité électrique (CE) est un paramètre clé pour identifier les polluants dans l'eau, car elle constitue un indicateur efficace de la quantité de solides dissous dans les eaux souterraines. De plus, en mesurant la conductivité électrique, il est possible d'estimer la concentration en sels et minéraux présents dans ces eaux (Deshmukh, 2013). Les valeurs moyennes de la conductivité électrique (CE) obtenus varient entre 1448,6 et 1739,92 $\mu\text{S}/\text{cm}$, particulièrement en juillet où la CE atteint son maximum moyen sous l'effet de l'évaporation estivale et de la concentration des sels dissous. Plusieurs recherches expliquent la forte salinité des eaux de surface par diverses sources, notamment la dissolution des dépôts évaporitiques présents sous forme de lentilles, la dissolution des formations carbonatées du socle métamorphique localisé au nord et au nord-ouest du lac (massif de l'Edough), ainsi que les échanges d'ions entre les eaux souterraines et les formations argileuses (Debièche, 2002 ; Djabri et al., 2008).

- **Cations (Na^+ , Mg^{2+} et Ca^{2+})**

Les cations présents dans les eaux souterraines proviennent principalement de l'altération des roches sédimentaires et ignées ou des activités anthropiques. Lorsque l'eau s'infiltré à travers le sol pour atteindre la nappe phréatique, elle se charge en ions dissous (Basha et al., 2010 ; Lateef, 2011). Dans la région de Fetzara, les eaux souterraines sont généralement dures à très dures, avec des valeurs dépassant 320 mg/L. Cette forte minéralisation est liée à l'intense évapotranspiration durant la période estivale et au lessivage des formations géologiques argilo-marneuses et carbonatées par les eaux météoriques, favorisant l'enrichissement des eaux en ions calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) (Zahi, 2013).

- **Anions (Cl^- et HCO_3^-)** (Hem, 1985; Appelo & Postma, 2005)
 - **Chlorures (Cl^-)**

Les concentrations en chlorures (Cl^-) sont élevées et varient entre 534,7 mg/L et 760,35 mg/L. Cette augmentation estivale est liée principalement à l'intensification de l'évaporation et à la baisse de la recharge, entraînant une concentration des sels dans les eaux souterraines. Elle s'explique également par la nature géologique locale, dominée par des dépôts alluviaux argilo-marneux et des niveaux évaporitiques, riches en minéraux solubles (tels qu'halite et gypse), favorisant l'altération et la dissolution des roches et la libération des ions chlorure lors des processus d'interaction eau-roche.

- **Bicarbonates (HCO_3^-)**

Les teneurs en bicarbonates (HCO_3^-), comprises entre 301,4 et 369,63 mg/L, sont principalement issus :

- De la présence d'ions calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}).
- De la dissolution des roches carbonatées et du gypse.
- De la réaction entre le dioxyde de carbone (CO_2) et le carbonate de calcium (CaCO_3) dans l'eau.

4.3. Interprétation des résultats selon les normes FAO (Ayers & Westcot, 1985)

- **Conductivité Électrique (EC, $\mu\text{S}/\text{cm}$)**

Les valeurs moyennes de CE comprises entre 1448 et 1739 $\mu\text{S}/\text{cm}$, indiquent que l'eau est modérément salinisante. Cela signifie qu'elle peut être utilisée pour l'irrigation, mais avec des restrictions, surtout pour les cultures sensibles au sel. Une gestion adaptée (irrigation goutte-à-goutte, amélioration du drainage) est recommandée. Pour les cultures tolérantes, elle reste utilisable avec prudence.

- **Sodium (Na^+)**

Les teneurs moyennes en sodium (jusqu'à 410,27 mg/L) dépassent le seuil de 207 mg/L. Ce surplus de sodium menace non seulement la physiologie des plantes, mais risque également de dégrader la structure physique du sol par dispersion des argiles, qui peut affecter la perméabilité et l'infiltration.

- **Chlorures (Cl⁻)**

Les concentrations moyennes en chlorures (entre 530 et 760 mg/L) excède largement la limite critique de 350 mg/L, ce qui est potentiellement toxique pour les cultures sensibles (ex. : agrumes, haricots), provoquant des brûlures foliaires et des nécroses. Il faut envisager un apport d'eau de dilution si disponible ou des rotations de cultures tolérantes.

- **Bicarbonates (HCO₃⁻)**

Les teneurs moyennes en bicarbonates varient entre 301 et 369 mg/L, ce qui place ces eaux dans la catégorie de restriction modérée à sévère. Cela peut entraîner la précipitation du Ca²⁺ et Mg²⁺, ce qui augmente le SAR effectif de l'eau. Ce déséquilibre induit un risque de dégradation de la perméabilité et de la stabilité structurale du sol. Des solutions comme l'application de gypse ou d'acides peuvent être envisagées.

- **Calcium (Ca²⁺) et Magnésium (Mg²⁺)**

Le calcium et le magnésium sont présents en quantités relativement satisfaisantes, ces ions sont largement dominés par le flux de sodium et de chlorures. Selon la FAO, l'équilibre entre ces cations est insuffisant pour compenser le risque d'alcalinisation. Le calcul du SAR corrigé est ici indispensable pour évaluer précisément l'aptitude de ces eaux.

4.4. Évaluation de l'aptitude à l'irrigation par le diagramme de Richards (USSL)

Afin d'évaluer l'aptitude des eaux souterraines à l'irrigation, les résultats obtenus (Tableau 4.2) ont été interprétés à l'aide du diagramme de Richards (Richards, 1954). Cette méthode repose sur la combinaison de deux paramètres essentiels : la conductivité électrique (CE), représentant le degré de salinité de l'eau, et le Sodium Adsorption Ratio (SAR), traduisant le risque d'alcalinisation sodique des sols. Le diagramme (Figure 4.1) permet ainsi de classer les eaux selon leur niveau de salinité (classes C1 à C4) et leur danger sodique (classes S1 à S4), afin d'apprécier leurs effets potentiels sur les sols et les cultures irriguées.

Tableau 4.2 Données mensuelles de la CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) et du SAR des eaux souterraines utilisées pour le diagramme de Richards (élaborée par l’auteure, 2026)

Mois	Mai	Juin	Juillet	Aout
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1448.6	1618.6	1739.92	1595.03
SAR	4,71	5,18	7,07	4,96

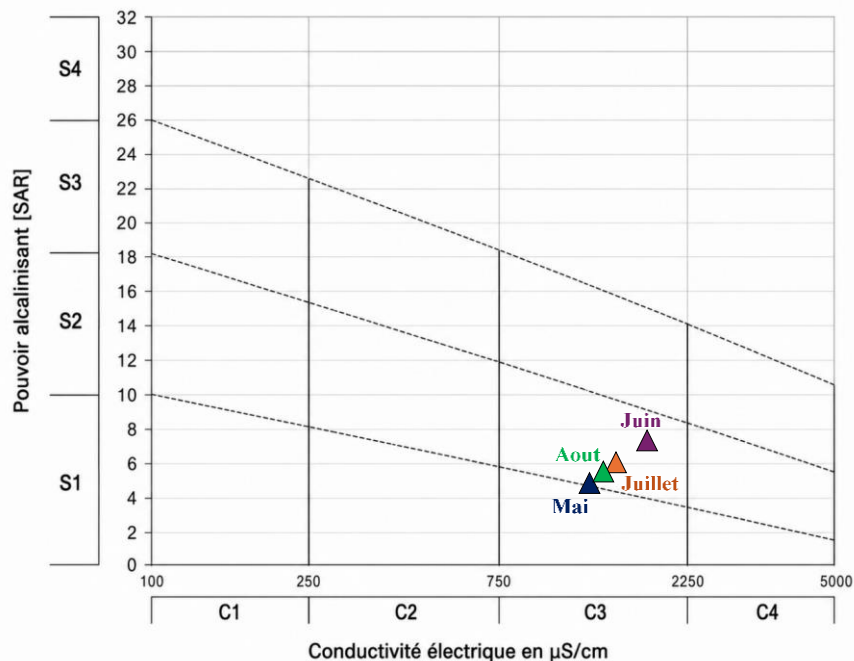


Figure 4.1. Classification des eaux souterraines du lac Fetzara selon le diagramme de Richards, USSL. (Élaborée par l’auteure, 2026)

Le diagramme de Richards appliqué aux échantillons prélevés autour du lac Fetzara est présenté dans la figure 4.1. Les points correspondant aux mois de Juin, Juillet et Août se situent principalement dans la classe (C3-S2), tandis que l’échantillon du mois de Mai tend vers une transition entre les classes (C3-S1) et (C3-S2).

Interprétation des résultats

L'analyse de la distribution des points montre une dégradation saisonnière marquée de la qualité des eaux de la nappe :

- Le mois de **Mai** (Classe **C3-S1**) : En début de saison, l'eau présente une salinité élevée (C3) associée à un faible risque d'alcalinisation (S1). À ce stade, l'eau peut être utilisée pour l'irrigation sur des sols bien drainés, moyennant un contrôle de la salinité.
- Les mois de **Juin, Juillet** et **Août** (Classe **C3-S2**) : Durant le reste de la période estivale, les eaux migrent vers la classe **C3-S2**. Cette évolution est critique car elle combine :
 - Un risque de **salinisation élevé (C3)** : Exigeant un lessivage important pour éviter le stress osmotique des plantes.
 - Un risque **d'alcalinisation modéré (S2)** : Cette catégorie indique que le sodium commence à dominer l'équilibre ionique. Il existe un danger réel de dispersion des argiles et de réduction de la perméabilité du sol, particulièrement dans les sols fins (argileux) de la plaine de Fetzara.

Recommandations pour l'usage agricole

L'utilisation de ces eaux (classes C3-S1 et C3-S2) nécessite une gestion technique rigoureuse pour préserver la pérennité des sols :

- **Correction chimique** : Un apport d'amendements calciques, tel que le gypse, est préconisé pour stabiliser la structure du complexe argilo-humique et limiter les risques d'alcalinisation liés à l'indice SAR élevé.
- **Suivi hydro-pédologique** : Une surveillance accrue de la perméabilité des sols est indispensable afin de prévenir les phénomènes de dispersion des argiles, susceptibles d'entraîner une asphyxie racinaire et une baisse des rendements.

4.5. Évaluation de la qualité des eaux par l'indice IWQI

L'indice de qualité des eaux d'irrigation (IWQI), proposé par Meireles et al. (2010), a été appliqué aux données recueillies afin d'évaluer l'aptitude des eaux souterraines à un usage agricole (Ikhlef, N., et al. 2023). Cette approche repose sur la pondération de plusieurs paramètres selon leur influence relative sur trois paramètres clés : la salinité, la sodicité et la toxicité vis-à-vis des sols et des cultures.

Ainsi, les concentrations en éléments minéraux dissous, telles que les cations (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) et les anions (Cl^- , HCO_3^-), sont analysées pour déterminer les effets potentiels sur les propriétés du sol et sur la croissance végétale.

Les résultats du calcul de l'IWQI ont ensuite été interprétés à l'aide de la classification établie par Meireles et al. (2010), présentée dans le Tableau 4.3, permettant de distinguer différents niveaux de qualité et de mettre en évidence les zones à risque élevé, où l'usage des eaux pour l'irrigation nécessite des intrusions correctives ou des précautions spécifiques.

Tableau 4.3. Classification de la qualité des eaux souterraines basée sur l'IWQI (Meireles et al., 2010)

IWQI	Restrictions d'usage	Recommandations Sol	Recommandations Plantes
85–100	Aucune restriction (NR)	Sauf pour les sols à très faible perméabilité, convient à la plupart des sols avec un faible risque de salinité et de sodicité. Une filtration est recommandée.	Aucun risque de toxicité pour la majorité des plantes.
70–85	Faible restriction (LR)	Convient aux sols légers ou à perméabilité modérée. Un lessivage est conseillé pour éviter la sodisation des sols lourds.	Risque accru pour les plantes sensibles au sel.
55–70	Restriction modérée (MR)	Utilisable sur des sols à perméabilité moyenne à élever avec un léger lessivage des sels.	Convient aux plantes tolérantes au sel.
40–55	Forte restriction (HR)	Nécessite un programme d'irrigation fréquent. Convient aux sols très perméables sans couches compactes.	À utiliser pour les plantes modérément à fortement tolérantes au sel, avec des pratiques de contrôle de la salinité.
0–40	Restriction sévère (SR)	Nécessite des sols très perméables et une irrigation abondante pour éviter l'accumulation de sel. L'ajout de gypse est recommandé. Ne pas utiliser en conditions normales.	Convient uniquement aux plantes très tolérantes au sel, sauf si les teneurs en Na, Cl et HCO_3 sont extrêmement faibles.

L'évaluation de la qualité des eaux des puits a permis de les classer en plusieurs catégories, comme illustré dans la figure 4.2 et le tableau 4.4. Cette classification repose sur la comparaison des valeurs de l'indice IWQI obtenues avec les seuils définis dans le tableau 4.3 permettant ainsi de déterminer le niveau d'aptitude de chaque échantillon à l'usage agricole.

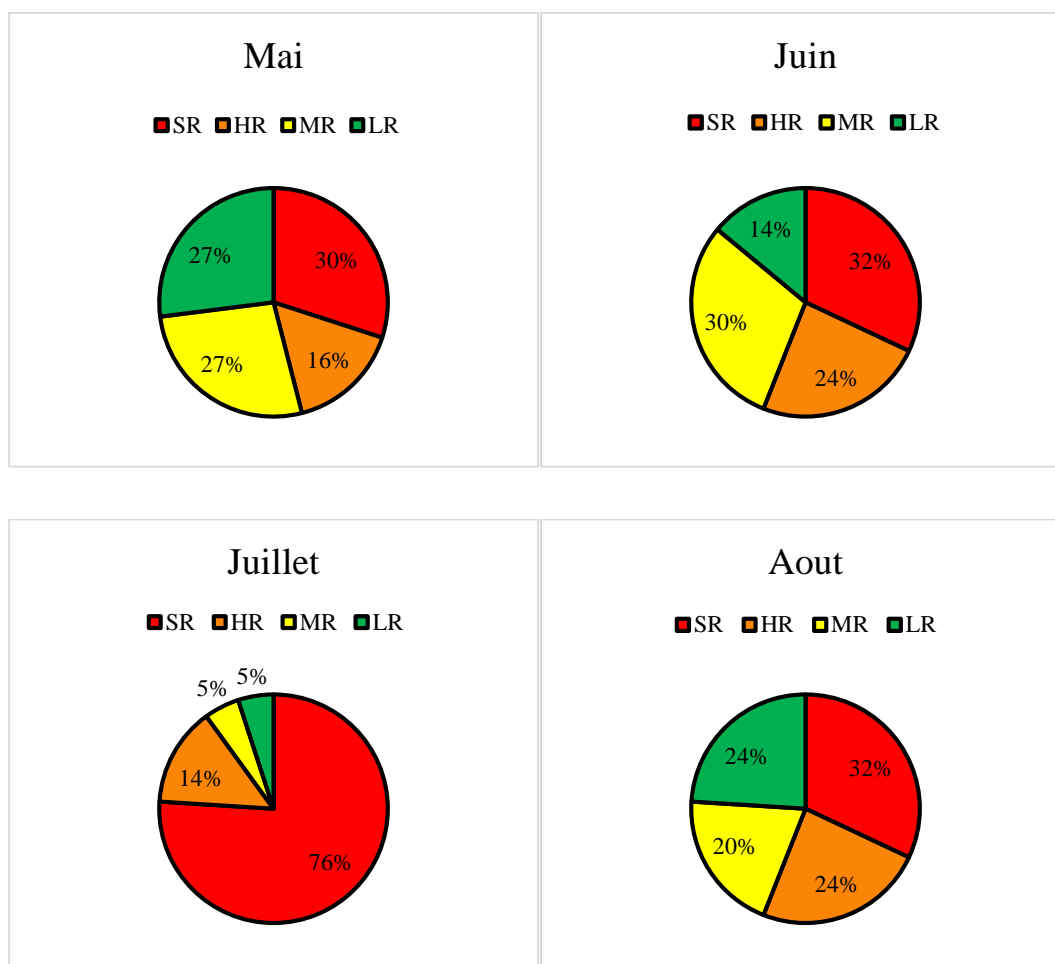


Figure 4.2. Classification de la qualité des eaux souterraines sur la base de l'IWQI (élaborée par l'auteure, 2026)

Les valeurs de l'indice IWQI ont été classées selon les quatre niveaux de restriction d'usage (faible, modérée, forte et sévère). Le tableau suivant (tableau 4.4) présente la répartition en pourcentage des eaux de puits dans chaque classe pour les mois de Mai à Août. Cette classification permet de mettre en évidence la variabilité temporelle de la qualité des eaux et l'évolution du degré de restriction d'usage.

Tableau 4.4 Répartition des classes de qualité des eaux de puits selon l'indice IWQI (Élaborée par l'auteure, 2026)

IWQI	Degré de restriction	Mai	Juin	Juillet	Aout
70–85	Faible (LR)	27%	14%	5%	24%
55–70	Modérée (MR)	27%	30%	5%	20%
40–55	Forte (HR)	16%	24%	14%	24%
0–40	Sévère (SR)	30%	32%	76%	32%

L'évaluation de la qualité des eaux souterraines pour l'irrigation autour du lac Fetzara, à travers l'indice IWQI (Meireles et al., 2010), révèle que sur l'ensemble de la période d'échantillonnage, allant de mai à août, une part importante des puits présente des indices situés dans les classes de qualité médiocre à très mauvaise, traduisant une forte à très forte restriction d'usage pour l'irrigation.

- ✚ En **Mai**, 30 % des puits se situent dans la catégorie de restriction sévère ($IWQI \leq 40$), et 16 % en restriction très élevée, suggérant une minéralisation importante des eaux en début de saison sèche. Les autres échantillons se répartissent entre les classes à restriction modérée (27 %) et légère (27 %).
- ✚ En **Juin**, la situation reste comparable : 32 % des puits relèvent de la classe SR, 30 % MR, 24 % HR, et seulement 14 % LR, témoignant d'une qualité toujours préoccupante.
- ✚ La situation se détériore nettement en **Juillet**, mois au cours duquel 76 % des puits présentent une qualité très mauvaise (SR), ce qui rend leur usage pour l'irrigation largement déconseillé sans traitement ou dilution. Ce phénomène pourrait être attribué à l'intensification de l'évaporation estivale, qui accentue la concentration des sels dans les nappes superficielles.
- ✚ En **Août**, une amélioration relative est observée : près de 32 % des puits restent en restriction sévère, mais 24 % atteignent des valeurs compatibles avec un usage modéré à léger, et plusieurs puits entrent dans les classes bonnes à excellente.

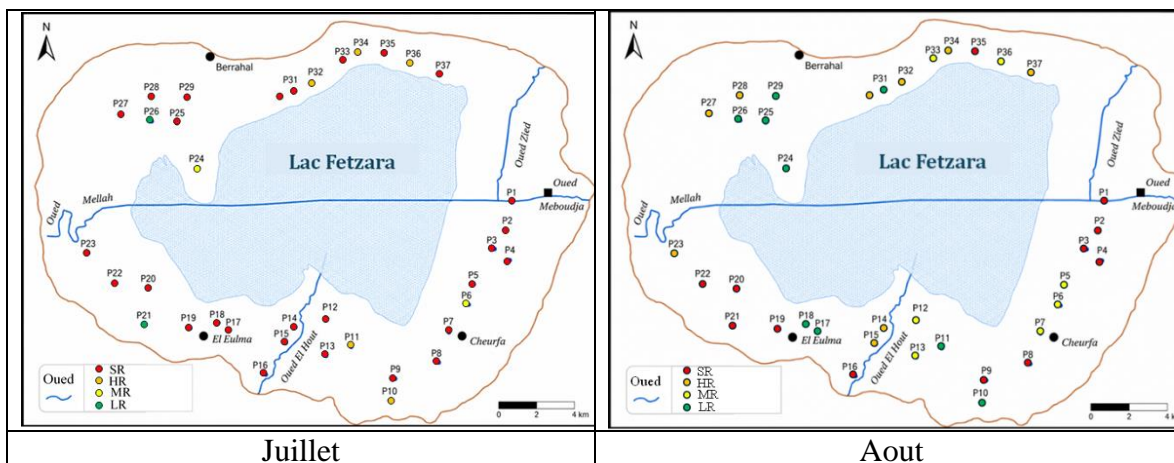


Figure 4.3. Variation de l’IWQI au cours des quatre mois pour chacun des puits
(Élaborée par l’auteure, 2026)

- **Déterminisme géologique et spatial**

Sur le plan spatial, les puits localisés dans les secteurs sud-est et nord-est du Lac Fetzara, notamment dans les zones de Cheurfa et d’Oued Zied, présentent les classes IWQI les plus dégradées, dominées par les restrictions sévères (SR) et fortes (HR). Cette répartition spatiale est étroitement liée aux caractéristiques géologiques et pédologiques de la région. La dépression du lac, comblée par des dépôts quaternaires argilo-limoneux et entourée de formations miocènes riches en flysch, grès et niveaux évaporitiques, favorise une minéralisation naturelle importante des eaux souterraines. La dissolution des formations riches en halite, gypse et carbonates ainsi que les échanges ioniques entre l’eau et les matrices argileuses entraînent un enrichissement des eaux en Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} et Mg^{2+} . Par ailleurs, la dominance des sols argileux limite le drainage naturel et favorise l’accumulation des sels par remontée capillaire, particulièrement dans les zones basses proches du lac.

- **Influence climatique et dynamique temporelle**

L’évolution temporelle de l’IWQI met en évidence l’influence du climat méditerranéen semi-aride sur la qualité des eaux souterraines. Une dégradation marquée est observée en en Juillet, où 76% des puits basculent en classe "Sévère" (SR), contre 30 % en Mai. Cette détérioration est liée à :

- La diminution des précipitations estivales, à l'augmentation des températures et à l'intensification de l'évaporation, qui atteint 153,9 mm en Juillet alors que les précipitations deviennent presque nulles (2,3 mm), les sels se concentrent dans la nappe phréatique.
- Le tarissement de la recharge : l'absence de recharge et de dilution par les eaux météoriques en période estivale exacerbe la salinité résiduelle.
- **Impact de l'Occupation du Sol**

L'influence de l'occupation du sol se superpose aux facteurs naturels. Le tiers de la superficie étant dédié à une agriculture intensive (maraîchage, agrumes), implique une forte demande en eau d'irrigation, particulièrement durant la saison sèche. Cette pression hydrique, associée au pompage intensif, contribue au rabattement de la nappe phréatique et favorise la concentration des sels dissous. Elle peut également induire la remontée d'eaux plus minéralisées issues des horizons profonds, accentuant ainsi la salinisation des eaux souterraines. Les zones de pâturages et de zones humides autour du lac, par leur topographie basse, agissent comme des réceptacles de drainage où s'accumulent les chlorures et les nitrates issus du lessivage des terres agricoles périphériques.

- **Conclusion de l'analyse**

La qualité des eaux de puits autour du Lac Fetzara est principalement contrôlée par un contexte géochimique naturellement salin, lié aux formations géologiques argilo-évaporitiques de la région, dont les effets sur l'aptitude des eaux à l'irrigation sont accentués de manière cyclique durant la période estivale sous l'effet de l'aridité et de l'évaporation intense. Cette situation nécessite une gestion rigoureuse des prélèvements en eaux souterraines ainsi qu'une adoption de pratiques agricoles adaptées, notamment le choix de cultures tolérantes à la salinité, afin de limiter les risques de salinisation et de prévenir la dégradation progressive et irréversible des sols de la plaine.

4.6. Prédiction de l'indice de qualité des eaux par Machine Learning

L'objectif primordial de cette partie de la recherche est de développer une approche prédictive efficace pour l'évaluation de la qualité des eaux d'irrigation à travers l'indice IWQI. Il s'agit tout d'abord d'identifier les paramètres hydrochimiques les plus influents pour l'irrigation. Ensuite, l'étude vise à évaluer et sélectionner le modèle d'apprentissage automatique (Machine Learning) le plus performant pour la prédiction de l'IWQI. Enfin, l'enjeu est de proposer un modèle optimisé capable de fournir des prédictions précises en utilisant un nombre réduit de paramètres, permettant ainsi de réduire le coût et le temps des analyses.

4.6.1. Description statistique des données

Avant de procéder à l'évaluation de la qualité des eaux à travers l'indice IWQI et son estimation par des modèles de Machine Learning, il est essentiel d'analyser la distribution statistique des paramètres hydrochimiques mesurés. Cette étape permet de mieux comprendre les caractéristiques globales de l'eau souterraine dans la zone d'étude. Le tableau suivant présente les indicateurs statistiques clés (valeur minimale, maximale, moyenne et écart type) pour chacun des paramètres retenus comme déterminants de l'aptitude à l'irrigation. Ces résultats constituent la base des analyses ultérieures, tant pour l'interprétation qualitative que pour la modélisation prédictive.

Tableau 4.5 Analyse statistique descriptive des paramètres d'entrés

	EC	Cl mg/L	SO4 mg/L	HCO3 mg/L	Ca mg/L	Mg mg/L	Na mg/L	IWQI
moy	1600.52	598.59	214.98	342.36	160.14	54.54	315.39	47.02
Std	1153.92	490.32	131.84	195.91	101.99	80.03	299.39	20.88
min	276.00	35.50	19.20	23.18	33.60	1.92	23.00	1.27
25%	839.25	282.23	132.50	219.31	97.90	20.34	138.00	32.10
50%	1338.00	461.50	192.00	313.54	136.00	40.32	230.00	46.43
75%	1903.75	782.78	250.68	417.24	186.55	67.81	368.00	63.78
max	6800.00	2996.20	725.30	1284.53	672.00	886.40	1863.00	84.64

Afin d'illustrer la répartition et la dominance des différents éléments chimiques dissous dans les eaux souterraines de la région du lac Fetzara, un graphique a été élaboré à partir des valeurs moyennes des principaux ions analysés. Cette représentation permet de comparer visuellement les concentrations moyennes de chacun des ions (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-}), et ainsi d'identifier les éléments les plus influents sur la qualité chimique des eaux. L'analyse comparative met en évidence les ions majoritaires, susceptibles d'avoir un impact significatif sur l'aptitude des eaux à l'irrigation, notamment en ce qui concerne la salinité et la sodicité.

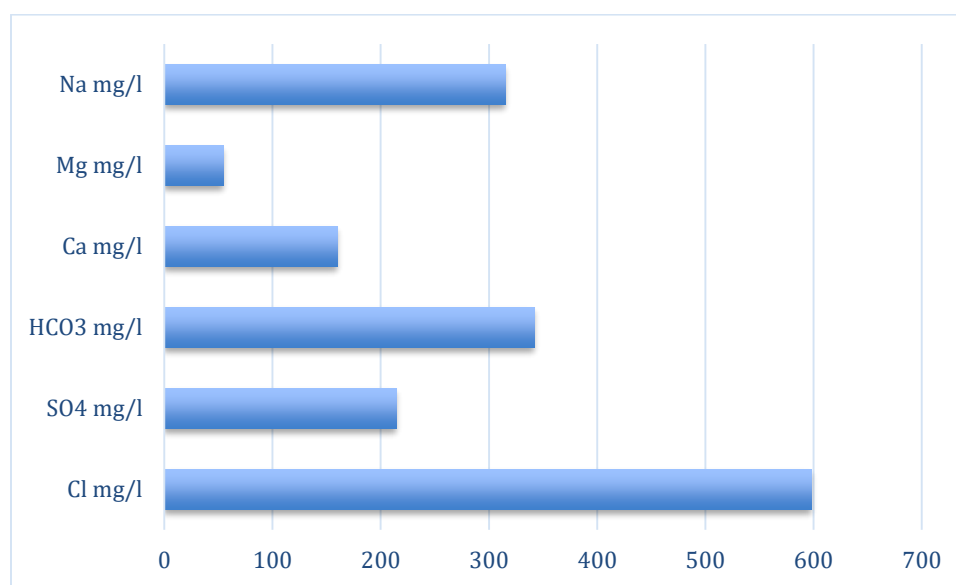


Figure 4.4. Répartition moyenne des concentrations ioniques dans les eaux souterraines

Les eaux souterraines du lac Fetzara sont dominées par deux faciès chimiques :

- ✚ Le premier correspond à un faciès **chloruré sodique**, représenté par la majorité des puits. La présence de ces deux éléments (Na^+ et Cl^-) est liée, d'une part, à la dissolution des formations évaporitiques riches en halite, et d'autre part, aux apports salins du lac Fetzara résultant de l'évaporation.
- ✚ Le second faciès est **bicarbonaté sodique**, observé principalement dans les puits situés à l'ouest et au nord-ouest du lac. La forte concentration en bicarbonates est essentiellement due à la dissolution des cipolins, provoquée par les apports souterrains issus du socle métamorphique de l'Edough.

4.6.2. Corrélation entre les paramètres de qualité de l'eau et l'indice IWQI

Afin d'analyser les relations entre les différentes variables hydrochimiques et l'indice de qualité des eaux d'irrigation (IWQI), une analyse de matrice de corrélation ainsi qu'une évaluation de l'importance des variables d'entrée ont été réalisées. La matrice de corrélation a été utilisée pour évaluer l'influence indépendante de chaque paramètre sur la composition hydrochimique. Dans cette matrice, le **coefficient de corrélation de Pearson (r)** permet de mesurer l'intensité de la relation entre deux variables :

- Un coefficient $r = +1$ ou $r = -1$ indique une corrélation parfaite.
- Un coefficient proche de zéro suggère l'absence de relation significative. Selon les critères établis par Helsel & Hirsch (2002) :
- Si $r > 0.7$ la corrélation est forte.
- Si $0.4 < r \leq 0.70$ la corrélation est modérée.
- Si $r \leq 0.4$ la corrélation est faible.

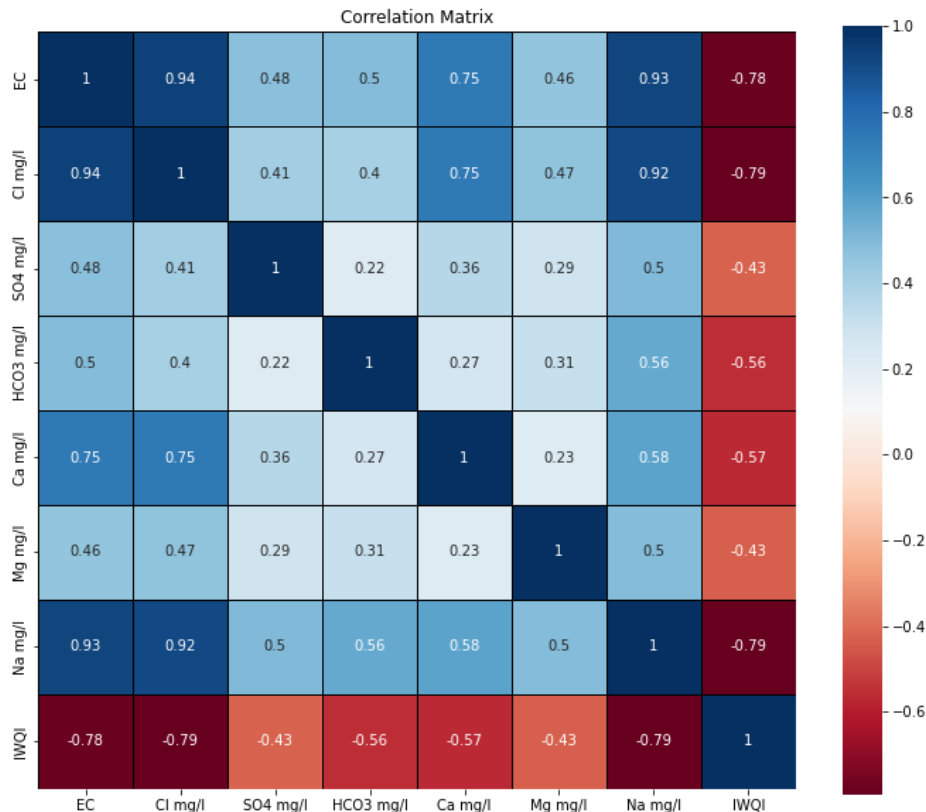


Figure 4.5. Matrice de corrélation des variables (Élaborée par l'auteure, 2026)

✚ Corrélations positives fortes

- **CE & Na (0,93), CE & Cl⁻ (0,94)** : Ces résultats indiquent que la conductivité électrique (CE) est fortement influencée par les concentrations en sodium et en chlorure, suggérant que la salinité joue un rôle majeur dans la minéralisation des eaux souterraines.
- **Cl⁻ & Na⁺ (0,92)** : La forte corrélation entre le chlorure et le sodium est caractéristique des eaux souterraines influencées par des sources salines, possiblement liées à une intrusion d'eau du lac ou à des processus d'évaporation.
- **Ca²⁺ & Cl⁻ (0,75), Ca²⁺ & CE (0,75)** : Le calcium présente également une forte corrélation avec le chlorure et la conductivité électrique, ce qui pourrait être dû à la dissolution de minéraux carbonatés ou sulfatés.

✚ Corrélations négatives fortes avec l'IWQI

- L'**IWQI** montre une forte corrélation négative avec la **CE, Cl⁻ et Na⁺** (entre **-0,78 et -0,79**), indiquant que la salinité est un facteur clé influençant l'hydrochimie des eaux et qu'elle a un impact significatif sur la qualité de l'eau pour l'irrigation.

4.6.3. Hyperparamètres des modèles d'intelligence artificielle utilisés

Dans le cadre de cette étude, plusieurs modèles d'apprentissage automatique ont été appliqués afin de prédire l'indice de qualité des eaux d'irrigation (IWQI), notamment la régression linéaire (LR), la Support Vector Regression (SVR), l'arbre de décision (Decision Tree Regression) et le modèle XGBoost. L'implémentation a été réalisée sous l'environnement Python à l'aide des bibliothèques *scikit-learn* et *XGBoost*.

Les données ont été divisées selon une approche de type **hold-out**, avec 75 % des observations utilisées pour l'apprentissage et 25 % réservées à la phase de test et de validation des performances des modèles.

Concernant les hyperparamètres, les modèles ont été utilisés avec leurs paramètres par défaut définis par les bibliothèques Python afin d'assurer une base standardisée et reproductible :

- **Régression linéaire (LR)** : modèle sans hyperparamètres ajustables significatifs, basé sur l'estimation des coefficients par la méthode des moindres carrés ordinaires.
- **Support Vector Regression (SVR)** : modèle utilisé avec le noyau radial (RBF) par défaut, avec les paramètres standards de régularisation ($C = 1.0$), du paramètre gamma ($gamma = 'scale'$), et de la marge d'erreur epsilon ($\epsilon = 0.1$).
- **Arbre de décision (DT)** : implémenté avec les paramètres par défaut, notamment le critère de division basé sur l'erreur quadratique moyenne (MSE), une profondeur non contrainte ($max_depth = None$), et les valeurs minimales standards pour la division des nœuds.
- **XGBoost** : modèle de gradient boosting utilisant les paramètres standards de la bibliothèque, notamment un nombre d'estimateurs par défaut ($n_estimators = 100$), une profondeur maximale des arbres ($max_depth = 6$), un taux d'apprentissage ($learning_rate = 0.3$), et un échantillonnage standard des données et variables.

Cette configuration garantit une mise en œuvre reproductible et permet une comparaison homogène des performances des différents modèles dans la prédiction de l'IWQI.

4.6.4. Évaluation comparative des performances des modèles

Nous avons comparé les performances de quatre modèles de régression, dans le but d'identifier le modèle le plus performant pour la prédiction de l'indice de qualité des eaux d'irrigation (IWQI). Ces modèles ont été entraînés et validés à partir de données hydrochimiques collectées dans 37 puits, soit 148 échantillons comportant chacun 8 variables.

Pour évaluer la performance prédictive des modèles d'apprentissage automatique, des graphiques de dispersion (scatterplots) ont été élaborés en comparant les valeurs réelles de l'IWQI aux valeurs prédites. Ces représentations (Figures :4.5,6,7,8) permettent d'apprécier visuellement la précision et la fiabilité de chaque algorithme. Plus les points se rapprochent de la ligne diagonale ($y = x$), plus le modèle est considéré comme précis. Les figures suivantes illustrent les résultats obtenus pour chacun des algorithmes testés.

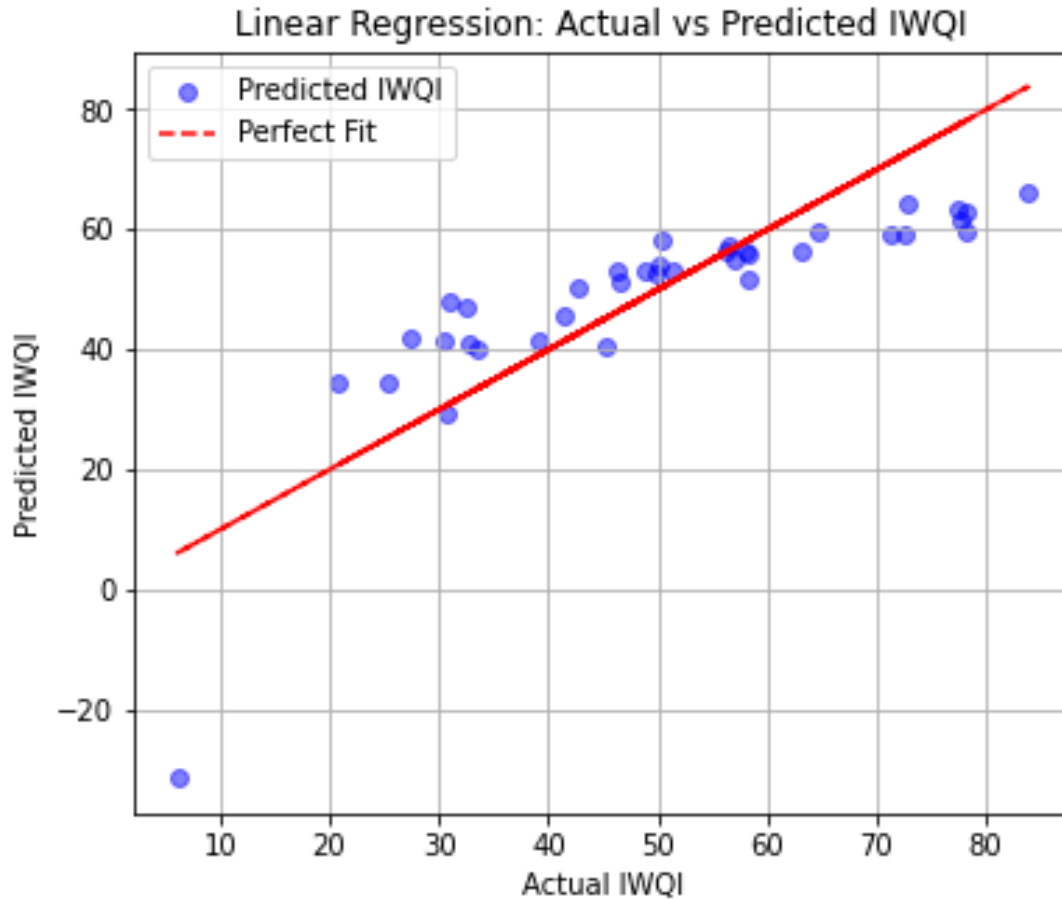


Figure 4.6. Graphique de dispersion IWQI réel vs IWQI prédit par Linear Regression

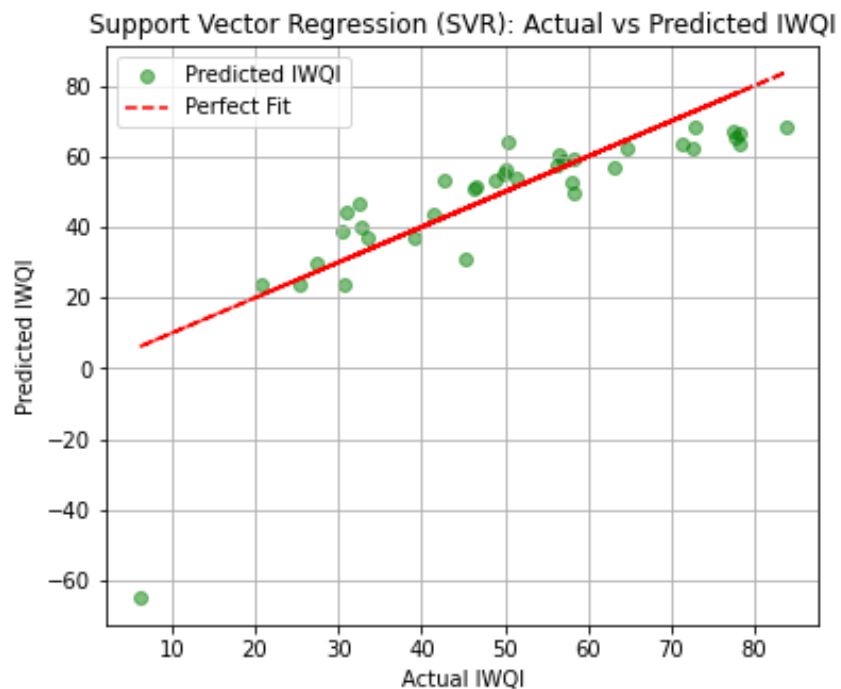


Figure 4.7. Graphique de dispersion IWQI réel vs IWQI prédit par Support Vector Regression

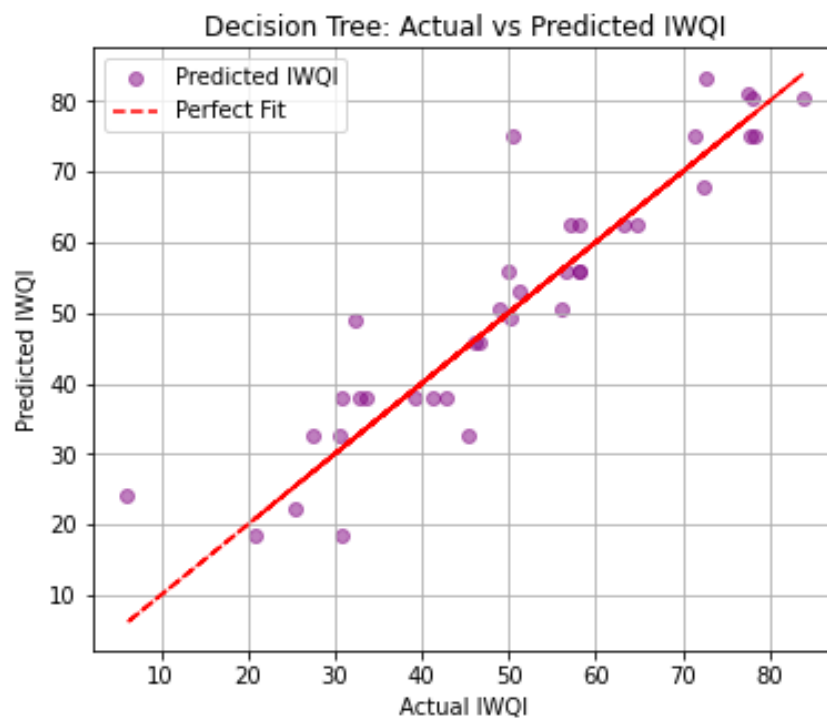


Figure 4.8. Graphique de dispersion IWQI réel vs IWQI prédit par Decision Tree

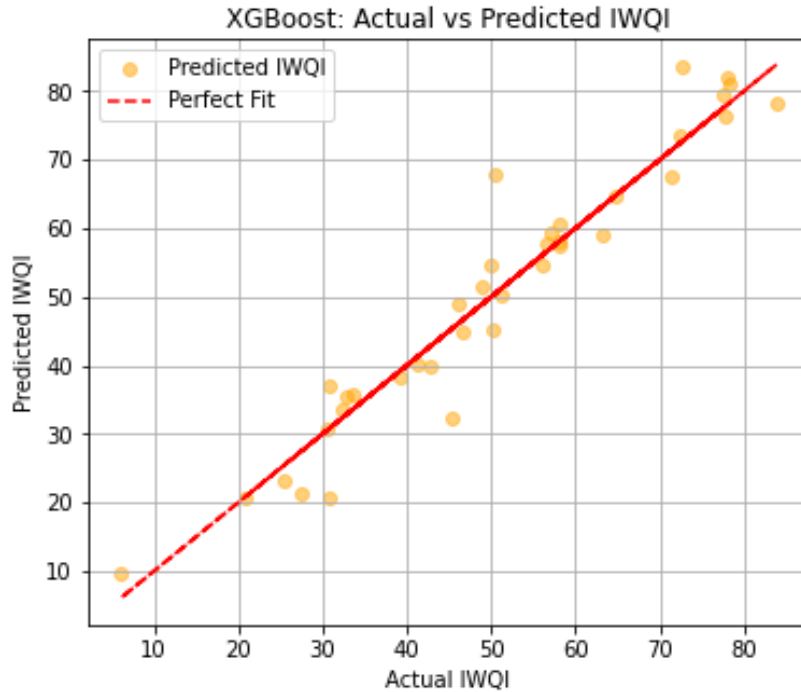


Figure 4.9. Graphique de dispersion IWQI réel vs IWQI prédit par XGBoost

Le modèle idéal se caractérise par un alignement parfait des points sur la ligne diagonale $x = y$. L'écart par rapport à cette droite reflète les erreurs de prédiction. Parmi les modèles évalués, **XGBoost** se distingue par une forte concentration des points autour de la diagonale, confirmant sa précision et sa performance supérieure. Cette observation est validée par le tableau et la figure ci-après, qui présentent les principaux indicateurs d'évaluation, à savoir : l'erreur absolue moyenne (MAE), l'erreur quadratique moyenne (MSE), la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), ainsi que le coefficient de détermination (R^2) pour chaque algorithme testé.

Tableau 4.6. Évaluation comparative des modèles de machine learning

0	MODELE	MAE	MSE	RMSE	R^2
1	Linear Regression	8.82	129.48	11.37	0.6206
2	Support Vector Regression	8.65	202.46	14.22	0.4067
3	Decision Tree	4.75	46.04	6.78	0.8651
4	XGBoost	3.54	26.52	5.14	0.9222

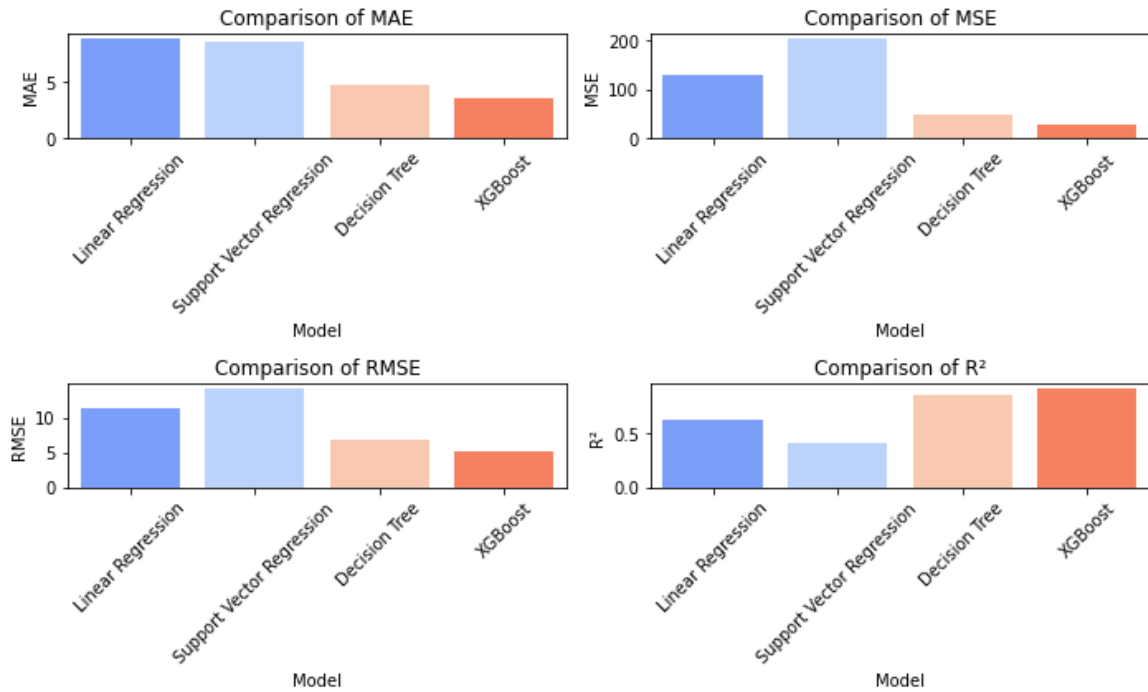


Figure 4.10. Comparaison des performances en validation

Les résultats de la comparaison des performances des quatre modèles de régression supervisée : Linear Regression (LR), Support Vector Regression (SVR), Decision Tree (DT) et XGBoost ; mettent en évidence des différences notables en termes de précision prédictive.

D’après les indicateurs d’évaluation (MAE, MSE, RMSE, R^2), le modèle XGBoost se distingue nettement, avec les plus faibles valeurs d’erreur (MAE = 3,54 ; RMSE = 5,14) et le meilleur coefficient de détermination ($R^2 = 0,9222$), attestant de sa grande fiabilité pour estimer l’IWQI.

Le modèle Decision Tree montre également de bonnes performances ($R^2 = 0,8651$), bien que légèrement moins précises. En revanche, la régression linéaire et la SVR affichent des performances plus faibles, traduisant leur difficulté à modéliser les relations complexes entre les paramètres.

En conclusion, le modèle XGBoost est recommandé pour la prédiction de l'IWQI en raison de sa précision, sa stabilité et sa capacité à gérer des données hydrochimiques complexes. Ainsi, ce modèle sera utilisé dans la suite de ce travail pour déterminer l'importance des variables et identifier les combinaisons optimales des paramètres clés influençant la qualité des eaux d'irrigation.

4.6.5. Combinaisons des variables d'entrée déterminants

Dans cette section, nous examinons l'influence relative de chaque variable d'entrée dans la prédiction de l'indice de qualité des eaux d'irrigation (IWQI), dans le but d'identifier la combinaison optimale de paramètres assurant à la fois une précision prédictive élevée et une complexité minimale du modèle. La sélection des variables joue un rôle essentiel en améliorant l'explicabilité du modèle et en réduisant les coûts de calcul, notamment par l'élimination de s paramètres faiblement contributifs.

Le tableau ci-après présente les paramètres d'entrée (features) ainsi que leur importance relative, exprimée en pourcentage, telle qu'estimée par le modèle XGBoost.

Tableau 4.7. Classement des variables par ordre d'importance pour la modélisation de l'IWQI

Variables	Importance %
Na mg/L	92.3943
Cl mg/L	5.7033
EC	0.9241
HCO ₃ mg/L	0.5557
Ca mg/L	0.1882
Mg mg/L	0.1840
SO ₄ mg/L	0.0503

L'analyse de l'importance des variables réalisée à l'aide de l'algorithme XGBoost révèle que le sodium (Na⁺) est, de loin, le paramètre le plus déterminant dans la prédiction de l'indice IWQI, représentant à lui seul 92,39 % de l'influence du modèle. Le chlorure (Cl⁻) arrive en seconde position avec 5,7 %, suivi par la conductivité électrique (EC) à 0,92 % et le bicarbonate (HCO₃⁻) à 0,55 %.

Les autres paramètres (Ca^{2+} , Mg^{2+} et SO_4^{2-}) ont une importance négligeable ($< 0,2\%$), ce qui suggère leur contribution limitée dans la modélisation prédictive de l'aptitude des eaux à l'irrigation dans le contexte de l'étude.

Pour optimiser la prédiction de l'indice de qualité de l'eau d'irrigation (IWQI), diverses combinaisons de variables d'entrée clés ont été testées à l'aide du modèle XGBoost. La sélection de ces combinaisons repose sur l'analyse de l'importance relative des paramètres, telle que déterminée précédemment.

Afin d'évaluer l'efficacité prédictive de chaque configuration, les principales métriques de performance (MAE, MSE, RMSE et R^2) ont été calculées. Le tableau suivant présente les différentes combinaisons de variables ainsi que les performances associées pour chaque scénario.

Tableau 4.8. Évaluation comparative des combinaisons de paramètres pour la prédiction de l'IWQI

Combinaisons de variables	MAE	MSE	RMSE	R^2
Na	5.122	53.052	7.284	0.845
Cl, Na	4.110	39.829	6.311	0.883
Cl, Na, EC	4.043	37.105	6.091	0.891
Cl, Na, EC, HCO_3^-	3.805	28.353	5.325	0.917
Cl, Na, EC, HCO_3^- , Ca	3.569	26.012	5.100	0.924
Cl, Na, EC, HCO_3^- , Ca, Mg	3.535	23.648	4.863	0.931

Les résultats de performance montrent une nette amélioration de la précision du modèle avec l'ajout progressif de variables pertinentes. Le modèle basé uniquement sur Na^+ enregistre un R^2 de 0,845, qui passe à 0,883 en combinant Na^+ et Cl^- . L'introduction de l'EC améliore légèrement les performances ($R^2 = 0,891$), mais c'est l'ajout de HCO_3^- qui permet d'atteindre un niveau de précision significatif ($R^2 = 0,917$).

L'inclusion de Ca^{2+} et Mg^{2+} apporte un gain marginal supplémentaire ($R^2 = 0,931$), mais au prix d'une complexité analytique accrue.

Ces résultats confirment que le modèle à quatre variables (Na^+ , Cl^- , EC, HCO_3^-) constitue un équilibre optimal entre simplicité de mesure et précision prédictive. Il est donc recommandé pour une évaluation rapide et fiable de l'IWQI. Cette conclusion est en parfaite adéquation avec l'objectif de l'étude, à savoir identifier une combinaison minimale de paramètres permettant une estimation précise de la qualité des eaux d'irrigation, tout en réduisant les coûts analytiques et les délais de traitement.

4.7. Discussion des résultats et mise en perspective avec la littérature scientifique

Les résultats de cette étude s'inscrivent dans la continuité des travaux menés sur les zones humides méditerranéennes soumises à des pressions anthropiques et climatiques croissantes. La dégradation progressive de la qualité des eaux, caractérisée par l'augmentation de la salinité et des concentrations en ions majeurs (N^+ , Cl^-), confirme les conclusions de Bouderbala et al. (2016) et Toumi et al. (2020) relatives au Nord-Est algérien. Plus spécifiquement, la prédominance de la classe de restriction « sévère » (SR) observée en juillet souligne l'impact déterminant de l'évapotranspiration estivale (culminant à 154,3 mm) sur la concentration des sels dissous ; un phénomène de concentration par évaporation déjà mis en évidence par Zouhri et al. (2018). Cette vulnérabilité saisonnière se trouve accentuée par le contexte lithologique local : le lessivage des formations évaporitiques triasiques et des matrices argileuses du bassin, identifié par Hilly (1962) et Djabri et al. (2008), demeure le principal moteur de la minéralisation.

L'application de l'indice IWQI proposé par Meireles et al. (2010) permet une mise en perspective des résultats à l'échelle internationale. Les classifications obtenues dans la présente étude sont globalement cohérentes avec celles rapportées dans plusieurs aquifères soumis à des usages agricoles intensifs, notamment au Brésil, en Iran ainsi que dans différents contextes du bassin méditerranéen (Meireles et al., 2010 ; Ayoubi et al., 2017 ; Ercin & Hoekstra, 2014). Dans ces régions, les variations entre les classes de restriction « légère » et « modérée » sont principalement contrôlées par la salinité totale (CE) et le risque sodique (SAR), paramètres déterminants dans l'évaluation de l'aptitude des eaux à l'irrigation. Cette convergence internationale met en évidence la robustesse

méthodologique de l'IWQI, qui synthétise efficacement plusieurs paramètres hydrochimiques en un indice unique facilement interprétable.

La singularité de cette étude réside dans l'évolution méthodologique adoptée. Alors que les travaux antérieurs se limitaient à des approches hydrochimiques descriptives, l'intégration des modèles d'apprentissage automatique (Machine Learning) constitue une avancée significative pour la région. L'utilisation d'algorithmes tels que les arbres de décision, les machines à vecteurs de support (SVM) et XGBoost s'inscrit dans les tendances récentes de la littérature (Singh et al., 2021 ; Ahmed et al., 2022), mettant en évidence leur capacité à fournir des performances prédictives élevées dans des systèmes complexes et fortement non linéaires, tels que celui du bassin du lac Fetzara.

4.8. Limites de l'étude et recommandations

Bien que les résultats obtenus soient globalement cohérents et significatifs, plusieurs limites doivent être soulignées. Premièrement, l'échantillonnage reste limité à quatre campagnes réparties sur une seule année, ce qui peut ne pas refléter l'ensemble des variations interannuelles. Deuxièmement, certaines variables environnementales influentes, telles que l'usage des terres, les intrusions marines ou les données hydrogéologiques détaillées, n'ont pas été intégrées dans les modèles prédictifs.

Concernant les modèles d'apprentissage automatique, bien qu'efficaces, leur interprétable reste parfois difficile pour les gestionnaires non spécialisés. De plus, la qualité des prédictions dépend de la fiabilité et de la représentativité des données d'entrée. Face à ces limites, plusieurs recommandations peuvent être formulées :

- Étendre la base de données temporelle à plusieurs années pour mieux capturer les tendances climatiques et anthropiques ;
- Intégrer des données spatiales (SIG, occupation du sol) et hydrogéologiques pour enrichir les modèles ;
- Renforcer la formation des acteurs locaux à l'utilisation de ces outils numériques ;
- Mettre en place un réseau de surveillance continue, combinant analyses de terrain et modèles prédictifs, pour anticiper les risques liés à la dégradation des ressources en eau.

4.9. Conclusion

L'étude menée autour du lac Fetzara a permis d'établir un diagnostic approfondi de la qualité des eaux souterraines destinées à l'irrigation, en mobilisant à la fois des outils d'évaluation classiques, tels que l'indice IWQI (Meireles et al., 2010), et des méthodes innovantes de modélisation par apprentissage automatique.

Les résultats ont mis en évidence une dégradation marquée de la qualité des eaux durant la période estivale, particulièrement en juillet, où près de 76 % des puits analysés ont été classés en catégorie de restriction sévère (SR). Cette dégradation s'explique par la combinaison de facteurs naturels et anthropiques, notamment l'intensification de l'évaporation, la concentration des sels dissous liée aux conditions hydroclimatiques, la dissolution des formations géologiques salines, ainsi que l'impact des pratiques agricoles et des pressions exercées sur la ressource.

Sur le plan méthodologique, l'intégration des modèles d'intelligence artificielle s'est révélée particulièrement pertinente. Le modèle XGBoost a présenté les meilleures performances prédictives ($R^2 = 0,9222$), suivi d'un modèle simplifié basé sur quatre paramètres clés (Cl^- , Na^+ , EC et HCO_3^-), atteignant également une performance élevée ($R^2 = 0,917$). Ces résultats démontrent la capacité des approches d'apprentissage automatique à simplifier et optimiser la surveillance de la qualité des eaux, en réduisant les coûts analytiques tout en maintenant un haut niveau de fiabilité.

Ces résultats confirment l'intérêt des approches basées sur l'intelligence artificielle pour la gestion et le suivi des ressources en eau. Ils soulignent également la nécessité de renforcer la protection des zones humides, en particulier le système du lac Fetzara, tout en intégrant des modèles prédictifs dans les stratégies de gestion afin d'anticiper les risques de dégradation de la qualité des eaux en milieu semi-aride.

CHAPITRE 5 :LE LAC
FETZARA ENTRE
DEGRADATION ET
CONSERVATION :
ENJEUX, IMPACTS ET
STRATEGIES DURABLES

5.1. Introduction

En Algérie, les zones humides jouent le rôle d'infrastructures écologiques essentielles, en remplissant des fonctions hydrologiques et socio-économiques déterminantes telles que la régulation du cycle de l'eau, le traitement naturel des eaux, la réalimentation des nappes souterraines, ainsi que la conservation de la biodiversité. Le lac Fetzara, classé site Ramsar depuis 2002, constitue à ce titre un écosystème stratégique dans la région d'Annaba, jouant un rôle de tampon écologique entre les dynamiques naturelles et les pressions humaines croissantes.

Cependant, comme de nombreuses zones humides du pays, le lac Fetzara subit une série d'altérations d'origine anthropique qui compromettent sa durabilité : urbanisation non maîtrisée, intensification agricole accompagnée de l'usage excessif d'engrais chimiques, rejets d'eaux usées domestiques et industrielles non traitées, ainsi que de nombreux aménagements hydrauliques ont profondément modifié l'équilibre écologique de ce système fragile. Ces pressions ont conduit à une dégradation progressive des qualités physico-chimiques de l'eau, à une salinisation marquée des sols du bassin versant, et à un déséquilibre des échanges entre le lac et la nappe phréatique.

Ce chapitre a pour objectif d'analyser les enjeux environnementaux et écologiques liés à cette dégradation. Une première partie propose une synthèse critique des travaux scientifiques antérieurs portant sur les impacts du lac Fetzara sur la qualité des eaux superficielles et souterraines. La seconde partie s'intéresse aux enjeux écologiques induits par les pressions anthropiques, et la surexploitation des ressources naturelles locales.

Enfin, ce chapitre présente les orientations de la Stratégie Nationale de Gestion Durable des Zones Humides en Algérie, en tant que cadre de référence pour la protection de ces milieux. Des recommandations spécifiques seront formulées afin d'orienter les actions de conservation, de renaissance écologique et de gestion intégrée pour la préservation du lac Fetzara et la restauration de ses fonctions écologiques.

5.2. Enjeux environnementaux du lac Fetzara

5.2.1. Impacts du lac sur la qualité des eaux

- **Pollution azotée d'origine agricole**

La pollution azotée constitue l'un des principaux facteurs de détérioration de la qualité des eaux dans la région du lac Fetzara. Plusieurs études, dont celle de Kahoul (2014) menée dans la commune de Berrahal, ont mis en évidence ce phénomène. Cette recherche visait à évaluer la qualité physico-chimique des eaux de puits en s'appuyant sur divers paramètres tels que la température, le pH, la conductivité électrique, la dureté totale, les teneurs en calcium, chlorures, nitrates et nitrites. Les résultats ont révélé que certains échantillons présentaient des concentrations en nitrates supérieures à 66 mg/l comme le montre la figure 5.1, dépassant ainsi la limite recommandée par l'Organisation mondiale de la santé fixée à 50 mg/l pour les eaux destinées à la consommation humaine.

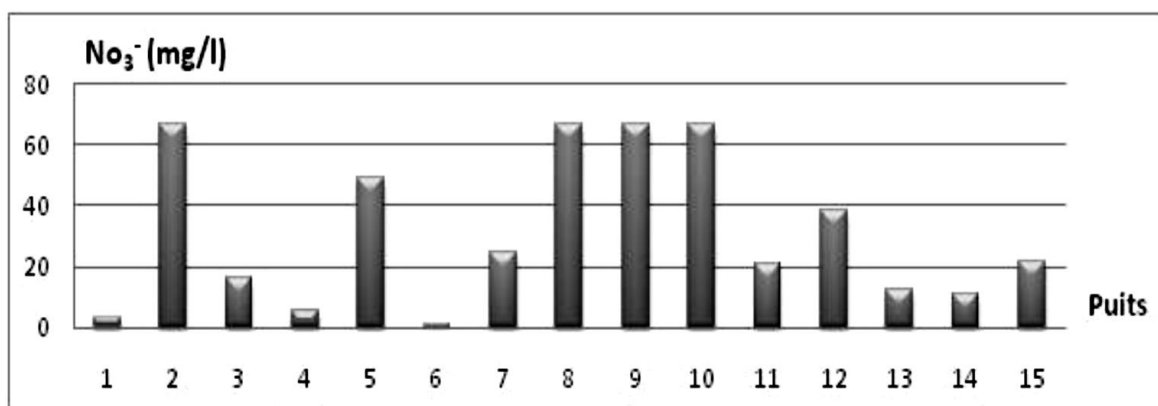


Figure 5.1 Variation de la teneur en nitrates dans les eaux des puits (Kahoul ;2014)

Ces résultats mettent en lumière la forte vulnérabilité des nappes superficielles aux pollutions diffuses d'origine agricole, en particulier en lien avec l'usage intensif d'engrais azotés et les rejets issus des activités d'élevage. Ce type de contamination est également préoccupant dans le contexte du lac Fetzara, où les apports fluviaux et les infiltrations à travers des sols agricoles exposés favorisent l'enrichissement en nitrates, contribuant ainsi à une dégradation progressive de la qualité des eaux souterraines et superficielles de la zone humide.

- **Pollution industrielle et urbaine**

L'étude de Khelfaoui (2012), menée dans la région de Berrahal à l'ouest du bassin versant du lac Fetzara, met en évidence l'impact des rejets industriels sur la qualité des eaux. Les effluents insuffisamment traités de la zone industrielle, riches en métaux lourds tels que le fer, le zinc, le plomb et le nickel, sont directement versés dans plusieurs oueds alimentant le lac. Cette pollution contribue à une forte minéralisation, illustrée par des valeurs élevées de conductivité électrique, et des concentrations en fer dépassant les normes admises. La nature argileuse du substrat géologique facilite la migration de ces contaminants vers les nappes souterraines. Les activités industrielles, notamment la galvanisation, les savonneries et les usines agroalimentaires, sont identifiées comme les principales sources de pollution chimique dans les régions de Berrahal et d'Annaba. Ces rejets, souvent non conformes aux normes de potabilité, menacent la santé publique ainsi que les écosystèmes aquatiques. En tant que réceptacle naturel, le lac Fetzara accumule progressivement ces substances, entraînant une salinisation accrue et une dégradation de sa qualité écologique. Face à ces enjeux, l'auteur recommande la mise en place d'un dispositif de surveillance renforcée, l'amélioration du traitement des effluents, ainsi qu'une gestion intégrée et durable du bassin versant.

L'étude de Bougherira (2012), réalisée dans la plaine d'Annaba, met en lumière une pollution significative des eaux de surface et souterraines due aux rejets urbains et industriels non traités, notamment dans le bassin de l'oued Meboudja, affluent de la Seybouse. Des concentrations élevées en phosphates (jusqu'à 22,9 mg/l) et en ammonium (jusqu'à 54 mg/l) ont été enregistrées dans les eaux de surface, accompagnées d'une contamination notable de la nappe alluviale. La perméabilité des formations sablo-argileuses favorise les échanges entre surface et nappe, accentués en période sèche par des inversions de flux qui facilitent l'infiltration directe des polluants. Ces mécanismes contribuent indirectement à la dégradation du lac Fetzara, réceptacle terminal du réseau hydrologique régional. De plus, Bougherira (2012) a identifié des transferts complexes de polluants entre les eaux de surface (oued Meboudja) et la nappe phréatique, avec des teneurs alarmantes en phosphates et ammonium. Ces interactions favorisent la

contamination chronique de la ressource souterraine, aggravée par l'absence de stations d'épuration et la gestion inefficace des effluents

- **Salinisation des sols dans le bassin versant du lac Fetzara**

La salinité des sols autour du lac Fetzara est fortement influencée par la concentration en ions sodium (Na^+) et chlorure (Cl^-), due à l'accumulation naturelle de sels solubles et amplifiée par l'évaporation intense. L'étude de Zahi (2022), menée sur 24 échantillons de sol, révèle des conductivités électriques variant entre 6,52 et 24,3 mS/cm, dépassant largement le seuil de 4 mS/cm qui définit un sol salin. Environ 66 % des échantillons sont classés comme salins à très salins selon la classification USSL comme l'illustre le tableau ci-après.

Tableau 5.1. Classification des sols en fonction de la conductivité électrique (Zahi, 2022)

CE (mS/cm)	Profondeur (0 – 25 cm)	Profondeur (25 – 50 cm)	Appréciation
$\text{CE} \leq 2$	/	/	Sols non salés
$2 < \text{CE} \leq 4$	/	/	Sols légèrement salés
$4 < \text{CE} \leq 8$	S1, S2, S4, S7, S8, S12	/	Sols modérément salés
$8 < \text{CE} \leq 16$	S5, S11	S1, S2, S4, S5, S7, S8, S11, S12	Sols salés
$\text{CE} > 16$	S3, S6, S9, S10	S3, S6, S9, S10	Sols très salés

Cette salinité est particulièrement marquée dans les zones nord-est et sud-est du lac, où l'influence directe du plan d'eau est combinée à un drainage insuffisant et à des pratiques agricoles inappropriées. La texture limoneuse des sols, leur faible perméabilité, et les faibles teneurs en matière organique favorisent la remontée capillaire des sels vers les horizons de surface. Le faciès sodique-chloruré, couplé à un pH variant de légèrement acide à alcalin, reflète une dégradation progressive de la qualité des sols, compromettant leur potentiel agricole et augmentant les risques de transfert de salinité vers les nappes.

- **Transfert de la salinité vers les eaux souterraines**

La salinisation des sols exerce une influence significative sur la composition chimique des eaux souterraines, en particulier à travers les processus d'infiltration et de lessivage. L'étude de Fekrache (2014), basée sur 25 échantillons d'eau souterraine autour du lac Fetzara, montre une conductivité électrique variant de 470 à 3 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec des faciès dominants $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$ et $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$. Cette minéralisation est attribuée à la dissolution de minéraux évaporitiques tels que l'halite et le gypse, ainsi qu'aux apports salins issus des pratiques agricoles (retours d'irrigation). L'étude exclut toute intrusion marine et met en évidence le rôle du lac Fetzara comme facteur amplificateur du phénomène. En raison de son fort taux d'évaporation et de son déficit hydrique chronique, le lac agit comme un concentrateur de sels, qui sont ensuite redistribués vers la nappe phréatique par infiltration. Ce processus est accentué dans les zones de Cheurfa et Oued Zied, où la charge ionique des eaux est particulièrement élevée.

Par ailleurs, Zahi (2014) démontre que la nappe phréatique, contenue dans des formations alluviales argilo-sableuses peu profondes, interagit directement avec le lac par des échanges saisonniers. Ces mécanismes bidirectionnels de recharge et d'infiltration modifient la composition chimique des eaux souterraines, en particulier en période de forte évaporation, où les concentrations en Na^+ et Cl^- augmentent sensiblement. Nos propres résultats confirment cette dynamique, en montrant une minéralisation accrue dans les secteurs en contact hydraulique avec le lac

- **Échanges entre le lac et la nappe phréatique**

Les interactions entre le lac Fetzara et la nappe phréatique superficielle constituent un mécanisme hydrologique central dans la dynamique chimique de la région. Ces échanges sont bidirectionnels et modulés par des facteurs saisonniers, topographiques et climatiques. En période humide, les nappes bordant le lac, logées dans des formations argilo-sableuses peu profondes (2 à 10 m), à transmissivité réduite, alimentent le plan d'eau. À l'inverse, durant les périodes sèches ou à fort taux d'évaporation, le lac devient drainant et transfère une partie de ses eaux enrichies en ions dissous (Na^+ , Cl^- , HCO_3^-) vers la nappe, aggravant sa minéralisation.

Ces phénomènes, confirmés par Zahi (2012, 2014) et Habes (2012), révèlent une salinisation progressive des eaux souterraines, comme l'attestent les conductivités électriques élevées (jusqu'à 3500 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et la dominance du faciès chloruré-sodique. Les oueds alimentant le lac (Mellah, Hout et Zied) véhiculent également des ions issus de l'altération géologique, intensifiant la charge ionique du lac. Ce dernier, en interaction avec la nappe, devient à son tour une source secondaire de contamination chimique, par le biais d'infiltrations. Les cartes piézométriques montrent que les flux hydriques peuvent aussi s'orienter vers l'oued Meboudja, accentuant le drainage conjoint du lac et de la nappe (fig.5.2). Ainsi, le système hydrogéologique autour du lac Fetzara est marqué par une forte interdépendance et une vulnérabilité accrue face aux pressions anthropiques (irrigation, drainage inadéquat) et aux conditions climatiques extrêmes. Ces échanges complexes contribuent à la dégradation qualitative des ressources en eau, tant en surface qu'en profondeur, soulignant l'importance stratégique du lac dans l'évolution chimique régionale.

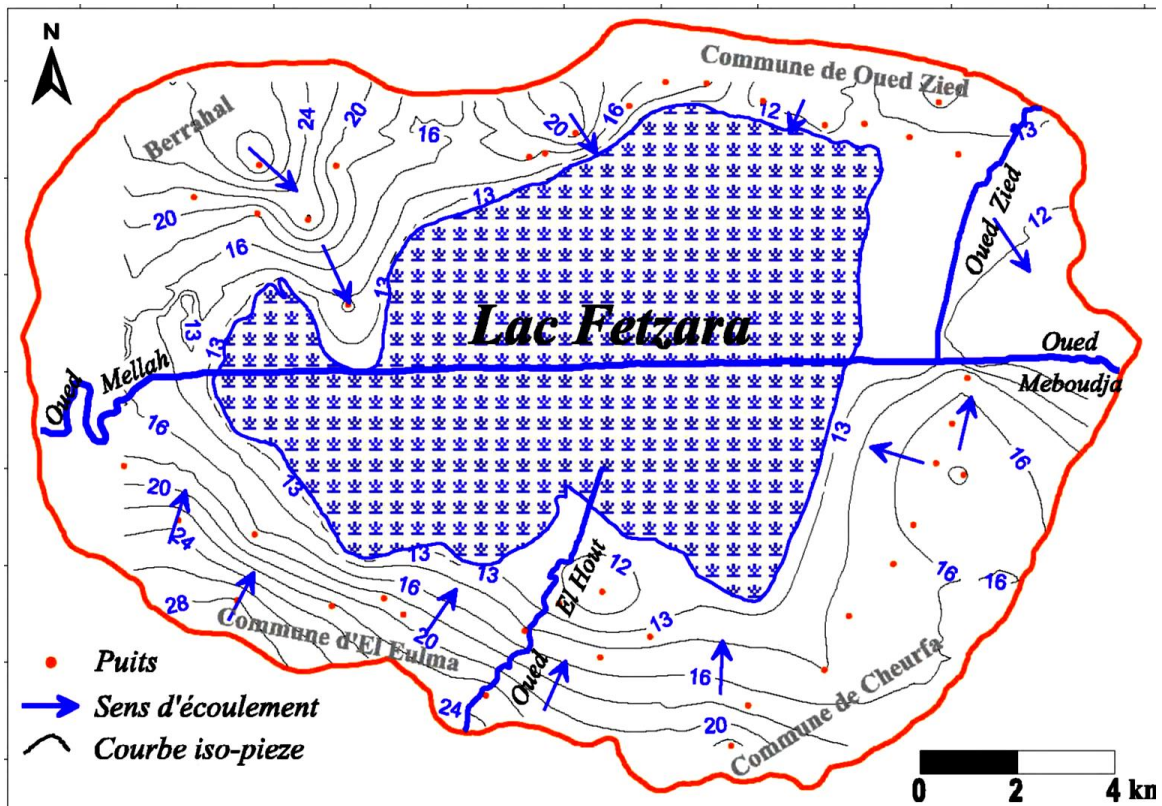


Figure 5.2. Carte piézométrique de la région du lac Fetzara (Mai 2007).

5.2.2. Enjeux écologiques face aux pressions anthropiques

- **Pression urbaine et vulnérabilité de la zone humide**

L'étude de Mellouk et Aroua (2015) souligne les menaces majeures que fait peser l'expansion urbaine rapide de la ville d'Annaba sur l'équilibre écologique du lac Fetzara. La densification du tissu urbain vers le sud, à proximité immédiate du lac, entraîne une artificialisation croissante du bassin versant, marquée par la multiplication de surfaces imperméables et la modification physique des cours d'eau, comme l'oued El Aneb, principal exutoire permanent.

Les travaux d'aménagement, incluant le recalibrage des oueds et la construction d'infrastructures lourdes, altèrent la morphologie du bassin et réduisent les capacités naturelles d'absorption. Il en résulte une augmentation des écoulements de surface, entraînant l'accumulation de polluants issus du ruissellement urbain (hydrocarbures, métaux lourds, engrais), qui dégradent la qualité des eaux du lac. Cette dynamique perturbe non seulement l'équilibre chimique de l'écosystème aquatique, mais aussi la biodiversité, notamment les espèces avifaunes migratrices qui y trouvent refuge.

La réduction de l'infiltration compromet la recharge naturelle de la nappe phréatique, tandis que les transformations telles que le bétonnage des berges et l'assèchement saisonnier du lac accentuent la déstructuration des habitats aquatiques et la perturbation du cycle hydrologique. Une urbanisation désorganisée nuit aux fonctions écologiques du lac, telles que la filtration naturelle de l'eau, le contrôle des crues et la préservation de la biodiversité, tout en altérant la qualité des eaux souterraines par la propagation de polluants d'origine urbaine.

L'étude recommande une révision du projet d'aménagement, l'intégration de dispositifs écologiques (zones tampons, végétalisation, infiltration contrôlée) et une gouvernance partagée pour préserver les services écosystémiques rendus par le lac Fetzara et garantir un développement urbain respectueux de l'environnement.

- **Biodiversité floristique et enjeux écologiques**

Le lac Fetzara, situé dans le nord-est de l'Algérie, représente une zone humide d'importance écologique majeure sa richesse floristique. Une étude floristique approfondie a permis de recenser 226 espèces végétales réparties en 166 genres et 58 familles, dont la majorité est constituée de thérophytes, témoignant ainsi d'une remarquable adaptabilité aux conditions environnementales fluctuantes de cet écosystème (Fetnaci et al., 2019).

L'originalité floristique du site est renforcée par la présence de 19 taxons endémiques à l'Algérie, soulignant l'importance du lac Fetzara comme réservoir de biodiversité locale et comme priorité pour les efforts de conservation. La végétation y est spatialement structurée en trois grands ensembles physiognomiques : les pelouses sèches, les prairies amphibies, et le lac semi-permanent, dont la répartition est fortement influencée par des gradients hydriques tels que la salinité et la dynamique saisonnière de l'eau.

Cette diversité floristique, comparable à celle observée dans d'autres zones humides du bassin méditerranéen, est cependant gravement menacée par les activités anthropiques. Le pâturage intensif, les incendies récurrents, ainsi que les aménagements hydrauliques non maîtrisés entraînent une dégradation progressive des habitats, accentuée par la salinisation des sols. Ces perturbations provoquent une régression des espèces rares et endémiques, au profit d'espèces pionnières plus tolérantes, modifiant ainsi profondément la composition végétale originelle.

Les facteurs abiotiques, en particulier la salinité, combinés à l'impact du pâturage, constituent les principaux déterminants de la distribution des espèces végétales. Ce déséquilibre écologique influence directement la qualité des eaux, notamment à travers l'eutrophisation, la perte de fonctions épuratrices naturelles et la diminution des services écosystémiques fournis par la végétation rivulaire.

La préservation du lac Fetzara, en tant que patrimoine biologique national, requiert ainsi une gestion intégrée et durable, articulée autour d'une conciliation entre activités humaines et préservation de la qualité écologique des milieux humides.

- **Surexploitation des ressources naturelles du lac Fetzara**

Le lac Fetzara, plus grande zone humide salée d'Afrique du Nord (5 500 à 5 800 ha), est aujourd'hui confronté à une surexploitation préoccupante de ses ressources naturelles, mettant en péril son équilibre écologique et les services écosystémiques qu'il fournit.

Parmi les causes les plus marquantes, l'urbanisation rapide et mal encadrée constitue une menace directe. Le projet de ville nouvelle de Draa Errich (1344 ha) prévoit la destruction de près de 1340 ha de maquis et terres agricoles, entraînant l'imperméabilisation massive des sols et une forte réduction des capacités d'infiltration, essentielles à la recharge de la nappe phréatique (Guerbez, 2013 ; Mellouk & Aroua, 2015). De surcroît, les infrastructures routières étanches favorisent le ruissellement, accentuant la pollution des oueds El Aneb et Seybouse, principaux vecteurs hydriques vers le lac. La pression industrielle et agricole aggrave cette dynamique. Les rejets non traités provenant des unités industrielles de Berrahal huiles usagées, métaux lourds, effluents chimiques se déversent dans les eaux de surface, menaçant la faune aquatique et altérant la qualité des eaux. Parallèlement, l'agriculture intensive sur les berges, caractérisée par l'utilisation exagérée d'engrais et de pesticides, précipite la salinisation des sols et la contamination des eaux, diminuant leur aptitude à l'irrigation comme l'ont confirmé les études précédemment citées.

À cela s'ajoute une exploitation hydrique non durable. L'assèchement estival du lac, conséquence d'anciens aménagements coloniaux (drainage, canaux artificiels) et de la dégradation de l'écluse d'El Gantra, empêche la rétention saisonnière des eaux. Cette situation, couplée à une surexploitation de la nappe souterraine pour les besoins agricoles et urbains, provoque un abaissement significatif du niveau piézométrique (Habes, 2012 ; ANRH, 2020). Les impacts sont multiples : sur le plan écologique, on observe un effondrement de la biodiversité. La population d'oiseaux migrateurs hivernants est passée de 44 500 individus en 1990 à moins de 20 000 aujourd'hui, mettant en péril des espèces emblématiques telles que l'oie cendrée (*Anser anser*), dont le lac abritait 1 % de la population mondiale (ONEDD, 2022).

D'un point de vue socio-économique, les risques sont tout aussi préoccupants. La pollution chronique de l'oued Seybouse compromet l'usage agricole et domestique de l'eau en aval, exposant les populations à des risques sanitaires. De plus, la perte du potentiel écotouristique du lac autrefois site d'observation ornithologique réputé prive la région d'une source durable de revenus alternatifs. Les déséquilibres hydrologiques induits accentuent la vulnérabilité des écosystèmes et des populations riveraines.

En somme, le lac Fetzara incarne un cas critique de conflit entre développement non planifié et conservation écologique. Seule une gestion intégrée, alliant protection des ressources, restauration écologique et implication communautaire, permettra de sauvegarder durablement cette zone humide stratégique pour l'environnement et les générations futures.

5.3. La Stratégie Nationale de Gestion Durable des Zones Humides en Algérie

La Stratégie Nationale de Gestion Durable des Zones Humides en Algérie est un programme ambitieux et structurant, lancé officiellement en 2015 et couvrant la période jusqu'en 2030, visant à préserver et gérer durablement les zones humides du pays dans une approche écosystémique intégrée (Année 2017, Publié par DGF, WWF).

5.3.1. Objectifs principaux

- Préserver les zones humides et leur fonctionnement écologique afin qu'elles continuent de fournir des services écosystémiques essentiels (régulation hydrique, biodiversité, lutte contre la désertification, adaptation au changement climatique).
- Renforcer la résilience des zones humides face aux changements climatiques et aux pressions anthropiques.
- Assurer une gestion durable et intégrée impliquant tous les acteurs concernés, y compris les gouvernements provinciaux, les associations, et la société civile, dans une démarche participative et multisectorielle.

- Contribuer à la protection des ressources hydriques et à la lutte contre la désertification.

5.3.2. Contexte et portée

- L'Algérie compte environ 2 375 zones humides, dont 50 sites inscrits à la Convention de Ramsar, ce qui en fait le pays africain avec le plus grand nombre de sites Ramsar.
- La stratégie est la première approche globale du pays pour une utilisation rationnelle et durable de ses zones humides dans toute leur diversité (naturelles et artificielles).
- Elle répond aux engagements internationaux de l'Algérie, notamment la Convention de Ramsar, la Convention sur la diversité biologique, et la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques.

5.3.3. Axes stratégiques

- **Inventaire et évaluation**

Consolider l'inventaire national des zones humides, caractériser leur état, analyser les pressions et menaces, et étudier les impacts des plans sectoriels.

- **Gestion écosystémique**

Appliquer une gestion intégrée qui prend en compte les interactions entre les composantes écologiques, hydrologiques, et socio-économiques des zones humides.

- **Renforcement des connaissances et diffusion**

Améliorer la connaissance scientifique et technique des zones humides, des services qu'elles rendent, et diffuser ces informations aux décideurs et au public.

- **Mise à disposition de ressources**

Assurer des moyens humains, financiers et techniques pour la gestion durable des zones humides.

- **Suivi-évaluation**

Développer un cadre de suivi et d'évaluation de la mise en œuvre de la stratégie pour ajuster les actions en fonction des résultats obtenus.

- **Restauration et conservation**

Élaborer et mettre en œuvre des projets de restauration des sites dégradés et intégrer les bonnes pratiques de gestion dans les politiques nationales.

5.3.4. Mise en œuvre et partenariats

- La stratégie a été élaborée avec l'appui technique et financier du Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD), du Fonds Mondial pour la Nature (WWF), et en coordination avec la Convention de Ramsar.
- Elle implique un comité national multisectoriel chargé des zones humides, créé par arrêté ministériel, qui regroupe tous les acteurs concernés.
- La stratégie s'inscrit dans une dynamique de coopération internationale et régionale, notamment avec le Cadre d'Action MedWet 2016-2030.

En résumé, la Stratégie Nationale de Gestion Durable des Zones Humides en Algérie est un cadre global et participatif qui vise à assurer la conservation, la restauration et la gestion intégrée des zones humides du pays, en conciliant développement durable, protection de la biodiversité et adaptation aux changements climatiques.

5.4. Recommandations stratégiques pour la préservation du lac Fetzara

La préservation durable du lac Fetzara, classé zone humide d'importance écologique majeure, nécessite la mise en œuvre d'un ensemble cohérent et intégré de recommandations stratégiques. Ces recommandations s'inscrivent dans le cadre de la Stratégie Nationale de Gestion des Zones Humides, tout en répondant aux spécificités environnementales, hydrologiques et socio-économiques propres à ce territoire.

5.4.1. Renforcement de la surveillance hydrologique et de la qualité des eaux

Il est indispensable de mettre en place un système de suivi en temps réel des paramètres physico-chimiques du lac (salinité, conductivité, concentrations en métaux lourds et nutriments). Le développement d'outils de modélisation hydrologique contribuera à l'anticipation des risques de dégradation, tandis que le renforcement des capacités locales en matière d'analyse et de traitement des données environnementales garantira une meilleure autonomie technique.

5.4.2. Réduction des pressions anthropiques

La maîtrise des pressions exercées par les activités humaines constitue un levier essentiel de restauration écologique :

- Dans le **secteur agricole**, la transition vers des pratiques agros écologiques, le contrôle de l'usage des intrants chimiques et l'installation de zones tampons végétalisées limiteront la pollution diffuse.
- Dans le **secteur industriel**, l'application impérative des normes de rejet et la modernisation des stations de traitement sont nécessaires pour atténuer la contamination des oueds affluents.
- Dans le **secteur urbain**, l'amélioration des infrastructures d'assainissement et la construction de stations d'épuration performantes permettront de réduire la charge polluante émise vers le lac.

5.4.3. Restauration écologique du lac et de son bassin versant

Il convient de restaurer les habitats dégradés, notamment les ceintures végétales (roseaux, joncs, massettes), qui assurent des fonctions essentielles de filtration et d'accueil de la biodiversité. La réhabilitation de la gestion hydraulique, incluant la remise en service des ouvrages tels que l'écluse d'évacuation, est primordiale pour rétablir les cycles naturels d'inondation et de dessèchement, indispensables à l'équilibre écologique du système.

5.4.4. Amélioration de la gouvernance et du cadre institutionnel

Une approche intégrée et participative est recommandée, fondée sur la coordination entre acteurs publics, société civile, usagers et chercheurs. La création d'un comité de gestion multi-acteurs, l'harmonisation des politiques sectorielles (eau, agriculture, urbanisme) et le renforcement du cadre réglementaire constituent des étapes clés pour une gouvernance efficace. La formation des acteurs locaux à la gestion durable des zones humides est également essentielle pour assurer leur engagement dans la préservation du site.

5.4.5. Renforcement de la recherche scientifique et de l'innovation

La mise en place d'un observatoire scientifique permanent permettra d'assurer le suivi écologique régulier du lac, en intégrant les résultats des études faunistiques et floristiques sur les espèces inféodées aux zones humides. Le recours à des techniques innovantes de traitement des eaux et d'analyse environnementale soutiendra l'efficacité des mesures prises.

5.4.6. Mobilisation des populations et sensibilisation environnementale

L'implication des communautés locales dans la protection du lac est un gage de durabilité. Cela suppose le développement de programmes d'éducation environnementale adaptés, des campagnes de sensibilisation sur les bonnes pratiques et la promotion de l'écotourisme responsable comme vecteur de valorisation et de développement local durable.

5.4.7. Mobilisation de financements et partenariats

Enfin, la réussite de ces recommandations dépend fortement de la mobilisation de financements adéquats, tant à l'échelle nationale qu'internationale. Des partenariats stratégiques avec des organisations telles que le WWF ou des agences environnementales internationales permettront d'apporter un appui technique, logistique et financier à long terme.

Afin de synthétiser les différents problèmes environnementaux identifiés autour du lac Fetzara ainsi que les mesures correctives envisagées, le tableau ci-dessous présente un

récapitulatif structuré des principales menaces pesant sur ce système lacustre, accompagnées des solutions proposées.

Tableau 5.2. Récapitulatif des menaces et solutions pour le lac Fetzara

Problèmes / Menaces	Solutions proposées
Pollution des eaux (salinité, métaux lourds, nutriments)	Mise en place d'un suivi physico-chimique permanent, modélisation des risques, renforcement des capacités analytiques locales
Pressions agricoles (engrais, pesticides, drainage des terres)	Promotion de pratiques agroécologiques, zones tampons végétalisées, régulation des projets de mise en valeur agricole
Pollution industrielle (rejets non traités)	Application stricte des normes de rejets, modernisation des stations de traitement des effluents
Urbanisation non contrôlée	Planification urbaine durable, amélioration du réseau d'assainissement, construction de stations d'épuration
Dégradation des habitats naturels (ceintures végétales, berges)	Restaurer les ceintures végétales, réhabilitation écologique des berges et zones humides périphériques
Altération du régime hydrologique (assèchement, recalibrage des oueds)	Réhabilitation de la gestion hydraulique, remise en état des ouvrages de régulation (ex. écluse)
Manque de gouvernance intégrée	Création d'un comité multi-acteurs, harmonisation des politiques sectorielles, formation des gestionnaires
Insuffisance de données scientifiques actualisées	Développement d'études pluridisciplinaires, mise en place d'un observatoire scientifique permanent
Faible implication des populations locales	Programmes de sensibilisation, participation citoyenne, promotion de l'écotourisme durable
Manque de financements et partenariats techniques	Mobilisation de fonds nationaux et internationaux, coopération avec ONG et agences environnementales

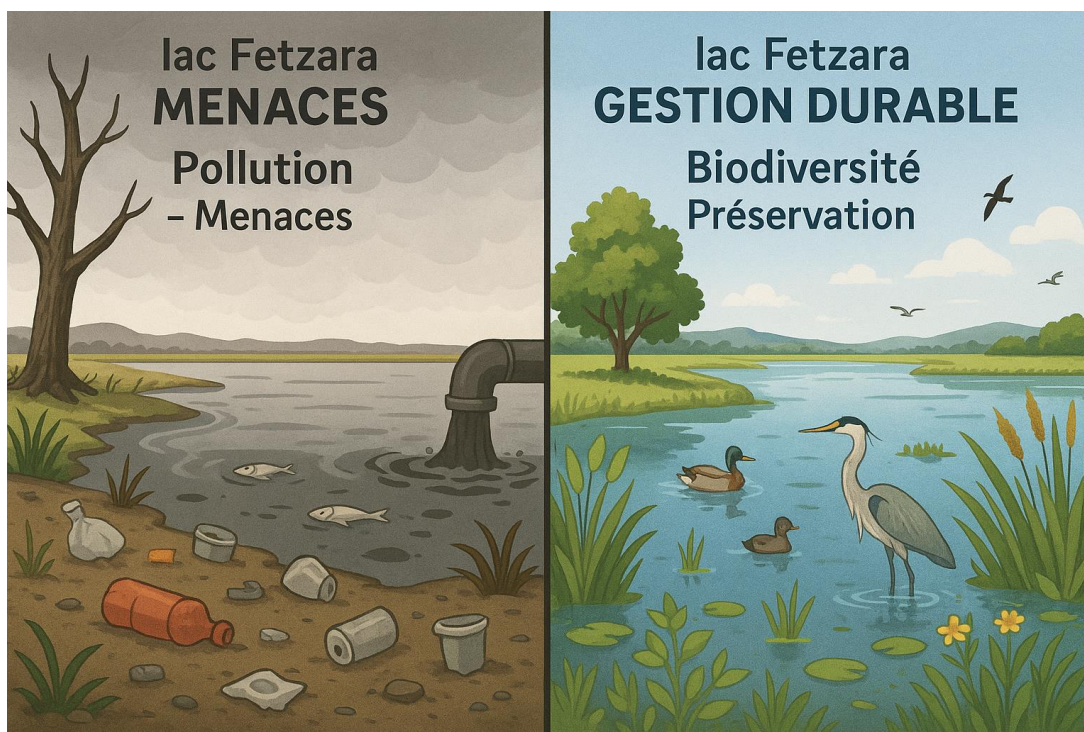


Figure 5.3. Zone humide entre pressions anthropiques et perspectives de conservation durable (Élaborée par l’auteure, 2026)

5.5. Conclusion

L'évaluation approfondie des données scientifiques et environnementales relatives au lac Fetzara révèle une altération progressive de ses équilibres hydriques et écologiques. Cette dégradation résulte de l'interaction entre des facteurs naturels, tels que les caractéristiques géologiques, l'évaporation intense et les échanges nappe-lac ; et des pressions anthropiques croissantes, parmi lesquelles figurent l'agriculture intensive, les rejets d'eaux usées domestiques et industrielles, ainsi que l'urbanisation non maîtrisée. Ces perturbations ont conduit à une détérioration notable de la qualité des eaux, marquée par une salinisation accentuée, une contamination par les nitrates et les métaux lourds, et une modification du fonctionnement hydro-écologique du bassin versant.

Malgré cette vulnérabilité, le lac Fetzara demeure un écosystème clé assurant des services écosystémiques essentiels, notamment la régulation hydrologique, l'épuration naturelle des eaux et le maintien de la biodiversité floristique.

Ce rôle dual, à la fois tampon écologique et récepteur des pollutions, souligne l'urgence d'une approche de gestion intégrée, adaptée aux spécificités locales.

Dans cette perspective, plusieurs recommandations stratégiques ont été formulées. Elles visent notamment à :

- Mettre en œuvre un système de surveillance environnementale performant et continu ;
- Réduire les apports polluants d'origine agricole, urbaine et industrielle ;
- Restaurer les habitats dégradés au sein de la zone humide ;
- Instaurer une gouvernance intersectorielle, inclusive et participative ;
- Renforcer les efforts de recherche appliquée et d'éducation à l'environnement.

La réussite de ces actions repose sur un engagement institutionnel fort, une coordination efficace entre les acteurs concernés, et une mobilisation durable des ressources humaines et financières. Dans le cadre de la Stratégie nationale de gestion durable des zones humides, le lac Fetzara pourrait ainsi devenir un modèle de résilience écologique et de gestion durable, conciliant développement territorial et préservation des écosystèmes



CONCLUSION GÉNÉRALE



Conclusion générale

Cette étude s'inscrit dans le cadre de l'évaluation du rôle des zones humides dans la dynamique de la qualité des eaux souterraines, avec un cas d'application centré sur le lac Fetzara, site classé Ramsar et écosystème stratégique du Nord-Est algérien. L'objectif principal était d'analyser l'impact du lac sur la qualité des eaux destinées à l'irrigation, en combinant des approches hydrochimiques classiques, l'indice IWQI et des modèles d'apprentissage automatique afin de proposer une lecture intégrée et prédictive de la ressource en eau.

Les résultats obtenus montrent que les eaux souterraines de la zone d'étude sont fortement influencées par une variabilité saisonnière marquée. Une dégradation significative de la qualité est observée durant la période estivale, avec une proportion importante de puits classés en catégorie de restriction sévère, traduisant l'effet combiné de l'intensification de l'évaporation, de la concentration des sels dissous et des pressions anthropiques. L'analyse hydrochimique met en évidence la dominance des ions chlorures et sodium, confirmant le rôle majeur de la salinisation dans la détérioration de la qualité des eaux.

Sur le plan méthodologique, l'intégration de l'intelligence artificielle a permis d'améliorer considérablement la compréhension et la prédiction de la qualité des eaux. Le modèle XGBoost a présenté les meilleures performances prédictives ($R^2 = 0,9222$), confirmant la pertinence des approches d'apprentissage automatique dans des environnements hydroclimatiques complexes et non linéaires. L'identification de paramètres clés tels que Cl^- , Na^+ , la conductivité électrique et HCO_3^- constitue une base opérationnelle pour optimiser les futurs programmes de suivi de la qualité des eaux.

L'analyse globale met en évidence un impact environnemental et agricole préoccupant. La dégradation de la qualité des eaux souterraines affecte directement la durabilité des systèmes d'irrigation et contribue à l'aggravation des phénomènes de salinisation des sols, réduisant ainsi la productivité agricole. Par ailleurs, le fonctionnement hydro-écologique du lac Fetzara apparaît progressivement altéré par les

rejets agricoles et urbains, la salinisation et la pression sur les rives, bien que le système conserve encore certaines fonctions essentielles, notamment la régulation hydrologique et le maintien partiel de la biodiversité.

Face à ces constats, plusieurs recommandations de gestion peuvent être formulées. Il est nécessaire de renforcer le suivi régulier de la qualité des eaux par des réseaux de surveillance intégrés, de limiter les rejets polluants agricoles et urbains, et de promouvoir des pratiques d'irrigation raisonnée. La restauration des habitats dégradés et la préservation des fonctions écologiques du lac doivent être considérées comme des priorités dans une démarche de gestion intégrée et participative des ressources en eau.

Enfin, cette recherche ouvre plusieurs perspectives. L'intégration de modèles prédictifs basés sur l'intelligence artificielle pourrait être étendue à d'autres zones humides algériennes afin de développer des outils de gestion généralisables. De même, l'intégration de données climatiques en temps réel et de systèmes de télédétection permettrait d'améliorer encore la précision des modèles. À plus long terme, une approche couplée hydrogéologique écologique numérique pourrait constituer une base solide pour une gestion durable et anticipative des ressources en eau en milieu semi-aride.

En définitive, cette étude met en évidence la complexité et la fragilité des zones humides, mais aussi leur rôle essentiel dans la régulation des ressources hydriques et la résilience des territoires. Le lac Fetzara constitue ainsi un système à fort potentiel écologique et scientifique, dont la durabilité dépendra de la mise en œuvre effective de stratégies de gestion intégrée, associant recherche scientifique, gouvernance institutionnelle et implication des acteurs locaux. Ce travail s'inscrit ainsi dans la dynamique nationale de préservation des zones humides et contribue à la réflexion sur leur rôle dans l'adaptation aux changements globaux et la sécurisation des ressources en eau.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographiques

- A.J.C.I. (1985). *Atlas des zones humides en Algérie*. Agence de la conservation des zones humides, Alger.
- Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2012). *Water quality indices*. Elsevier.
- Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH). (2020). *Rapport national sur les ressources en eau souterraine*. Alger, Algérie
- Ahmed, A. A., Alazba, A. A., & Elhag, A. M. (2019). Spatial assessment of groundwater quality using WQI and GIS in Al-Ula, Saudi Arabia. *Water*, 11(4), 749. <https://doi.org/10.3390/w11040749>
- Ahmed, A. N., Othman, F. B., Afan, H. A., et al. (2022). Machine learning methods for better water quality prediction during 2022: A review. *Scientific Reports*, 12, 1–18. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20035-y>
- Alizadeh, M. J., Nasser, S., Mahvi, A. H., & Nabizadeh, R. (2018). A review of artificial intelligence applications in water quality monitoring. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(9), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6914-z>.
- Annani, M. (2013). *Étude de l'écologie des zones humides au Maroc*. [Thèse de doctorat, Université Mohammed V]. Rabat, Maroc.
- APHA (American Public Health Association). (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. (23e éd.). Rice, E. W., Baird, R. B., & Eaton, A. D. (éds.). Washington, D.C.
- Appelo, C. A. J., & Postma, D. (2005). *Geochemistry, Groundwater and Pollution* (2e éd.). CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Code de l'environnement (France). Article L211-1. Principes généraux de la gestion équilibrée et durable de la ressource en eau. Légifrance. https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000006833095/
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). *Water quality for agriculture* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29 Rev. 1). Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.

- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1994). *Water quality for agriculture* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29 Rev. 1). Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.
- Ayoubi, S., Mokhtari Karchegani, P., Mosaddeghi, M. R., & Honamdan, N. (2017). Soil aggregation and organic carbon as affected by topography and land use change in western Iran. *Soil and Tillage Research*, 121, 18–26.
- Azevedo, J. P. S., de Oliveira, J. S., & de Melo, M. C. (2015). Application of a water quality index (WQI) and multivariate analysis for the assessment of surface water quality. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(8), 530. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4751-2>.
- Bahi, L. (2012). La dégradation des zones humides et ses impacts sur la qualité de l'eau en Algérie. *Journal Algérien de Sciences de l'Eau*, 9(1), 15-29.
- Barbier, E. B., Acreman, M. C., & Knowler, D. (1997). *Economic valuation of wetlands: A guide for policy makers and planners*. Ramsar Convention Bureau.
- Barnaud, G. (1991). *Les zones humides : Ecologie et gestion*. Editions Quae.
- Barnaud, G. (2009). *La biodiversité des zones humides*. Editions Lavoisier.
- Basha, A. A., Ghouse, Basha S., & Sultan, S. A. (2010). Water quality evaluation using water quality index (WQI) method in Saudi Arabia. *International Journal of Applied Environmental Sciences*, 5(3), 433–446.
- Belhamra, M. (2001). *Étude des zones humides de l'est algérien*. [Thèse de doctorat, Université de Annaba]. Annaba, Algérie.
- Bendahmane, H. (2015). Étude de la biodiversité dans les zones humides méditerranéennes. *Revue Algérienne d'Écologie*, 12(1), 45-58.
- Bendahmane, M. (2015). *Évaluation de la qualité des eaux dans les zones humides : cas du lac Fetzara*. [Mémoire de Magister, Université de Annaba]. Annaba, Algérie.
- Bensaci, M., et al. (2005). État de la qualité des eaux dans les zones humides du nord-est algérien. *Journal Algérien des Sciences de l'Eau*, 6(1), 23-35.

- Bidois, J., Heitz, C., Birgand, F., et al. (2018). Impact of agricultural practices on water quality: A case study of nitrate leaching. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 251, 12–22.
- Bishop, C. M. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer, New York.
- Bouder, S., Boumazbeur, A., Bougherira, N., & Zenati, N. (2011). Évaluation de la vulnérabilité à la pollution de la nappe alluviale de la plaine de Tébessa (Algérie) par les méthodes DRASTIC et SI. *Revue des Sciences de l'Eau*, 24(3), 209–225. <https://doi.org/10.7202/1006103ar>.
- Bouderbala, A. (2016). Estimation de la recharge de la nappe alluviale de la plaine de la Mitidja (Algérie) par approche hydrochimique. *Revue des Sciences de l'Eau*, 29(1), 15–28.
- Bougherira, N. (2012). *Caractérisation hydrochimique et évaluation de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines : Cas de la plaine de Tébessa (Algérie)* [Thèse de doctorat, Université d'Annaba]. Annaba, Algérie.
- Bouhali, T., et al. (2022). Stratégies de conservation des zones humides en Algérie. *Journal of Environmental Sciences*, 109, 345-356.
- Boulakassas, R. (2020). *Évaluation de la qualité physico-chimique des eaux de surface et souterraines dans le bassin versant de l'Oued Seybouse* [Thèse de doctorat, Université de Constantine 1]. Constantine, Algérie.
- Boulakhssaïm, A., et al. (2023). *Gestion durable et conservation des zones humides algériennes*. *Journal of Environmental Protection*, 14(2), 221-237.
- Boumezbeur, A. (2002). *Modélisation du transport des polluants dans les aquifères : Cas de la nappe de Tébessa* [Mémoire de Magister, Université d'Annaba]. Annaba, Algérie.
- Bounnouna, A., et al. (1986). Impact des aménagements hydrauliques sur les zones humides algériennes. *Bulletin de l'Agence de l'Eau*, 14, 12-27.
- Bouzegag, A. (2015). *Gestion durable des zones humides en Algérie : cas du lac Fetzara* [Mémoire de Master, Université de Constantine]. Constantine, Algérie.

- Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Brenda, X. (2008). *Hydrologie et qualité des eaux dans les zones humides*. *Journal of Wetland Science*, 22(4), 345-359.
- Carabal, F., et al. (2023). Gestion intégrée des zones humides méditerranéennes. *Journal of Wetland Ecology*, 45(3), 310–327.
- Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 785–794. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>
- Code de l'Environnement (France). Art. L211-1 : Définition et protection des zones humides. Légifrance. <https://www.legifrance.gouv.fr>
- Dabire, H., et al. (2024). Utilisation du machine learning dans la gestion des zones humides. *Journal of Environmental Informatics*, 43(1), 112–130.
- Darrah, S. E., et al. (2023). Carbon dynamics in wetlands under climate stress. *Journal of Environmental Management*, 324, 116477. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116477>
- Debièche, T. (2002). *Évolution physico-chimique des eaux superficielles et souterraines du bassin versant de l'Oued Seybouse (Nord-Est de l'Algérie) : Impacts des pollutions industrielles et urbaines* [Thèse de doctorat, Université d'Annaba]. Annaba, Algérie.
- Derradji, A. (2005). *Étude de la pollution des eaux souterraines dans la zone industrielle de Berrahal (Annaba, Nord-Est algérien)* [Thèse de doctorat, Université d'Annaba]. Annaba, Algérie. (Note : "Denadj" semble être une coquille pour Derradji, auteur majeur de cette période sur Annaba).
- Derradji, A., et al. (2013). Impacts des activités humaines sur les zones humides du lac Fetzara. *Revue Algérienne d'Écologie*, 18(2), 79–95.
- Deshmukh, K. K. (2013). Assessment of water quality index for ground water. *International Journal of Environmental Sciences*, 3(3), 1044–1050.
- DGF (Direction Générale des Forêts). (2002). *Inventaire des zones humides d'Algérie*. Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural, Alger.

- DGF (Direction Générale des Forêts). (2003). *Stratégie nationale de conservation des zones humides*. Ministère de l'Agriculture, Alger.
- DGF (Direction Générale des Forêts). (2004). *Gestion durable des zones humides en Algérie*. Ministère de l'Agriculture, Alger.
- DGF (Direction Générale des Forêts). (2007). *Gestion des ressources en eau et zones humides*. Ministère de l'Environnement, Alger.
- DGF (Direction Générale des Forêts). (2015). *Stratégie et plan d'action pour la gestion durable des zones humides en Algérie 2015-2030*. Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural, Alger.
- DGF (Direction Générale des Forêts) & WWF (World Wildlife Fund). (2017). *Living Wetland Report : Freshwater and wetlands in a changing climate — Adaptation aux contextes des zones humides algériennes*. WWF International & Direction Générale des Forêts, Alger.
- Djabri, L., et al. (2023). *Suivi de la qualité physico-chimique des eaux souterraines dans le Nord-Est algérien*. Rapport technique, Université d'Annaba.
- Djabri, L., Hani, A., Laouar, R., et al. (2008). Potential pollution of groundwater in the Annaba region (Algeria). *European Journal of Scientific Research*, 22(1), 78–89.
- Djamai, R. (2023). *Modélisation et évaluation de la qualité des eaux de surface par les méthodes d'intelligence artificielle* [Thèse de doctorat, Université de Constantine 1]. Constantine, Algérie.
- Erwin, A. E., & Hoekstra, A. Y. (2014). Water footprint scenarios for 2050: A global analysis. *Environment International*, 64, 71–82. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.11.019>
- Erwin, K. L. (2009). Wetlands and global climate change: The role of wetlands in carbon cycling and climate regulation. *Wetlands Ecology and Management*, 17(1), 71–84.
- Fekrache, A. (2014). *Analyse de la qualité des eaux souterraines à Annaba* [Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar]. Annaba, Algérie.

- Fetnaci, S., et al. (2019). Dégradation des zones humides dans le nord-est algérien. *Journal of North African Studies*, 24(3), 391–407.
- Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Fustec, E., & Lefeuvre, J. C. (2000). *Fonctions et gestion des zones humides*. Éditions Tec & Doc.
- Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep Learning*. MIT Press. <http://www.deeplearningbook.org>
- Groot, R. S. de, et al. (2006). Integrating the ecological and economic dimensions in wetland valuation. *Ecological Economics*, 56(1), 6–16. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.01.002>
- Guerbez, A. (2013). *Étude de la qualité des eaux souterraines et risques de pollution dans la plaine de l'Oued Seybouse (Nord-Est Algérien)* [Thèse de doctorat, Université d'Annaba]. Annaba, Algérie.
- Habes, D. (2006). *État écologique des zones humides de la région d'Annaba* [Mémoire de Magistère, Université Badji Mokhtar]. Annaba, Algérie.
- Habes, D., et al. (2012). Évaluation de la qualité des eaux par des indicateurs biologiques. *Ecological Indicators*, 18, 627–637.
- Haggiabi, A. H., et al. (2018). Evaluation of wetlands as natural filters: A case study. *Ecological Engineering*, 114, 27–37.
- Han, D., et al. (2022). Progress in regional groundwater quality assessment: A review. *Journal of Hydrology*, 607, 127503.
- Hem, J. D. (1985). *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water* (3e éd., U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2254). Department of the Interior, Washington, D.C.
- Hilly, J. (1962). Hydrologie et zones humides : principes et applications. *Revue Française d'Hydrologie*, 7(1), 34–56.
- Hutchinson, G. E. (1957). *A Treatise on Limnology: Vol. 1. Geography, Physics, and Chemistry*. Wiley.

- Ikhlef, N., et al. (2023). Modeling of water quality parameters using machine learning techniques: A case study. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 45120–45135.
- James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). *An introduction to statistical learning: with applications in R*. Springer, New York.
- Jatoi, M. A., et al. (2023). Comparative analysis of AI models for water quality prediction. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195, 786. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11345-w>
- JO RA (Journal Officiel de la République Algérienne). (2011). Décret exécutif n° 11-125 du 17 Rabie Ethani 1432 correspondant au 22 mars 2011 fixant les modalités de suivi et d'évaluation de l'état des zones humides. *JO n° 18*.
- Joleaud, L. (1936). Les zones humides d'Algérie. *Bulletin de la Société de Géographie d'Alger*, 12(3), 45–78.
- Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment wetlands* (2e éd.). CRC Press.
- Kahoul, M. (2014). *Évaluation des impacts anthropiques sur le lac Fetzara* [Thèse de doctorat, Université d'Oran]. Oran, Algérie.
- Khelfaoui, N. (2012). *Évaluation de l'impact anthropique sur les zones humides du Nord-Est Algérien* [Mémoire de Master, Université d'Annaba]. Annaba, Algérie.
- Lateef, Z. U. (2011). Spatial assessment of groundwater quality in hilly areas using GIS and WQI. *International Journal of Environmental Sciences*, 1(7), 1772–1783.
- Marre, A. (1992). *Hydrologie des zones humides méditerranéennes*. Éditions Masson.
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment). (2005). *Ecosystems and human well-being: Wetlands and water*. World Resources Institute.
- Mebarki, A. (2009). *Ressources en eau en Algérie : de la rareté à la gestion durable*. Office des Publications Universitaires (OPU), Alger.
- Mebarki, A. (2012). Hydrologie et hydrogéologie des bassins de l'Est Algérien. *Revue de Géographie et d'Aménagement*, 15, 22–38.

- Medouni, K. (1996). *Étude hydrologique des zones humides du nord-est algérien* [Thèse de doctorat, Université de Constantine]. Constantine, Algérie.
- Meireles, A., et al. (2010). Development of water quality indices for rivers in Portugal. *Ecological Indicators*, 10(3), 543–553.
- Mellouk, A., & Arwa, A. (2015). *Le lac Fetzara : une zone humide d'importance internationale. Diagnostic et évaluation de la qualité des eaux* [Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar]. Annaba, Algérie.
- Ménard, S. (2000). *Applied logistic regression analysis* (2e éd.). Sage Publications.
- Mitsch, W. J., & Gosselink, J. G. (2007). *Wetlands* (4e éd.). Wiley.
- Mitsch, W. J., & Gosselink, J. G. (2013). *Wetlands* (5e éd.). John Wiley & Sons.
- Mitsch, W. J., & Gosselink, J. G. (2015). *Wetlands* (5e éd.). Wiley.
- Mitsch, W. J., & Hernandez, M. E. (2013). *Restoring wetlands*. Wiley.
- Mo, Y., et al. (2024). Ensemble learning methods for groundwater pollution prediction. *Science of the Total Environment*, 924, 170323. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170323>
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2012). *Introduction to linear regression analysis* (5e éd.). Wiley.
- Moreno-Matos, A., et al. (2012). Assessment of the chemical quality of groundwater using multivariate analysis. *Journal of Environmental Management*, 110, 150–162.
- Ochoa-Salazar, C. (2008). *Wetland conservation and sustainable use*. Wetlands International.
- ONEDD (Observatoire National de l'Environnement et du Développement Durable). (2022). *Rapport national sur la qualité de l'eau*. Alger, Algérie.
- Quinlan, J. R. (1986). Induction of decision trees. *Machine Learning*, 1(1), 81–106. <https://doi.org/10.1007/BF00116251> (Note : L'article de 1986 est la référence originale pour ID3).

- Quinlan, J. R. (1986). Induction of decision trees. *Machine Learning*, 1(1), 81–106.
- Raachi, S. (2007). *Les zones humides comme filtres naturels de pollution* [Thèse de doctorat, Université de Tizi Ouzou]. Tizi Ouzou, Algérie.
- Rahu, F. A., et al. (2024). Comparison of hybrid machine learning algorithms for water quality prediction. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 2837–2850.
- Ramesh, K., et al. (2019). Use of WQI for assessment of groundwater in semi-arid areas. *Environmental Earth Sciences*, 78, 144.
- Ramsar Convention Secretariat. (2013). *Wise Use of Wetlands* (Ramsar Technical Report No. 8). Gland, Suisse.
- Ramsar Convention Secretariat. (2016). *The Ramsar Convention Manual: A Guide to the Convention on Wetlands* (6e éd.). Gland, Suisse.
- Ramsar Convention Secretariat. (2024). *Global Wetland Outlook: Special Edition 2024*. Ramsar Convention Secretariat, Gland, Suisse.
- Richards, L. A. (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils* (Agriculture Handbook No. 60). U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
- Sahu, P., & Sikdar, P. K. (2008). Hydrochemical framework of the Bengal Basin: A case study. *Journal of the Geological Society of India*, 72(2), 218–227.
- Saifouni, K. (2009). *Étude de l'impact des zones humides sur la qualité des eaux en milieu méditerranéen* [Thèse de doctorat, Université de Montpellier II]. Montpellier, France.
- Saifouni, K. (2020). Protection des zones humides face à l'urbanisation. *Revue Scientifique Algérienne*, 30(3), 120–134.
- Sidek, L., et al. (2024). Application de l'intelligence artificielle pour la surveillance des zones humides. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196, 555.
- Singh, K. R., et al. (2021). Water quality index assessment of groundwater in North Bihar, India. *Applied Water Science*, 11, 25.
- Smola, A. J., & Schölkopf, B. (2004). A tutorial on support vector regression. *Statistics and Computing*, 14(3), 199–222.

- Stéphane, M. (2009). Impacts anthropiques sur la qualité des zones humides méditerranéennes. *Revue Internationale d'Écologie*, 29(2), 101–115.
- Todd, D. K., & Mays, L. W. (2005). *Groundwater Hydrology* (3e éd.). John Wiley & Sons.
- Toumi, A., et al. (2020). Assessment of groundwater quality using WQI and multivariate statistics in the Tébessa region, Algeria. *Water Practice and Technology*, 15(4), 1140–1156.
- Trabelsi, S., et al. (2022). Modélisation de la qualité de l'eau dans les zones humides méditerranéennes. *Water Research*, 198, 117194.
- Tyagi, S., et al. (2013). Water quality index: A review of methods and applications. *American Journal of Water Resources*, 1(3), 34–38.
- Uddin, M. G., et al. (2021). Evaluation of groundwater quality using water quality index (WQI) and multivariate statistical analysis. *Environmental Challenges*, 5, 100337.
- Vapnik, V. N. (1995). *The Nature of Statistical Learning Theory*. Springer-Verlag, New York.
- Vela, E., & Benhouhou, S. (2009). Biodiversité et conservation des zones humides en Algérie. *Ecologia Mediterranea*, 35(1), 9–22.
- Viallard, J. (2012). *Conservation des zones humides et biodiversité*. Éditions Lavoisier.
- Vila, J. P. (1980). *Les zones humides méditerranéennes : aspects écologiques et hydrologiques*. Collection Écologie, CNRS.
- Vymazal, J. (2020). Constructed wetlands for wastewater treatment: Five decades of experience. *Environmental Science & Technology*, 54(1), 46–54.
- Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: Lake and River Ecosystems* (3e éd.). Academic Press.
- WHO (World Health Organization). (2022). *Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first and second addenda*. Genève, Suisse.
- Wilcox, L. V. (1955). *Classification and use of irrigation waters* (Circular No. 969). U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.

- Williams, G. P. (1999). *Sedimentology of aqueous systems*. Elsevier Science.
- Wilmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, 30(1), 79–82.
- WWF (World Wildlife Fund). (2017). *Living Wetland Report: Freshwater and wetlands in a changing climate*. WWF International.
- Yoann, G., et al. (2006). Origine et fonction des zones humides en milieu tempéré. *Revue d'Écologie*, 61(3), 223–234.
- Zaafour, A. (2012). *Impact des rejets industriels sur la qualité des eaux de l'Oued Seybouse* [Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar]. Annaba, Algérie.
- Zahi, F. (2008). *Caractérisation hydrochimique des eaux souterraines de la nappe alluviale d'El Ma Labiod (Tébessa)* [Mémoire de Master, Université d'Annaba]. Annaba, Algérie.
- Zahi, F. (2014). *Qualité des eaux et gestion des zones humides en Algérie* [Thèse de doctorat, Université d'Alger]. Alger, Algérie.
- Zahi, F. (2018). *Suivi environnemental du lac Fetzara* [Mémoire de master, Université de Annaba]. Annaba, Algérie.
- Zahi, F. (2022). *Dynamique spatio-temporelle de la pollution dans les zones humides du Nord-Est algérien* [Thèse de doctorat, Université d'Annaba]. Annaba, Algérie.
- Zahi, F., Bensalem, R., & Khelifi, L. (2013). Évaluation de la qualité des eaux autour du lac Fetzara. *Revue Nord-Africaine d'Environnement*, 3(1), 17–28.
- Zahi, F., Bensalem, R., & Khelifi, L. (2013). Qualité physico-chimique des eaux des zones humides algériennes. *Revue des Sciences de l'Eau*, 26(2), 185–200.
- Zedam, M. (2015). *Gestion des zones humides méditerranéennes et leurs impacts sur la qualité de l'eau* [Thèse de doctorat, Université d'Alger]. Alger, Algérie.
- Zedler, J. B. (2003). Wetlands at your service: reducing impacts of agriculture at the watershed scale. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 1(2), 65–72.

- Zedler, J. B., & Kercher, S. (2005). Wetland resources: Status, trends, ecosystem services, and restorability. *Annual Review of Environment and Resources*, 30, 39–74.
- Zedler, J. B., & Kercher, S. (2023). *Wetland restoration: Principles and practices*. Springer.
- Zenati, N. (1999). *Contribution à l'étude hydrogéologique de la plaine de Tébessa* [Mémoire de Magister, Université d'Annaba]. Annaba, Algérie.
- Zenati, R. (2010). *Suivi spatio-temporel de la qualité des eaux du lac Fetzara* [Mémoire de Magistère, Université Badji Mokhtar]. Annaba, Algérie.
- Zeng, X., et al. (2024). Deep learning architectures for global water quality monitoring: A comprehensive review. *Journal of Environmental Management*, 351, 119854.
- Zhou, Q., et al. (2022). Wetlands as natural water purifiers: A review. *Science of The Total Environment*, 837, 155867.
- Zouhri, L., et al. (2018). Modeling of groundwater flow and salinity in the coastal aquifer of the Nile Delta. *Hydrological Sciences Journal*, 63(1), 115–129.