



École nationale polytechnique

Département d'hydraulique

Laboratoire de recherche
des sciences de l'eau



Mémoire de projet de fin d'étude
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en hydraulique

Impact du bassin versant de Bounamoussa sur la qualité de l'eau

Réalisé par :

BENSARI Ouahiba

Soutenu le 29 Juin 2024

Membres de jury

| | | |
|---------------|----------------------|-----|
| Présidente | Pr. BENMAMAR Saâdia | ENP |
| Promotrice | Dr. CHETIBI Meriem | ENP |
| Co-Promotrice | Pr. ARRAR Jazia | ENP |
| Examineur | Mr. BORDJIHENE Fahim | ENP |
| Examineur | Mr. MESSAHLI Rabie | ENP |



École nationale polytechnique

Département d'hydraulique

Laboratoire de recherche
des sciences de l'eau



Mémoire de projet de fin d'étude
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en hydraulique

Impact du bassin versant de Bounamoussa sur la qualité de l'eau

Réalisé par :

BENSARI Ouahiba

Soutenu le 29 Juin 2024

Membres de jury

| | | |
|---------------|----------------------|-----|
| Présidente | Pr. BENMAMAR Saâdia | ENP |
| Promotrice | Dr. CHETIBI Meriem | ENP |
| Co-Promotrice | Pr. ARRAR Jazia | ENP |
| Examineur | Mr. BORDJIHENE Fahim | ENP |
| Examineur | Mr. MESSAHLI Rabie | ENP |

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à tous les gens que j'aime et qui m'aiment.

À ma mère et à mon père, pour leur amour inconditionnel, leur soutien, et leurs sacrifices qui m'ont permis de parvenir jusqu'ici.

À ma sœur **Lamia** et à mon frère **Abdellah**,

À mes cousines et cousins, avec une mention spéciale pour **Oumaima** et **Yasser**.

À ma grand-mère **Mimi** et à mon grand-père,

À **Tata Hassiba**, mes oncles, et ma tante **Saliha**.

À la mémoire de mon grand-père, de ma grand-mère et de tata **Nadjia**,

À toute ma promotion, et tout spécialement à **Amel**, **Ines**, **Belkis**, **Chaima**, **Lina**, et **Houda**.

À mes meilleures amies, **Maria**, **Katia** et **Meriem**.

Remerciement

Je remercie d'abord Dieu pour m'avoir donné la force et la patience pour accomplir ce travail.

Je tiens ensuite à exprimer ma profonde gratitude à mes encadrantes, **Dr. Chetibi Meriem** et **Pr. Arrar Jazia**. Leur aide, leurs conseils, et leur soutien ont été essentiels pour la réussite de ce projet de fin d'études. Leur disponibilité et leurs encouragements ont été très précieux pour moi.

Je remercie aussi tous les doctorants du laboratoire de Recherche des sciences de l'Eau. Leur aide et leurs conseils ont beaucoup contribué à ce travail.

Je tiens également à remercier les membres du jury, notamment **Pr. Saâdia BENMAMAR**, présidente du jury, ainsi que **Mr. Fahim BORDJIHENE** et **Mr. Rabie MESAHLI**, pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

ملخص

دراستنا هي جزء من تقييم تأثير متجمعات المياه في بوناموسا على جودة المياه في سد الشفية. وكشف تحليل خصائص هذا الحوض لتقييم جودة المياه، تم. أن بعضها يؤثر سلبا على جودة المياه، بينما يساهم البعض الآخر بشكل إيجابي في الاحتفاظ بالتلوث والحد منه استخدام مؤشرين: مؤشر باسكارون ومؤشر مجلس وزراء البيئة الكندي. أظهرت النتائج أن جودة المياه جيدة بشكل عام، وهو ما يفسره وجود خنادق طبيعية تعمل كمناطق عازلة وانخفاض تضاريس الحوض. من أجل تحديد التأثير النسبي لكل معلمة فيزيائية كيميائية في مؤشر كسم، تم استخدام طريقة الانحدار الخطي. وكشف هذا التحليل أن مؤشر كسم يركز أساسا على المعلمات النيتروجين والفوسفور، في حين أن مؤشر باسكارون يعطي أهمية للمعلمات العضوية. لتقييم جودة المياه بشكل صحيح، من المهم فهم أهمية كل معلمة في كل مؤشر من المؤشرات. أتاح التحليل الزمني للبيانات التنبؤ بتطور جودة المياه، مما يشير إلى وجود اتجاه إيجابي بشكل عام في المعلمات. للحفاظ على هذه النوعية الجيدة، من الضروري الحفاظ على المناطق العازلة وإدارتها بشكل فعال والجمع بين هذه الإجراءات والتقييم المنتظم لجودة المياه.

الكلمات المفتاحية: الأراضي الرطبة، المياه السطحية، تلوث التربة، تلوث المياه، جودة المياه ومؤشرات جودة المياه.

Abstract

Our study is part of the evaluation of the impact of the Bounamoussa watershed on the water quality of the Cheffia dam. The characteristics of this basin contribute to the retention of pollution. To assess the quality of the water, two indices have been determined for this purpose : the Bascaron index and that of the Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). It emerges from this study that the water quality is moderately good, which is explained by the presence of natural ditches serving as buffer zones and by the low topography of the basin. Based on linear regression, the CCME index focuses mainly on nitrogen and phosphorus parameters, while the Bascaron index gives importance to organic parameters. The chronological analysis of the data made it possible to predict the evolution of water quality, indicating a generally positive trend in the various parameters. To maintain this good quality, it is essential to preserve and effectively manage the buffer zones, combining these actions with a regular quality assessment

Keywords : Wetlands - Surface waters - Soil pollution - Water pollution - Water quality - Water quality indices.

Résumé

Notre étude s'inscrit dans le cadre de l'évaluation de l'impact du bassin versant de Bou-namoussa sur la qualité de l'eau du barrage Cheffia. Les caractéristiques de ce bassin contribuent à la rétention de la pollution. Pour évaluer la qualité de l'eau, deux indices ont été déterminés à cet effet : l'indice de Bascaron et celui du conseil canadien des ministres de l'Environnement (CCME). Il ressort de cette étude que la qualité de l'eau est moyennement bonne, ce qui s'explique par la présence de fossés naturels servant de zones tampons et par la topographie basse du bassin. En se basant sur la régression linéaire, l'indice du CCME se concentre principalement sur les paramètres azotés et phosphorés, tandis que l'indice de Bascaron accorde une importance aux paramètres organiques. L'analyse chronologique des données a permis de prédire l'évolution de la qualité de l'eau, indiquant une tendance globalement positive des différents paramètres. Pour maintenir cette bonne qualité, il est essentiel de préserver et de gérer efficacement les zones tampons, en combinant ces actions avec une évaluation régulière de la qualité de l'eau.

Mots clés : Zones humides - Eaux de surface - Pollution des sols - Pollution des eaux - Qualité de l'eau - Indices de qualité des eaux.

Table des matières

Liste des tableaux

Table des figures

Liste de Notations

Liste des Abréviations

| | |
|---|-----------|
| Introduction | 16 |
| 1 Généralités sur les zones humides | 18 |
| 1.1 Introduction | 18 |
| 1.2 Définition des zones humides | 18 |
| 1.2.1 Zone humide naturelles et les zones humides artificielles | 18 |
| 1.3 Caractéristiques des zones humides | 19 |
| 1.3.1 Caractéristiques écologiques | 19 |
| 1.3.2 Caractéristiques biologiques | 20 |
| 1.3.3 Caractéristiques climatiques | 20 |
| 1.3.4 Caractéristiques pédologiques | 21 |
| 1.3.5 Caractéristiques culturelles | 21 |
| 1.4 Zones humides dans le monde et en Algérie | 21 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1.4.1 | Dans le monde | 21 |
| 1.4.2 | En Algérie | 22 |
| 1.5 | Zones tampons | 25 |
| 1.5.1 | Zones tampons sèches | 27 |
| 1.5.1.1 | Dispositifs enherbés | 27 |
| 1.5.1.2 | Dispositifs ligneux | 27 |
| 1.5.1.3 | Dispositifs de type talus ou merlon | 28 |
| 1.5.1.4 | Dispositifs de type fossé | 28 |
| 1.5.2 | Zones tampons humides | 28 |
| 1.5.2.1 | Dispositifs de type plan d'eau | 29 |
| 1.5.2.1.1 | Mares et étang | 29 |
| 1.5.2.1.2 | Retenues collinaires | 29 |
| 1.5.2.1.3 | Zones humides artificielles | 29 |
| 1.6 | Conclusion | 30 |
| 2 | Présentation de la zone d'étude | 31 |
| 2.1 | Introduction | 31 |
| 2.2 | Situation géographique du bassin versant de Bounamoussa | 31 |
| 2.3 | Situation géographique du barrage la Cheffia | 32 |
| 2.4 | Caractéristiques du bassin versant de Bounamoussa | 34 |
| 2.4.1 | Topographie | 34 |
| 2.4.2 | Hydrologie | 36 |
| 2.4.2.1 | Précipitation | 36 |
| 2.4.2.2 | Réseau hydrographique | 36 |
| 2.4.3 | Pédologie | 37 |
| 2.4.4 | Occupation du sol | 37 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.4.5 | Couverture végétale | 38 |
| 2.5 | Conclusion | 46 |
| 3 | Pollution des eaux et des sols | 47 |
| 3.1 | Introduction | 47 |
| 3.2 | Généralités sur la pollution | 47 |
| 3.2.1 | Source de la pollution | 47 |
| 3.2.1.1 | Pollution domestique | 47 |
| 3.2.1.2 | Pollution industrielle | 48 |
| 3.2.1.3 | Pollution agricole | 48 |
| 3.2.2 | Types de polluants | 48 |
| 3.2.2.1 | Polluants organiques | 48 |
| 3.2.2.2 | Polluants inorganiques | 49 |
| 3.3 | Pollution des eaux | 49 |
| 3.3.1 | Processus de transfert des polluants vers le milieu aquatique | 50 |
| 3.3.2 | Conséquences de la pollution des eaux de surfaces | 51 |
| 3.4 | Pollution des sols | 52 |
| 3.4.1 | Contamination des Sols | 52 |
| 3.4.2 | Impacts de la contamination du sol | 53 |
| 3.5 | Qualité de l'eau | 54 |
| 3.6 | Conclusion | 54 |
| 4 | Méthodes d'évaluation de la qualité de l'eau du barrage Cheffia | 55 |
| 4.1 | Introduction | 55 |
| 4.2 | Méthodes | 55 |
| 4.2.1 | Indice de qualité de l'eau (Bascaron.1979) | 55 |
| 4.2.2 | Indice de qualité de l'eau du CCME | 58 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.2.3 | Calcul des poids de la méthode CCME | 61 |
| 4.2.4 | Prédiction des tendances futures des paramètres | 62 |
| 4.2.4.1 | Analyse chronologique | 62 |
| 4.3 | Conclusion | 64 |
| 5 | Résultats et discussion | 65 |
| 5.1 | Introduction | 65 |
| 5.2 | Evolution des paramètres | 65 |
| 5.3 | Moyenne et variance des paramètres | 72 |
| 5.4 | Indice de qualité de l'eau | 73 |
| 5.4.1 | Indice de qualité de l'eau de Bascaron | 73 |
| 5.4.2 | Indice de qualité du CCME | 75 |
| 5.5 | Comparaison des Indices de Qualité de l'Eau : CCME et Bascaron | 77 |
| 5.5.1 | Comparaison des poids des paramètres physico-chimiques | 78 |
| 5.5.1.1 | Evaluation de la fiabilité de la méthode de régression linéaire multiple | 79 |
| 5.6 | Discussion sur la qualité de l'eau du barrage du Cheffia | 80 |
| 5.6.1 | Analyse chronologique | 82 |
| 5.7 | Conclusion | 87 |
| | Conclusion générale | 88 |
| | Bibliographie | 90 |

Liste des tableaux

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | Les sites Ramsar et leur superficie en hectares par continent. | 21 |
| 1.2 | Les pays possédant le plus grand nombre de sites Ramsar sur leurs continents respectifs | 22 |
| 1.3 | Les sites Ramsar en Algérie. | 23 |
| 2.1 | Les caractéristiques du barrage Cheffia (BERMAD, 1990) | 33 |
| 2.2 | La répartition des surfaces en fonction des altitude pour le bassin des côtières Constantinois-Est et de Bounamoussa | 35 |
| 2.3 | La classification des pentes sur le bassin versant des côtières Constantinois-Est et de Bounamoussa (SHENG, 1993). | 35 |
| 4.1 | Les valeurs de référence nécessaires pour développer l'Indice de Qualité de l'Eau de Bascaron (KIM et al., 2020). | 57 |
| 4.2 | La classification de la qualité de l'eau selon l'Indice de Qualité de l'Eau déterminées à partir de la méthode de Bascaron. (PESCE et al., 2000) | 58 |
| 4.3 | La classification de la qualité de l'eau selon l'indice de qualité de l'eau déterminées à partir de la méthode du CCME (KHAN et al., 2005). | 59 |
| 5.1 | Les normes de l'OMS | 66 |
| 5.2 | La variance et la moyenne de chaque paramètre pendant la période 2018-2022. | 72 |
| 5.3 | L'évaluation de la qualité de l'eau selon l'indice de qualité de l'eau de Bascaron | 73 |
| 5.4 | L'évaluation de la qualité de l'eau selon l'indice de qualité de l'eau du CCME | 75 |
| 5.5 | La légende des classifications de la qualité de l'eau | 77 |

| | | |
|-----|--|----|
| 5.6 | Le poids de chaque paramètre dans le calcul de l'indice de qualité de l'eau du CCME. | 78 |
| 5.7 | Le poids de chaque paramètre dans le calcul de l'indice de qualité de l'eau de Bascaron. | 79 |
| 5.8 | Les erreurs absolues des paramètres | 87 |

Table des figures

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | La répartition des zones humides à l'échelle mondiale | 22 |
| 1.2 | La répartition des zones humides en Algérie (Selon la liste Ramsar) | 25 |
| 2.1 | La localisation géographique du bassin versant de Bounamoussa | 32 |
| 2.2 | La situation géographique de barrage de la Cheffia (DERRADJI, 2016) | 33 |
| 2.3 | La carte des altitudes du bassin versant des CCE et de Bounamoussa. | 39 |
| 2.4 | La carte des pentes du BV des CCE et de Bounamoussa | 40 |
| 2.5 | Les précipitations moyennes mensuelles du BV des CCE et de Bounamoussa, de 1981 à 2024 | 41 |
| 2.6 | La carte hydrographique du bassin versant des CCE et de Bounamoussa | 42 |
| 2.7 | La carte pédologique du bassin versant des CCE et de Bounamoussa | 43 |
| 2.8 | L'occupation du sol du bassin versant des CCE et de Bounamoussa. | 44 |
| 2.9 | Les zones humides présentes dans Le bassin versant des CCE et de Bounamoussa d'après la liste Ramsar 1.3. | 45 |
| 3.1 | Un schéma simplifié des risques associés à la pollution des sols. | 54 |
| 5.1 | L'évolution du pH pendant la période 2018-2022. | 66 |
| 5.2 | L'évolution de l'oxygène dissous pendant la période 2018-2022. | 67 |
| 5.3 | L'évolution des nitrates pendant la période 2018-2022. | 67 |
| 5.4 | L'évolution des nitrites pendant la période 2018-2022. | 68 |
| 5.5 | L'évolution de l'ammonium pendant la période 2018-2022. | 69 |

| | | |
|------|---|----|
| 5.6 | L'évolution des phosphates pendant la période 2018-2022. | 70 |
| 5.7 | L'évolution de la DBO5 pendant la période 2018-2022. | 70 |
| 5.8 | L'évolution de la DCO pendant la période 2018-2022. | 71 |
| 5.9 | La comparaison des indices de qualité de l'eau. | 77 |
| 5.10 | La Comparaison entre l'IQE réel et l'IQE estimé | 79 |
| 5.11 | Les contre-pentes à proximité du Barrage Cheffia. | 81 |
| 5.12 | Les contres pentes et leurs profils de dénivelé. | 81 |
| 5.13 | Les contres pentes et leurs profils de dénivelé. | 82 |
| 5.14 | L'évolution du pH pendant la période 2023-2030. | 83 |
| 5.15 | L'évolution de l'oxygène dissous pendant la période 2023-2030 | 83 |
| 5.16 | L'évolution des nitrates pendant la période 2023-2030 | 84 |
| 5.17 | L'évolution des nitrates pendant la période 2023-2030 | 84 |
| 5.18 | L'évolution de l'ammonium pendant la période 2023-2030 | 85 |
| 5.19 | L'évolution des phosphates pendant la période 2023-2030 | 85 |
| 5.20 | L'évolution de la DBO5 pendant la période 2023-2030 | 86 |
| 5.21 | L'évolution de la DCO pendant la période 2023-2030 | 86 |

Liste de Notations

| | |
|------------------------|---|
| C_i | Valeur attribuée (en %) à chaque paramètre après la normalisation |
| W_i | Poids attribué à chaque paramètre |
| k | Évaluation subjective de la détérioration de l'eau par une personne non spécialisée dans les problèmes environnementaux |
| F_1 | Étendue |
| F_2 | Fréquence |
| F_3 | Amplitude |
| $sncé$ | Somme normalisée des coefficients d'écart |
| Y | Variable dépendante |
| X_1, X_2, \dots, X_n | Variables indépendantes |
| a_0 | Constante d'interception |
| a_1, a_2, \dots, a_n | Coefficients de régression |
| \hat{Y} | Variable dépendante estimée |
| ε | Erreur |
| \bar{Y} | Variable dépendante moyenne |
| \bar{X} | Variable indépendante moyenne |
| Y^* | Variable dépendante prédite |

Liste des Abréviations

| | |
|-------------|---|
| FAO | Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture est une organisation spécialisée du système des Nations unies |
| IQE | Indice de qualité de l'eau |
| CCME | Conseil canadien des ministres de l'Environnement |
| cce | côtiers Constantinois-Est |
| BV | Bassin versant |
| pH | Potentiel hydrogène |
| O_2d | Oxygène dissous |
| NO_3^- | Nitrate |
| NO_2^- | Nitrite |
| NH_4^+ | Ammonium |
| PO_4^{3-} | Phosphate |
| DBO5 | Demande biochimique en oxygène sur 5 jours |
| DCO | Demande chimique en oxygène |

Introduction

L'eau, constituant premier de l'environnement et des êtres vivants, est un élément fondamental présent dans tous les organismes, des cellules les plus simples aux êtres les plus complexes. Au-delà de son importance pour les organismes vivants, l'eau est un élément indispensable de l'environnement terrestre. Elle intervient dans le cycle de l'eau, la régulation du climat, la formation des paysages, la fourniture d'un habitat pour la biodiversité et le maintien de l'équilibre des écosystèmes.

Bien que l'eau soit la source de vie, elle peut également devenir un vecteur de pollution, menaçant la santé des écosystèmes et des êtres humains. L'eau, en tant que solvant universel et fluide en mouvement, peut transporter une grande variété de substances, y compris des polluants.

Les écosystèmes d'eau douce comprennent une variété d'habitats tels que les rivières, les lacs, et les zones humides. Ces habitats diffèrent par leur composition et leurs caractéristiques, et évoluent au fil du temps sous l'influence de deux facteurs principaux : les variations climatiques à différentes échelles temporelles et les impacts des activités humaines. La dégradation de la qualité de l'eau est une cause majeure de pénurie pour l'alimentation du bétail, l'irrigation et les usages industriels, en particulier dans les régions semi-arides et arides.

Dans les bassins versants la pollution des cours d'eau est étroitement liée aux différentes activités notamment les mauvaises pratiques de rejets industriels, agricoles et domestiques sous traitement préalable, mais également aux eaux de ruissellement et pluies qui peuvent trainer des quantités importantes de polluants tels que les résidus, les engrais, les pesticides, les métaux lourds etc.

L'évaluation de la qualité de l'eau se fait à partir de la détermination de différents paramètres tels que : Le pH, la couleur, l'oxygène dissous, les nitrates, les nitrites, les phosphates, l'ammonium, la DBO5 et la DBO. Au vu du nombre important de paramètres, les chercheurs ont mis en place les indices de qualité de l'eau tel que : Bascaron, CCME et la méthode arithmétique. En effet, le suivi d'un seul paramètre est souvent insuffisant pour identifier précisément les sources de pollution et son comportement.

Dans le cadre actuel de la politique de gestion durable des ressources en eau, la prédiction du risque de pollution et la protection de ces ressources sont essentielles, tout comme la protection des écosystèmes aquatiques, indispensable à l'équilibre écologique des populations locales (DIMANE et al., 2017) et (YOVO et al., 2017). Le travail de recherche présenté dans ce document porte sur l'impact du bassin versant de Bounamoussa sur la qualité de l'eau. En effet, un bassin versant est une zone géographique délimitée par des lignes de crête, où toutes les eaux de surface et souterraines convergent vers un point de sortie commun, généralement un cours d'eau, une rivière ou un lac. La qualité de l'eau dans un bassin versant résulte d'une interaction complexe entre les caractéristiques du bassin, les activités humaines et les changements climatiques.

Ce mémoire est divisé en cinq chapitres. Le premier chapitre traite des généralités sur les zones humides, y compris les zones tampons. Dans le deuxième chapitre, nous présentons la zone en détaillant les cartes topographiques, hydrologiques, pédologique et d'occupation du sol. Le troisième chapitre aborde la pollution des sols ainsi que celle des eaux, qui est ensuite analysée dans le quatrième chapitre qui est consacré à la méthodologie d'évaluation de la qualité de l'eau ainsi qu'à la prédiction de cette dernière. Enfin, le cinquième chapitre détaille les résultats obtenus à partir de l'application des indices de qualité de l'eau et de la prédiction de l'évolution.

Chapitre 1

Généralités sur les zones humides

1.1 Introduction

Ce chapitre sera consacré à la définition des zones humides, à l'exposé de leur importance et de leur répartition dans le monde et en Algérie, ainsi qu'à la présentation des zones tampons et de leurs fonctions.

1.2 Définition des zones humides

La Convention sur les zones humides (Ramsar, Iran, 1971) définit le terme « zone humide » dans ses articles 1.1 et 2.1 :

- (Article 1.1), les zones humides sont des « étendues de marais, de fagnes, de tourbières ou d'eaux naturelles ou artificielles, permanentes ou temporaires, où l'eau est stagnante ou courante, douce, saumâtre ou salée, y compris des étendues d'eau marine dont la profondeur à marée basse n'excède pas six mètres».
- (Article 2.1), les zones humides peuvent « inclure des zones de rives ou de côtes adjacentes à la zone humide et des îles ou des étendues d'eau marine d'une profondeur supérieure à six mètres à marée basse, entourées par la zone humide ».

1.2.1 Zone humide naturelles et les zones humides artificielles

D'après la Convention de Ramsar, signée en Iran en 1971, les zones humides naturelles sont classées comme suit :

Zones humides marines : Comprenant les zones côtières telles que les lagunes côtières,

les berges rocheuses et les récifs coralliens.

Zones humides lacustres : Associées aux lacs.

Zones humides riveraines : Bordant les rivières et les cours d'eau.

Zones humides palustres : Comprenant les marais, les marécages et les tourbières.

Zones humides estuariennes : Englobant les deltas, les marais côtiers et les mangroves.

La Convention de Ramsar a également mentionné l'existence de **zones humides artificielles** telles que :

- Zones de stockage des eaux (réservoirs, retenues, etc.).
- Étangs (agricoles, petits réservoirs, etc.).
- Étangs d'aquaculture, pisciculture, élevage.
- Exploitations de sel, salines.
- Excavations (gravières, bassins de rétention, etc.).
- Traitements des eaux usées (épandage, décantation, etc.).
- Terres irriguées (rizières, canaux, fossés).
- Terres arables agricoles inondées de manière saisonnière.

1.3 Caractéristiques des zones humides

Les caractéristiques des zones humides se divisent en plusieurs catégories notamment, les caractéristiques écologiques, biologiques, climatiques, pédologiques et culturelle (BOUBEKEUR, 2021).

1.3.1 Caractéristiques écologiques

- Une zone humide se comporte comme un immense organisme vivant, dont la respiration est influencée par les fluctuations régulières et cycliques des eaux basses et hautes. Ces fluctuations hydrologiques influencent la géomorphologie du cours d'eau, sa dynamique, ainsi que les qualités écologiques qu'il offre comme habitat pour la faune et la flore.
- Les zones humides jouent un rôle essentiel dans la maintenance et l'amélioration de la qualité de l'eau en agissant comme un filtre épurateur :
 - **Filtre physique**, car elles favorisent la formation de sédiments, y compris la capture d'éléments toxiques tels que les métaux lourds, la rétention des matières en suspension... ;

- **Filtre biologique**, en favorisant les dégradations biochimiques grâce aux bactéries, la désinfection par destruction des gènes pathogènes grâce aux ultraviolets, l'absorption et le stockage de substances indésirables ou polluantes par les végétaux.
- Ces zones contribuent ainsi à la régulation des régimes hydrologiques. Lorsqu'elles ne sont pas gorgées d'eau, les zones humides ralentissent en général l'écoulement des eaux de pluie et empêchent le transfert immédiat des eaux de surface vers les cours d'eau situés en aval. Elles retiennent temporairement l'excès d'eau pour le libérer progressivement pendant les périodes de sécheresse.

1.3.2 Caractéristiques biologiques

- Les zones humides favorisent l'alimentation de nombreuses espèces animales, tant localement que par exportation de matière organique à distance, grâce à leur abondance en éléments nutritifs.
- Les zones humides offrent un abri, un refuge et des zones de repos, notamment pour les poissons et les oiseaux. Ces fonctions biologiques confèrent aux zones humides une capacité extraordinaire à générer de la matière vivante, se distinguant ainsi par une productivité biologique nettement supérieure à celle des autres milieux.
- La haute productivité biologique des zones humides conduit à une importante production agricole (comme l'herbage, le pâturage, l'élevage, les rizières, les cressonnières, l'exploitation forestière, les roseaux, etc.), ainsi qu'à une activité piscicole (pêche, pisciculture¹) et conchylicole² (moules, huîtres, etc.).

1.3.3 Caractéristiques climatiques

Selon (**fustec1996fonctions**) cité par (BOUBEKEUR, 2021) les zones humides contribuent également à la régulation des microclimats. Les précipitations et la température atmosphérique peuvent être localement influencées par les phénomènes d'évaporation intense de l'eau à travers les terrains et la végétation (évapotranspiration) typiques des zones humides. Elles peuvent ainsi atténuer les effets des sécheresses, ce qui les rend ainsi bénéfiques à certaines activités agricoles.

1. Elevage des poissons destinés à la consommation.

2. Elevage de coquillages.

1.3.4 Caractéristiques pédologiques

Les zones humides jouent un rôle important dans la stabilisation et la protection des sols. La végétation adaptée à ces milieux aide à fixer les berges et les rivages, contribuant ainsi à préserver les terres contre l'érosion.

1.3.5 Caractéristiques culturelles

Les zones humides possèdent des caractéristiques uniques en raison de leur importance dans le patrimoine culturel de l'humanité. Elles sont étroitement associées à des croyances religieuses et cosmologiques, servent de sources d'inspiration esthétique, constituent des sanctuaires pour les espèces sauvages et sont fondamentales pour de nombreuses traditions locales (Document d'information Ramsar n° 1 extrait du site ([Ramsar.](#)))

1.4 Zones humides dans le monde et en Algérie

1.4.1 Dans le monde

Un site Ramsar est une zone humide considérée comme d'une importance internationale, reconnue et inscrite sur la liste établie par un État partie à la Convention de Ramsar. D'après la liste Ramsar publiée le 18 avril 2024, le monde possède 2 434 zones humides couvrant une superficie totale de 256 347 959 hectares.

Le tableau 1.1 illustre le nombre de sites Ramsar et la superficie en hectares par continent.

TABLE 1.1 – Les sites Ramsar et leur superficie en hectares par continent.

| Continent | Nombre de Sites Ramsar | Superficie (ha) |
|------------------|------------------------|-----------------|
| Afrique | 65 | 69 791 017 |
| Amérique du Nord | 347 | 28 059 217 |
| Amérique du Sud | 274 | 63 688 458 |
| Asie | 1174 | 84 357 970 |
| Europe | 1731 | 42 024 424 |
| Océanie | 41 | 11 869 839 |

La figure 1.1 présente la répartition des zones humides à l'échelle mondiale (photo extraite du site Ramsar : [Ramsar.](#))

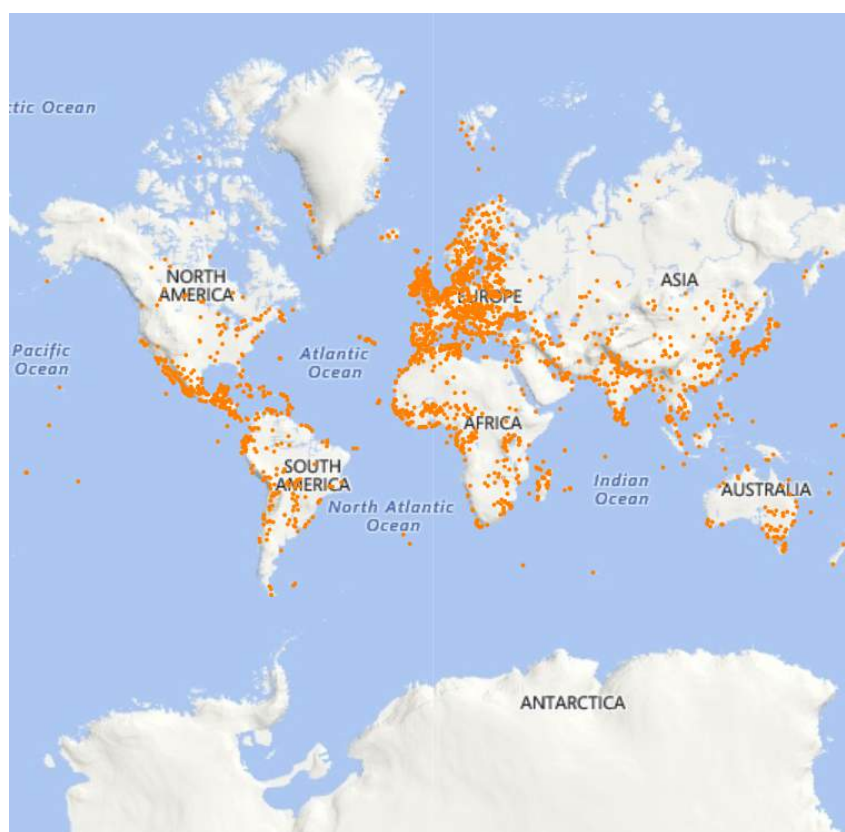


FIGURE 1.1 – La répartition des zones humides à l'échelle mondiale

Le tableau 1.2 présente les pays qui possèdent le plus grand nombre de sites Ramsar sur leurs continents respectifs.

TABLE 1.2 – Les pays possédant le plus grand nombre de sites Ramsar sur leurs continents respectifs

| Continent | Pays | Nombre de Sites Ramsar | Superficie (ha) |
|------------------|-------------|------------------------|-----------------|
| Afrique | Algérie | 50 | 3 032 813 |
| Amérique du Nord | Mexique | 144 | 8 721 911 |
| Amérique du Sud | Argentine | 23 | 5 716 578 |
| Asie | Inde | 80 | 1 332 200 |
| Europe | Royaume-Uni | 175 | 1 282 630 |
| Océanie | Australie | 67 | 8 385 487 |

1.4.2 En Algérie

D'après la liste Ramsar, l'Algérie possède 50 sites Ramsar couvrant une superficie de 3 032 813 hectares.

Le tableau 1.3 présente les sites Ramsar existants en Algérie, avec leurs dates d'inscription, leurs localisations, leurs superficies et leurs coordonnées.

TABLE 1.3 – Les sites Ramsar en Algérie.

| Site Ramsar | Date | Localisation | Superficie (ha) | Coordonnées |
|--|------------|----------------------------|-----------------|--------------------|
| Aulnaie de Aïn Khiar | 04/06/2003 | El Tarf | 180 | 36°47' N 008°18' E |
| Chott Aïn El Beïda | 12/12/2004 | Ouargla | 6853 | 31°58' N 005°19' E |
| Chott Ech Chergui | 02/02/2001 | Saïda | 855500 | 34°16' N 000°33' E |
| Chott El Beïdha-Hammam Essoukhna | 12/12/2004 | Sétif, Batna | 12223 | 35°55' N 005°49' E |
| Chott El Hodna | 02/02/2001 | M'Sila, Batna | 362000 | 35°26' N 004°41' E |
| Chott Melghir | 04/06/2003 | El Oued, Biskra, Khenchela | 551500 | 34°15' N 006°30' E |
| Chott Merrouane et Oued Khrouf | 02/02/2001 | El-Oued | 337700 | 33°53 N 006°10 E |
| Chott Oum El Raneb | 12/12/2004 | Ouargla | 7155 | 32°02 N 005°23 E |
| Chott Sidi Slimane | 12/12/2004 | Ouargla | 616 | 33°17 N 006°02 E |
| Chott Tinsilt | 12/12/2004 | Oum El Bouaghi | 2154 | 35°52 N 006°28 E |
| Chott de Zehrez Chergui | 04/06/2003 | Djelfa | 50985 | 35°12 N 003°31 E |
| Chott de Zehrez Gharbi | 04/06/2003 | Djelfa | 52200 | 34°56 N 002°48 E |
| Complexe de zones humides de la plaine de Guerbes-Sanhadja | 02/02/2001 | Skikda, El Tarf | 42100 | 36°52 N 007°18 E |
| Dayet El Ferd | 12/12/2004 | Tlemcen | 3323 | 34°29 N 001°14 W |
| Garaet Annk Djemel et El Merhsel | 12/12/2004 | Oum El Bouaghi | 18140 | 35°47 N 006°48 E |
| Garaet El Taref | 12/12/2004 | Oum El Bouaghi | 33460 | 35°40 N 007°07 E |
| Garaet Guellif | 12/12/2004 | Oum El Bouaghi | 24000 | 35°47'N 006°58'E |
| Garaet Timerganine | 18/12/2009 | Oum El Bouaghi | 1460 | 35°39 N 006°57 E |
| Grande Sebkhad'Oran | 02/02/2001 | Oran | 56870 | 35°31 N 000°47 E |
| Grotte karstique de Ghar Boumâaza | 06/04/2003 | Tlemcen | 20000 | 34°40 N 001°22 W |
| Gueltates Aflal | 06/04/2003 | Tamanrasset | 20900 | 23°08 N 005°43 E |
| Ile de Rachgoun | 05/06/2011 | Ain Témouchent | 66 | 35°19 N 001°28 W |
| La Réserve Naturelle du Lac des Oiseaux | 22/03/1999 | El Tarf | 120 | 36°46 N 008°07 E |
| La Vallée d'Iherir | 02/02/2001 | Tassili n'Ajjer | 57892 | 25°19 N 008°28 E |

| | | | | |
|---|------------|----------------|--------|------------------|
| Lac Boulhilet | 18/12/2009 | Oum El Bouaghi | 856 | 35°43 N 006°46 E |
| Lac Fetzara | 04/06/2003 | Annaba | 12000 | 36°47 N 007°30 E |
| Lac de Télamine | 12/12/2004 | Oran | 2399 | 35°44 N 000°22 E |
| Lac du barrage de Boughezoul | 05/06/2011 | Méd'a | 9058 | 35°41 N 002°47 E |
| Le Cirque de Aïn Ouarka | 06/04/2003 | Nâama | 2350 | 32° |
| Gueltates d'Issakaras-sene | 02/02/2001 | Tamanrasset | 35100 | 23°23 N 005°42 E |
| Salines d'Arzew | 12/12/2004 | Oran, Mascara | 5778 | 35°41 N 000°19 E |
| Marais de Bourdim | 18/12/2009 | El Tarf | 59 | 36°48 N 008°15 E |
| Marais de la Macta | 02/02/2001 | Mascara | 44500 | 35°38 N 000°06 E |
| Marais de la Mekhada | 06/04/2003 | El Tarf | 8900 | 36°47 N 008°00 E |
| Oasis de Moghrar et de Tiout | 04/06/2003 | Nâama | 195500 | 32°41 N 000°24 E |
| Oasis de Ouled Saïd | 02/02/2001 | Adrar | 25400 | 29°26 N 000°17 E |
| Oasis de Tamantit et Sid Ahmed Timmi | 02/02/2001 | Adrar | 95700 | 27°45 N 000°19 E |
| Oglat Ed Daïra | 12/12/2004 | Nâama | 23430 | 33°18 N 000°54 E |
| Oum Lâagareb | 05/06/2011 | El Tarf | 729 | 36°49 N 008°11 E |
| Réserve Intégrale du Lac El Mellah | 12/12/2004 | El Tarf | 2257 | 36°53 N 008°19 E |
| Réserve Intégrale du Lac Oubeïra | 04/11/1983 | El Tarf | 2200 | 36°50 N 008°23 E |
| Réserve Intégrale du Lac Tonga | 11/04/1983 | El Tarf | 2700 | 36°51 N 008°30 E |
| Réserve Naturelle du Lac de Béni-Bélaïd | 04/06/2003 | Jijel | 600 | 36°52 N 006°06 E |
| Réserve Naturelle du Lac de Réghaïa | 06/04/2003 | Alger | 842 | 36°47 N 003°20 E |
| Sebkhet Bazer | 12/12/2004 | Sétif | 4379 | 36°02'N 005°41 E |
| Sebkhet El Hamiet | 12/12/2004 | Sétif | 2509 | 35°54 N 005°33 E |
| Sebkhet El Melah | 12/12/2004 | Ghard'ia | 18947 | 30°30 N 002°55 E |
| Sebkhet Ezzmoul | 18/12/2009 | Oum El Bouaghi | 6765 | 35°52 N 006°32 E |
| Tourbière du Lac Noir | 06/04/2003 | El Tarf | 5 | 36°51 N 008°12 E |
| Vallée de l'oued Soummam | 18/12/2009 | Béjaïa | 12453 | 36°36 N 004°45 E |

La Figure 1.2 présente la répartition des zones humides en Algérie selon Ramsar :

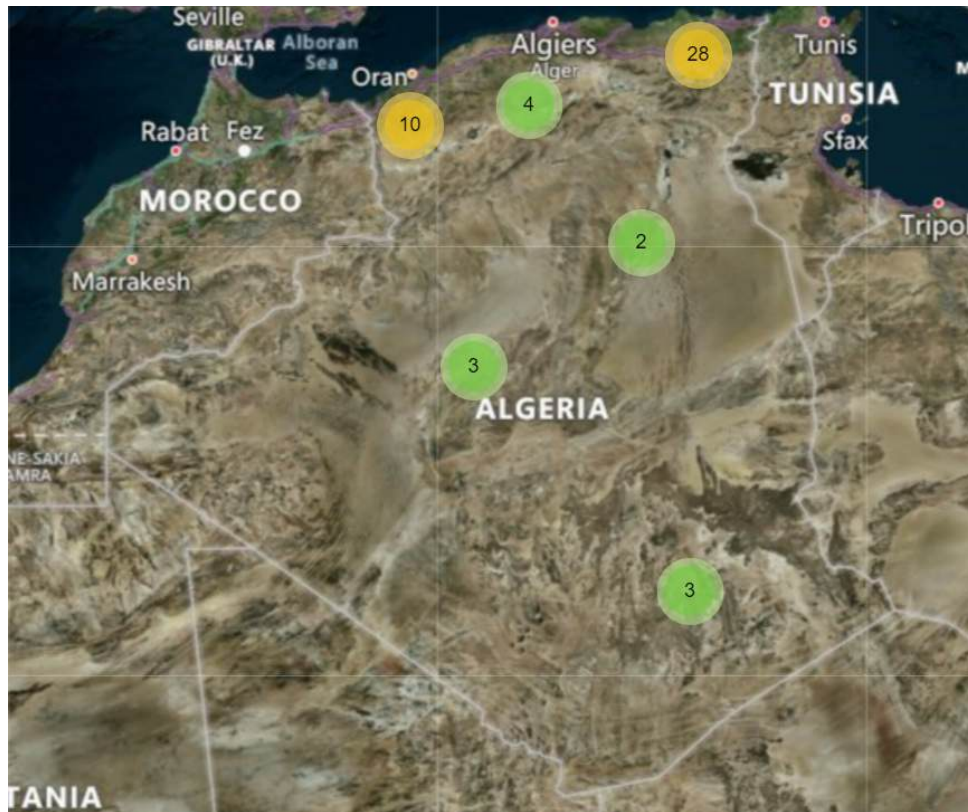


FIGURE 1.2 – La répartition des zones humides en Algérie (Selon la liste Ramsar)

1.5 Zones tampons

Les zones tampons sont des zones inter-parcellaires qui peuvent atténuer les transferts hydriques de contaminants d'origine agricole tels que les matières en suspension (MES), les nitrates, l'azote organique, le phosphore et les produits phytosanitaires vers les milieux aquatiques (CARLUER et al., 2017)

Les zones tampons doivent être positionnées de manière à intercepter les écoulements transportant les contaminants. Elles doivent être riches en matière organique pour favoriser l'adsorption et offrir un long temps de séjour, ainsi qu'une activité biologique accrue pour la dégradation des contaminants (CARLUER et al., 2020).

Selon (CORPEN, 2007), les fonctions environnementales des zones tampons peuvent être divisées en sept catégories principales :

- **La fonction d'atténuation hydrique** consiste à ralentir le ruissellement, diminuer son volume et réduire les pics de débit grâce à leur rugosité hydraulique et leur perméabilité.

- **La fonction de rétention des matières en suspension (MES)** consiste à ralentir le ruissellement et augmenter l'infiltration grâce à leur rugosité hydraulique et leur densité de végétation, favorisant ainsi le dépôt des particules érodées.
- **La fonction de limitation du transfert du phosphore** consiste à ralentir le ruissellement et augmenter l'infiltration, favorisant ainsi la rétention du phosphore particulaire avec les matières en suspension (MES) et l'absorption partielle du phosphore dissous par le sol et les végétaux.
- **La fonction de limitation du transfert hydrique de produits phytosanitaires** consiste à intercepter ces substances, principalement sous forme dissoute et colloïdale, lors des premières pluies efficaces, favorisant leur rétention par adsorption sur la matière organique et les particules fines du sol, ainsi que leur dégradation par les milieux traversés, notamment par l'infiltration et la sédimentation.
- **La fonction de limitation du transfert de l'azote** consiste à réduire le ruissellement et favoriser l'infiltration, permettant ainsi la dénitrification et la rétention de l'azote, principalement sous forme de nitrate, par la végétation et les processus microbiens, notamment dans les zones présentant des conditions d'anaérobiose près des cours d'eau, avec une largeur d'environ une dizaine de mètres permettant une efficacité significative.
- **La fonction de protection contre la dérive de pulvérisation des produits de traitement** consiste à agir comme des zones non traitées clairement identifiées, permettant ainsi de réduire la dérive de pulvérisation vers les cours d'eau en éloignant le traitement du point d'eau et en fournissant un écran physique supplémentaire grâce à leur végétation permanente. Une largeur typique de 5 mètres peut réduire significativement la proportion de produit potentiellement interceptée par un cours d'eau, mais des données expérimentales supplémentaires sont nécessaires pour préciser l'efficacité en fonction des caractéristiques spécifiques de la zone tampon (hauteur, largeur, structure).
- **La fonction de préservation de la qualité biologique des cours d'eau** consiste à créer et diversifier les habitats aquatiques en modifiant l'ambiance climatique du cours d'eau et en apportant des débris organiques ligneux de taille variée. Cette végétation crée des caches pour les poissons, fournit de l'ombre pour réguler la température de l'eau et limiter la production primaire, et offre une source de matière organique essentielle à l'écosystème aquatique. Ces effets contribuent à maintenir la biodiversité et favorisent le bon état écologique des cours d'eau.

Les zones tampons peuvent être classées selon différentes caractéristiques telles que le type de végétation en place, la géométrie, l'état hydrique, etc., incluant des cas mixtes ou intermédiaires. Cinq catégories sont distinguées selon (CATALOGNE et al., 2016) :

- Les dispositifs enherbés ;
- Les dispositifs ligneux ;
- Les dispositifs de type talus ou merlon ;
- Les dispositifs de type fossé ;
- Les dispositifs de type plan d'eau.

Bien que cette typologie soit pratique d'un point de vue descriptif, elle ne garantit pas toujours des fonctionnalités similaires pour une même catégorie de dispositif. Il est en réalité nécessaire de comprendre les conditions de conception et d'implantation pour déterminer quel type de zone tampon utiliser en fonction de l'objectif recherché (CATALOGNE et al., 2016).

1.5.1 Zones tampons sèches

Les zones tampons sèches regroupent généralement les dispositifs enherbés, les dispositifs ligneux ainsi que les dispositifs de type fossé (CARLUER, 2021) , (CATALOGNE et al., 2016).

1.5.1.1 Dispositifs enherbés

Les dispositifs enherbés regroupent toutes les zones tampons où la végétation, qu'elle soit spontanée ou implantée, est composée d'espèces herbacées. Ce sont probablement les dispositifs les plus rustiques, c'est-à-dire les plus faciles à planter et à entretenir, ainsi que les moins coûteux. Cependant, ils ne sont pas adaptés à tous les types de contaminants et de transfert, et peuvent nécessiter une grande emprise au sol pour atteindre une efficacité satisfaisante (CATALOGNE et al., 2016).

1.5.1.2 Dispositifs ligneux

Les dispositifs ligneux sont des dispositifs dont la végétation est principalement constituée d'espèces arborées³ et arbustives⁴. Cette caractéristique leur permet d'accomplir des

3. Plantes généralement de grande taille, caractérisées par un tronc ligneux et un système racinaire développé. Elles comprennent les arbres qui peuvent atteindre une hauteur considérable.

4. Les espèces arbustives sont des plantes ligneuses plus petites que les arbres, avec des tiges ramifiées dès la base, généralement plus courtes que les arbres.

fonctions supplémentaires par rapport aux dispositifs enherbés et de mieux répondre à certaines situations. Cependant, ils requièrent un entretien plus rigoureux que les dispositifs enherbés et, lorsqu'ils sont implantés à partir de zéro, ils n'atteignent leur pleine maturité ou efficacité qu'après plusieurs années (CATALOGNE et al., 2016).

1.5.1.3 Dispositifs de type talus ou merlon

Les talus ou merlons sont de petites élévations de terre situées en bordure de parcelle, généralement d'une hauteur comprise entre 50 cm et 1,5 m. Qu'ils soient recouverts d'herbe ou plantés de haies, leur impact principal réside dans leur capacité à influencer les flux d'eau dans les zones rurales. Ils agissent en perturbant localement les écoulements superficiels, en déviant l'eau ou en la retenant temporairement (CATALOGNE et al., 2016).

1.5.1.4 Dispositifs de type fossé

Ce type de dispositif est typiquement une zone tampon intermédiaire, avec des caractéristiques similaires aux dispositifs enherbés et aux plans d'eau. En milieu rural, les fossés ont traditionnellement pour fonction de drainer les eaux pour limiter l'érosion et assainir les parcelles agricoles, tout en recueillant les eaux de voirie (CATALOGNE et al., 2016). Ils font ainsi partie du réseau hydrographique et, en étant placés en tête de réseau, ils sont une interface principale entre les parcelles agricoles et les milieux aquatiques de surface. Par conséquent, ils jouent un rôle essentiel dans la collecte et le transport des contaminants d'origine agricole, et sont souvent vus comme un facteur aggravant car ils permettent une circulation rapide des eaux contaminées vers les milieux aquatiques récepteurs (CATALOGNE et al., 2016).

Cependant, en tant qu'espaces interstitiels souvent présents dans les paysages agricoles, ils offrent une opportunité : avec une conception et une gestion appropriées, les fossés peuvent assurer des fonctions de rétention et d'épuration, surtout lorsqu'ils sont bien végétalisés (CATALOGNE et al., 2016).

1.5.2 Zones tampons humides

Les zones tampons humides regroupent les dispositifs de type plan d'eau.

1.5.2.1 Dispositifs de type plan d'eau

Ce type de dispositif inclut tout plan d'eau à surface libre, qu'il soit artificiel ou naturel, conçu pour intercepter et stocker temporairement tout ou une partie des flux d'eau et des contaminants provenant des parcelles agricoles situées en amont. Ces dispositifs sont particulièrement adaptés à la gestion des écoulements hydrauliquement concentrés, qu'il s'agisse de transferts par ruissellement déjà organisés (fossés) ou de transferts par drainage agricole (CATALOGNE et al., 2016).

1.5.2.1.1 Mares et étang

Les mares et étangs se présentent comme des étendues d'eau de taille variable, permanentes ou temporaires. Leur faible profondeur favorise la pénétration du rayonnement solaire et l'enracinement des végétaux sur le fond (au moins sur les berges). Ils sont souvent le résultat d'une intervention humaine dans des milieux naturellement humides et peuvent être soumis à une gestion hydraulique spécifique pour réguler leur niveau d'eau, principalement dans le cas des étangs. Leur alimentation provient généralement du ruissellement, bien que cela puisse également être le résultat de zones d'affleurement⁵ de nappes peu profondes (CATALOGNE et al., 2016).

1.5.2.1.2 Retenues collinaires

Les retenues collinaires sont des réserves artificielles d'eau, situées dans les bas-fonds des terrains vallonnés et encerclées par une ou plusieurs digues ou barrages. Elles sont alimentées lors des périodes de pluies par le ruissellement des eaux ou par un cours d'eau permanent ou intermittent. L'eau ainsi stockée peut-être utilisée à diverses fins, les plus courantes étant l'irrigation et le maintien du débit minimal des cours d'eau (CATALOGNE et al., 2016).

1.5.2.1.3 Zones humides artificielles

Il s'agit d'ouvrages rustiques, spécifiquement aménagées en aval d'un réseau de collecte des écoulements concentrés (fossés, drains agricoles), pour stocker temporairement l'eau et favoriser son épuration avant qu'elle ne soit renvoyée au milieu aquatique récepteur. La présence d'eau stagnante favorise l'implantation rapide d'espèces végétales spécifiques des zones humides (CATALOGNE et al., 2016).

5. Une nappe d'eau souterraine apparaît à la surface de la Terre.

1.6 Conclusion

La préservation et la gestion des zones humides sont cruciales pour l'équilibre écologique et la biodiversité. De plus, ces zones humides peuvent agir comme des zones tampons. Ces dernières, qu'elles soient sèches ou humides, protègent les cours d'eau de la pollution agricole en réduisant les transferts de contaminants. Une gestion adéquate de ces zones favorise la durabilité des ressources en eau et préserve les écosystèmes aquatiques.

Chapitre 2

Présentation de la zone d'étude

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter la zone d'étude, comprenant le barrage Cheffia et le bassin versant de Bounamoussa, et expliquer comment certains paramètres de ce bassin versant peuvent influencer l'augmentation de la pollution.

2.2 Situation géographique du bassin versant de Bounamoussa

La zone d'étude fait partie du bassin versant des côtiers Constantinois-Est et s'étend sur 2868,34 Km² entre la longitude 7°94' et 8°31' Est et la latitude 36°38' et 36°69' Nord. Il faut noter qu'une partie du bassin versant, qui couvre la plaine d'Ain El-karma, est située dans le territoire tunisien .

La figure 2.1 présente la localisation géographique du bassin versant de Bounamoussa que nous avons élaborée à l'aide du logiciel ArcGIS.

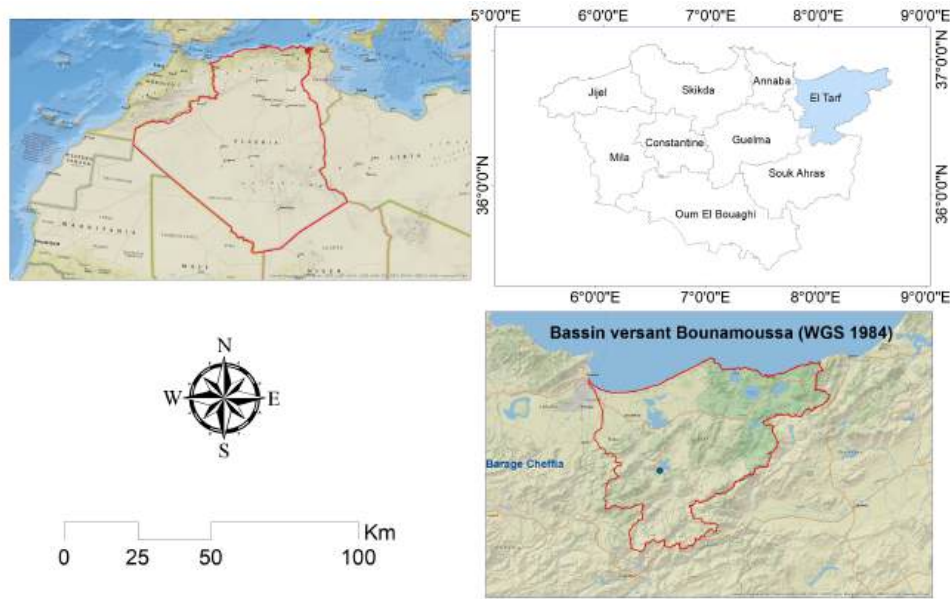


FIGURE 2.1 – La localisation géographique du bassin versant de Bounamoussa

2.3 Situation géographique du barrage la Cheffia

Le barrage de Cheffia, se trouve à 40 kilomètres au sud-est de la ville d'Annaba et à 42 kilomètres au sud-ouest d'El Tarf sur les territoires des communes de Cheffia et Daira de Bouteldja. Il s'étend sur une superficie de 1000 hectares. Il est limité :

- Au Nord par les communes de Cheffia et Asfour.
- À l'Ouest par la commune d'Asfour.
- Au Sud par les communes de Hammam Béni Salah et Bouhadjar.
- A l'Est par la commune de Cheffia.

Le barrage de la Cheffia est d'une importance capitale pour l'économie de la wilaya de Annaba ainsi que pour ses installations industrielles et agricoles. La figure 2.2, présente la situation géographique du barrage de la Cheffia

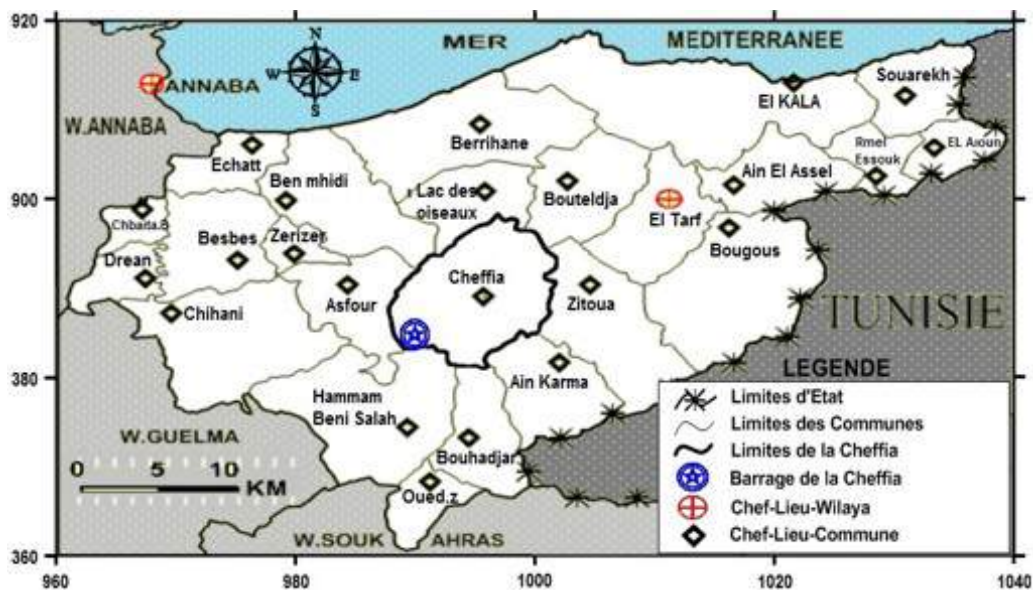


FIGURE 2.2 – La situation géographique de barrage de la Cheffia (DERRADJI, 2016)

La construction de ce barrage était destinée à répondre à quatre objectifs (BERMAD, 1990) :

- Alimentation en eau potable de la ville de Annaba ainsi que celle de Bouhadjar.
- Alimentation des complexes industriels et en particulier celui de la S.N.S d'E-Hadjar.
- Irrigation du périmètre de la Bounamoussa et celui de la Cheffia.
- Régularisation des crues de l'oued Bounamoussa et réduction des inondations vers la plaine.

La tableau 2.1, présente les caractéristiques du barrage la Cheffia.

TABLE 2.1 – Les caractéristiques du barrage Cheffia (BERMAD, 1990)

| Caractéristique | Valeur |
|------------------------------|----------------------------|
| Barrage | Cheffia |
| Oued | Bounamoussa |
| Construction | 1959-1965 |
| Cote maximale de la retenue | 165 m |
| Volume de la retenue | 168 483 000 m ³ |
| Surface de la retenue | 9 870 000 m ² |
| Superficie du bassin versant | 575 km ² |
| Volume régularisé | 95 hm ³ |

2.4 Caractéristiques du bassin versant de Bounamoussa

Le bassin versant de Bounamoussa fait partie du bassin versant des côtières Constantinois-Est. Les caractéristiques de ce dernier influencent le bassin versant de Bounamoussa. Par conséquent, dans notre étude, nous allons prendre en considération les caractéristiques des deux bassins versants.

2.4.1 Topographie

La topographie du bassin versant, en particulier son altitude et sa pente, influencent directement le ruissellement des eaux de surface et, par conséquent, le transport de polluants. La topographie est essentielle pour évaluer la pollution dans un bassin versant et son impact sur le cours d'eau. Elle aide à localiser les zones sensibles à la pollution, c'est-à-dire les zones où les contaminants peuvent s'accumuler ou se déplacer plus facilement. De plus, l'étude topographique permet la modélisation des écoulements d'eau et de contaminants, ce qui aide à prédire leur propagation. Cette étude permet ainsi d'identifier les zones à risque de pollution et de planifier des mesures de protection adaptées pour préserver la qualité de l'eau.

Nous avons élaboré toutes les cartes du bassin versant des côtières Constantinois-Est et de Bounamoussa (pentes, altitudes, courbes de niveau, précipitations, pédologie, occupation des sols) en utilisant le Modèle Numérique de Terrain MNT qui offre une représentation numérique du relief terrestre. Ce modèle a été téléchargé gratuitement depuis le site de l'USGS disponible sur le lien suivant ([USG](#)).

La figure 2.3 , page 39, présente la carte des altitudes du bassin versant des côtières Constantinois-Est et de Bounamoussa.

Nous avons calculé la surface de chaque classe d'altitude à l'aide d'ArcGIS (Tableau 2.2).

TABLE 2.2 – La répartition des surfaces en fonction des altitude pour le bassin des côtiers Constantinois-Est et de Bounamoussa

| Altitude (m) | Surface (%) | Surface (km ²) |
|--------------|-------------|----------------------------|
| -16 – 72 | 34,43 | 987,671 |
| 72 – 180 | 15,82 | 453,772 |
| 190 – 290 | 12,37 | 355,05 |
| 300 – 400 | 11,90 | 341,55 |
| 410 – 520 | 8,99 | 257,91 |
| 530 – 660 | 6,89 | 197,72 |
| 670 – 830 | 5,10 | 146,50 |
| 840 – 1000 | 3,15 | 90,39 |
| 1100 – 1400 | 1,31 | 37,74 |

Le tableau illustre la répartition des surfaces en fonction de l'altitude pour tout le bassin versant. Les données sont organisées en sept classes d'altitude, allant de -16 à 1400 mètres. Chaque altitude est associée à la surface correspondante en kilomètres carrés (km²) ainsi qu'en pourcentage. On observe une diminution progressive de la surface avec l'augmentation de l'altitude. Cela signifie que la majorité de la zone se situe à des altitudes relativement basses, tandis que les zones de haute altitude sont plus restreintes.

Le tableau 2.3 présente la projection de la classification des pentes sur le bassin versant de Bounamoussa. Cette classification a été élaborée selon le modèle de classification de Sheng 1993 (SHENG, 1993).

TABLE 2.3 – La classification des pentes sur le bassin versant des côtiers Constantinois-Est et de Bounamoussa (SHENG, 1993).

| Pente | Classe (°) |
|------------|------------|
| Faible | ≤ 7 |
| Modérée |]7 – 15] |
| Forte |]15 – 20] |
| Très Forte |]20 – 25] |
| Raide |]25 – 30] |
| Très raide | > 30 |

D'après la carte des pentes, figure 2.4 page 40, on remarque une variation des pentes, ce qui pourrait être à l'origine d'infiltration, de ruissellement, ou de pollution.

Les zones de faible pente ont tendance à retenir l'eau plus longtemps, ce qui peut favoriser l'accumulation de polluants provenant de diverses activités (agricoles, industrielles,

etc.). Cette rétention de l'eau peut favoriser le transport des polluants vers les nappes phréatiques. Les fortes pentes favorisent l'augmentation de la vitesse d'écoulement, ce qui peut entraîner l'érosion des sols ainsi que le transport des polluants vers le cours d'eau.

2.4.2 Hydrologie

L'hydrologie englobe les précipitations et le réseau hydrographique, et leur influence sur la pollution des bassins versants.

2.4.2.1 Précipitation

Les précipitations peuvent influencer l'augmentation de la pollution dans un bassin versant de plusieurs manières. Notamment, le ruissellement des eaux sur les surfaces imperméabilisées entraîne le transport des polluants vers le cours d'eau. De même, le ruissellement des eaux sur des fortes pentes augmente la vitesse d'écoulement et transporte également les polluants vers le milieu aquatique. De plus, les précipitations intenses peuvent provoquer l'érosion des sols, entraînant le transport de sédiments et de substances polluantes vers le cours d'eau.

La Figure 2.5, page 41, présente la carte des précipitations mensuelles moyennes du bassin versant des côtières Constantinois-Est et de Bounamoussa pour la période de 1981 à 2024. Nous l'avons élaboré à l'aide des données CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data), disponibles sur le site ([CHIRPS](#)).

La carte montre que ce bassin se situe globalement dans une zone de précipitations moyennes à fortes. Cela peut favoriser le transport des polluants par le ruissellement des précipitations.

2.4.2.2 Réseau hydrographique

La carte hydrographique, figure 2.6 page 42, permet de localiser précisément les cours d'eau et les zones humides, qui sont les milieux récepteurs de la pollution. Elle montre ainsi le réseau de drainage, c'est-à-dire comment l'eau s'écoule à travers le bassin versant. Cela renseigne sur les voies potentielles de transport des polluants. De plus, cette carte peut identifier les zones où il y a un risque d'accumulation de la pollution tout en superposant les informations sur les sources de pollution (industries, agriculture, assainissement, etc.) avec le réseau hydrographique.

2.4.3 Pédologie

La pédologie est indispensable à l'étude de la pollution du sol, car elle permet d'analyser la distribution des polluants et leurs interactions avec le sol. En examinant les caractéristiques du sol (physiques, chimiques, etc.), elle aide à évaluer comment les polluants se déplacent dans le sol, s'accumulent, se dégradent, voire même être absorbés par les plantes.

Nous avons téléchargé la carte pédologique de l'Afrique depuis le site de la FAO qui est disponible sous l'adresse : ([FAO](#)) , puis nous l'avons projetée sur le bassin versant de Bounamoussa en utilisant le logiciel ArcGIS, (figure [2.7](#)) page 43.

D'après la carte pédologique, cette zone est constituée de cambisols calciques, de luvisols glaïques, de vertisols chromiques et de vertisols péliques. En référence à la carte mondiale des sols, 1 :5000000 vol 1. Légende (FAO-UNESCO., [1975](#)), ces types de sols sont peu perméable ce qui peut favoriser le transport des polluants vers les cours d'eau lors du ruissellement des précipitations.

2.4.4 Occupation du sol

La carte d'occupation du sol nous permet de cartographier les différentes activités humaines telles que l'agriculture, l'industrie, etc. Cette cartographie nous aide ensuite à localiser les sources potentielles de pollution et à évaluer leur proximité avec les cours d'eau.

Nous avons téléchargé la carte d'occupation du sol depuis le site Esri | Sentinel-2 Land Cover Explorer, puis nous l'avons projetée et élaborée à l'aide du logiciel ArcGIS, (figure [2.8](#)) page 44. Le site est disponible sous l'adresse : ([Sentinel-2](#))

D'après la carte d'occupation du sol, on constate la présence de zones agricoles , Cela peut poser problème en raison de l'utilisation des produits chimiques comme les engrais et les pesticides, qui peuvent être à l'origine de la contamination du sol et des eaux. Ces contaminants peuvent être transportés vers le cours d'eau par ruissellement, drainage ou infiltration. Ainsi, le mode de transfert hydrique joue un rôle important dans le transport et la dispersion des contaminants dans l'environnement. De plus, la présence de zones urbanisées est également préoccupante, car les rejets provenant de ces zones peuvent contribuer à la pollution des cours d'eau.

2.4.5 Couverture végétale

Le bassin versant des côtiers Constantinois-Est présente plusieurs zones humides répertoriées sur la liste de Ramsar. À cet effet, nous avons élaboré la carte illustrée par la figure 2.9 , page 45, à l'aide de Google Earth, qui présente les zones humides présentes dans le bassin versant d'après la liste Ramsar 1.3.

La présence des zones humides dans le bassin versant des côtiers Constantinois-Est joue un rôle essentiel dans la filtration et l'épuration naturelle de l'eau. Elles piègent les sédiments et les polluants, absorbent les nutriments en excès, et favorisent la dégradation des produits chimiques nocifs. Ces processus contribuent positivement à l'amélioration de la qualité de l'eau dans le bassin versant de Bounamoussa.

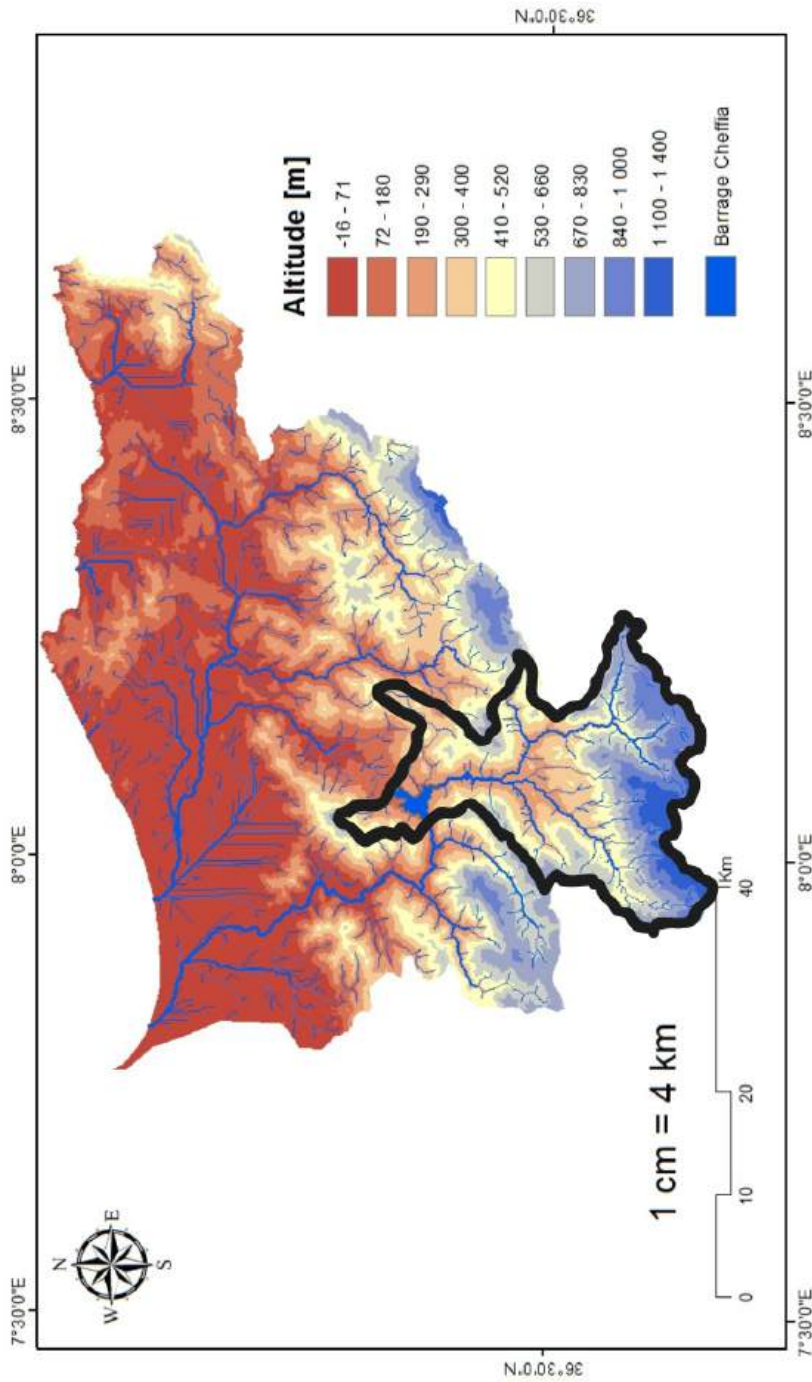


FIGURE 2.3 – La carte des altitudes du bassin versant des CCE et de Bounamoussa.

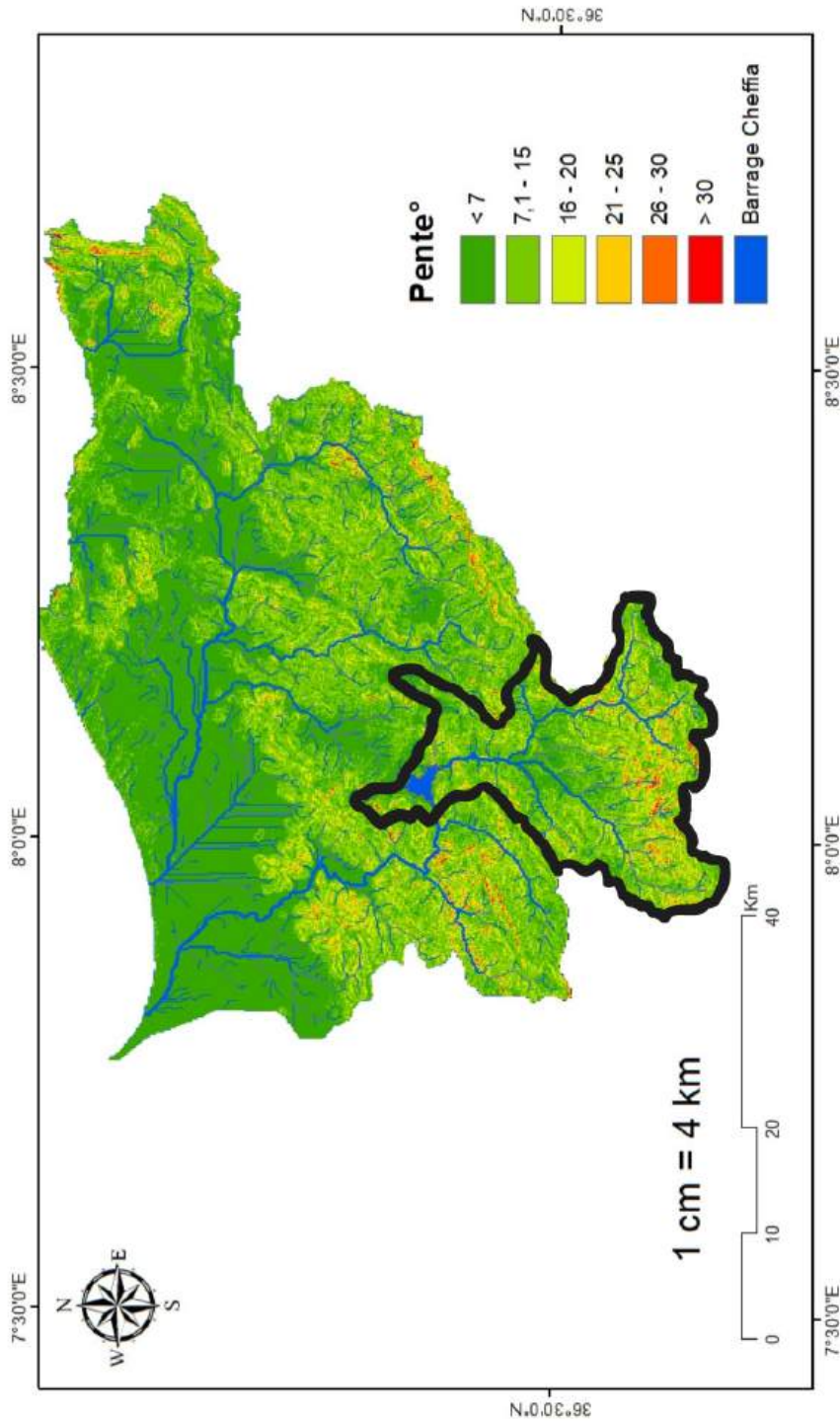


FIGURE 2.4 – La carte des pentes du BV des CCE et de Bounamoussa

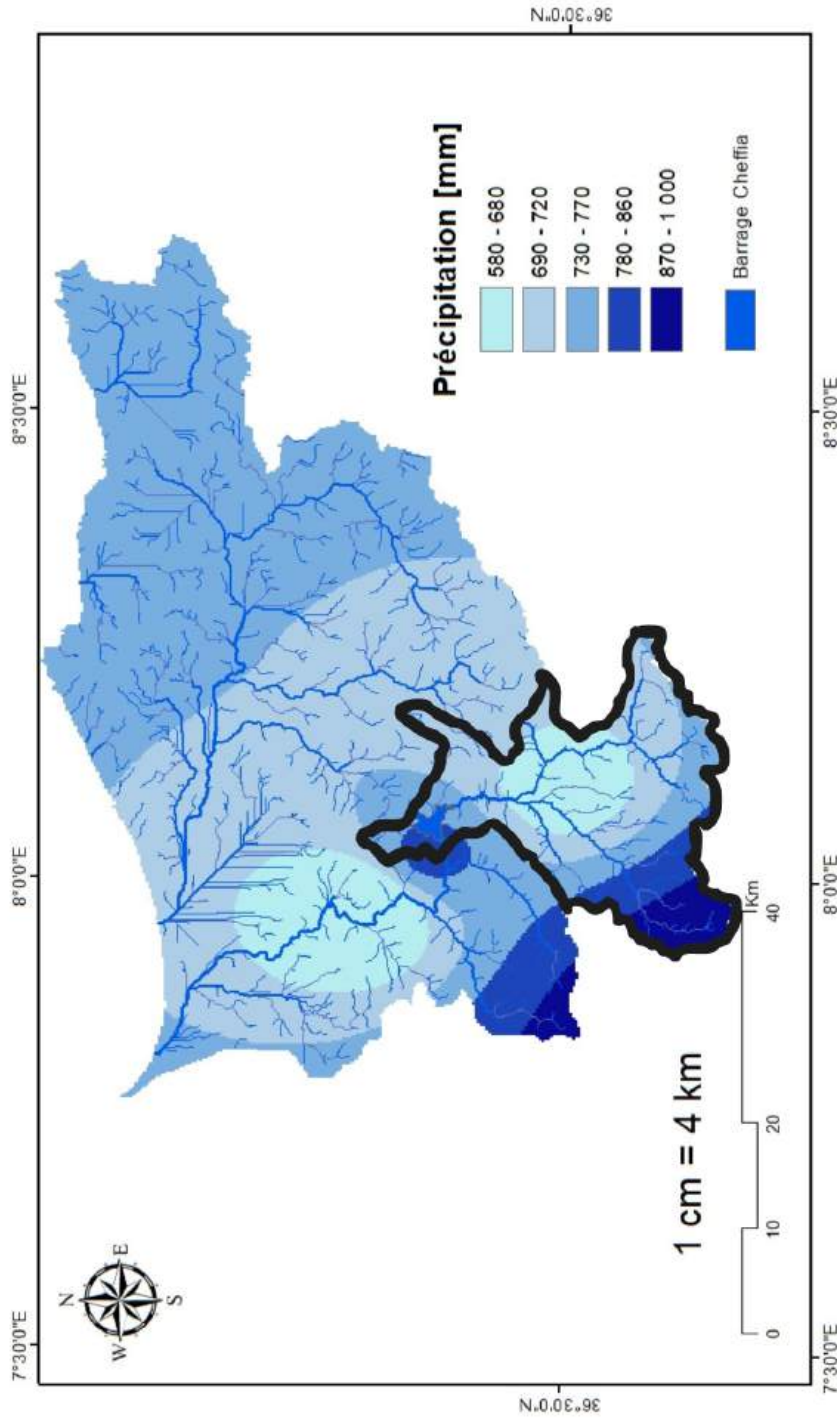


FIGURE 2.5 – Les précipitations moyennes mensuelles du BV des CCE et de Bounamoussa, de 1981 à 2024

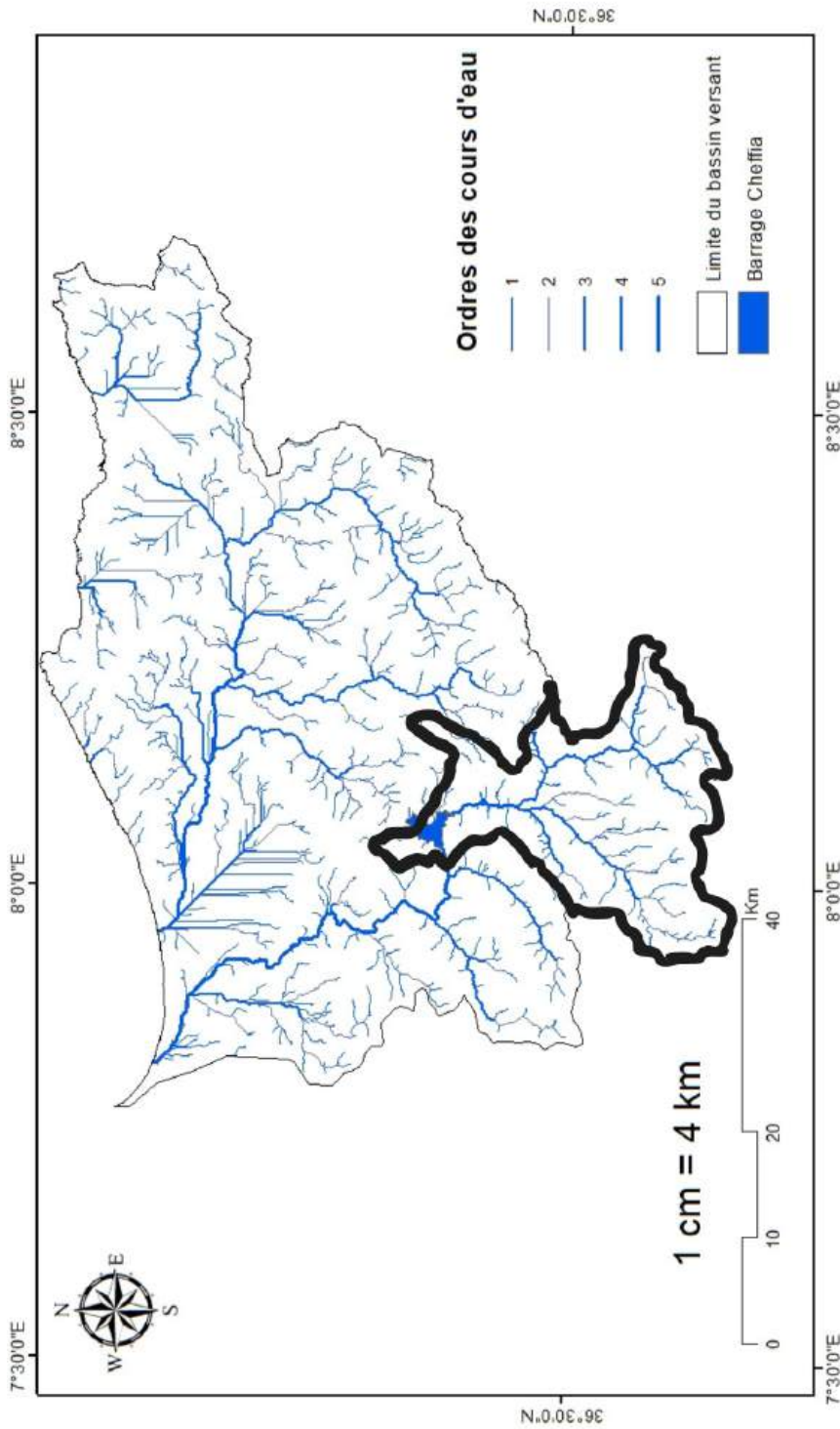


FIGURE 2.6 – La carte hydrographique du bassin versant des CCE et de Bounamoussa

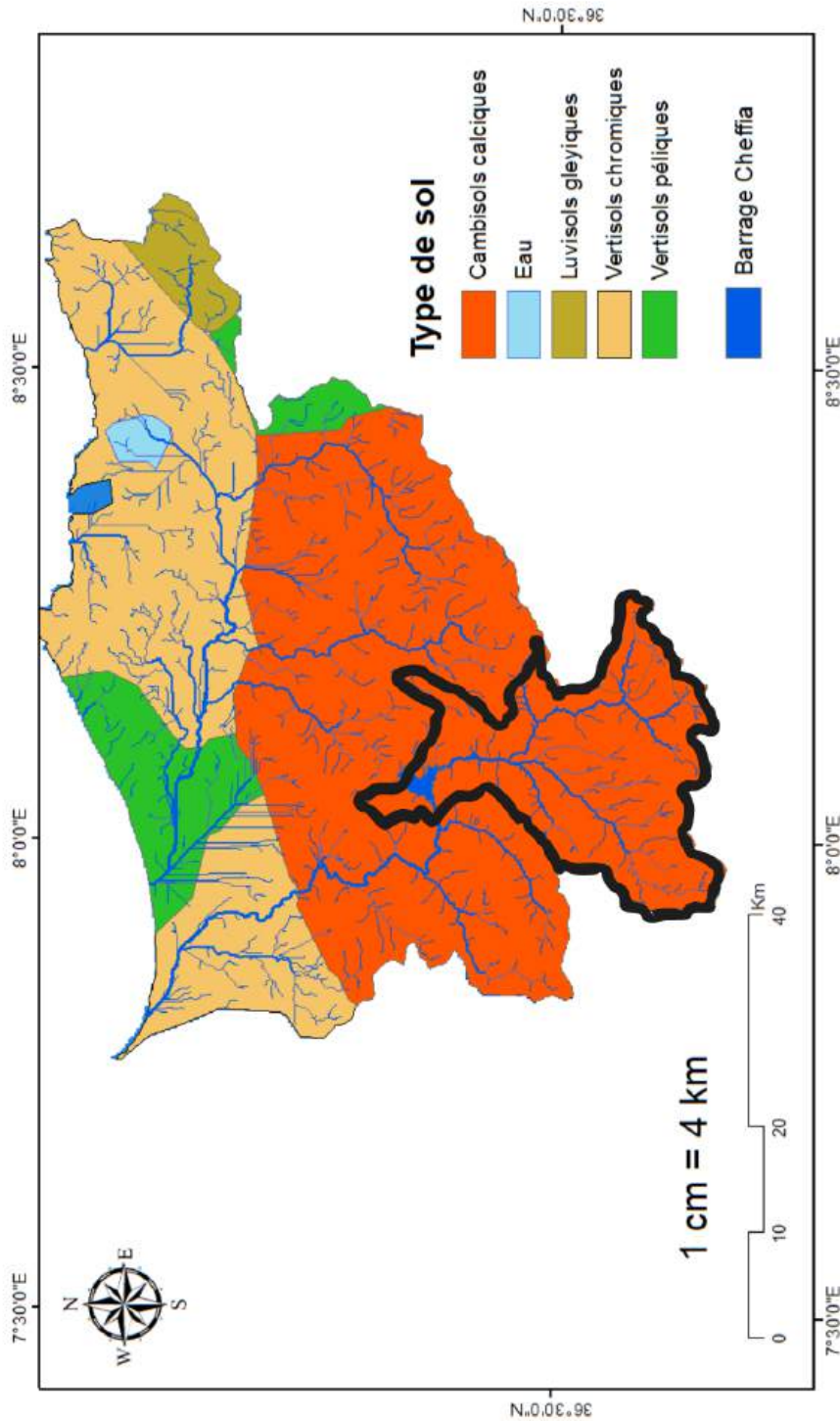


FIGURE 2.7 – La carte pédologique du bassin versant des CCE et de Bouamoussa

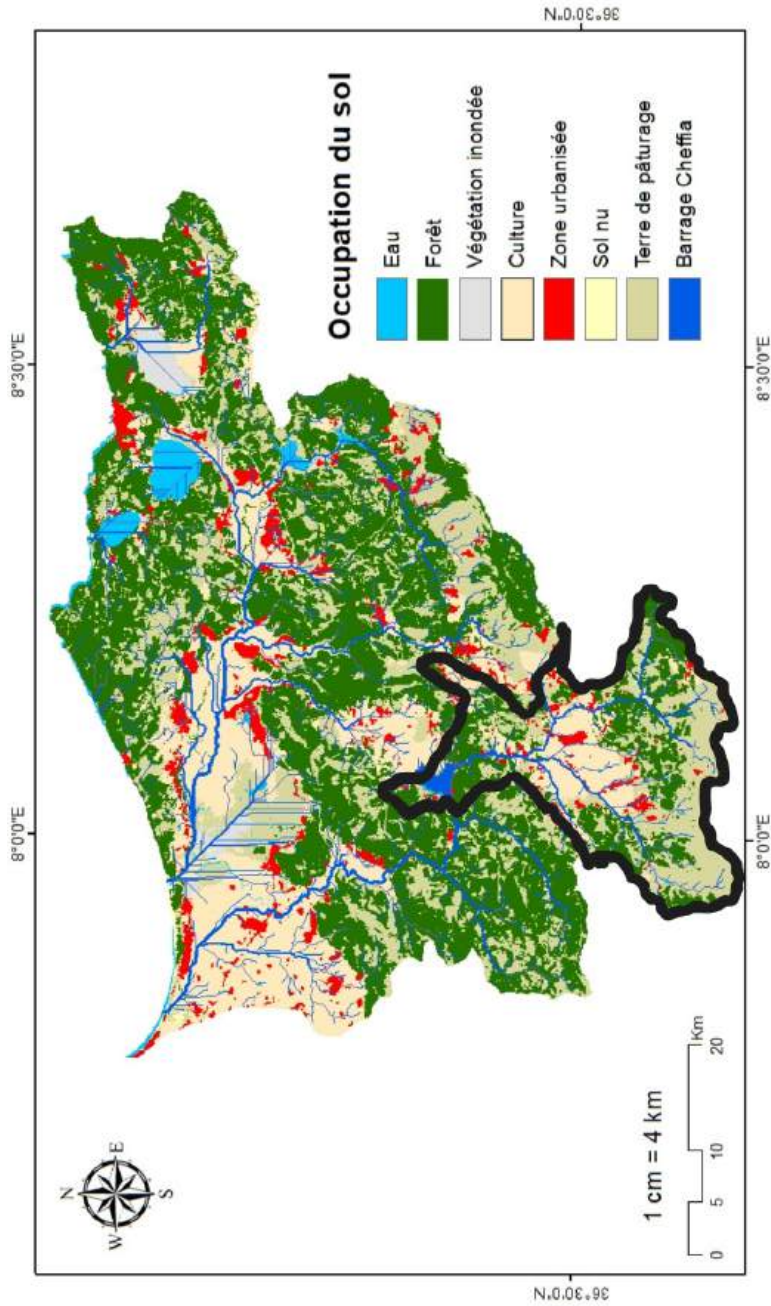


FIGURE 2.8 – L'occupation du sol du bassin versant des CCE et de Boumamoussa.

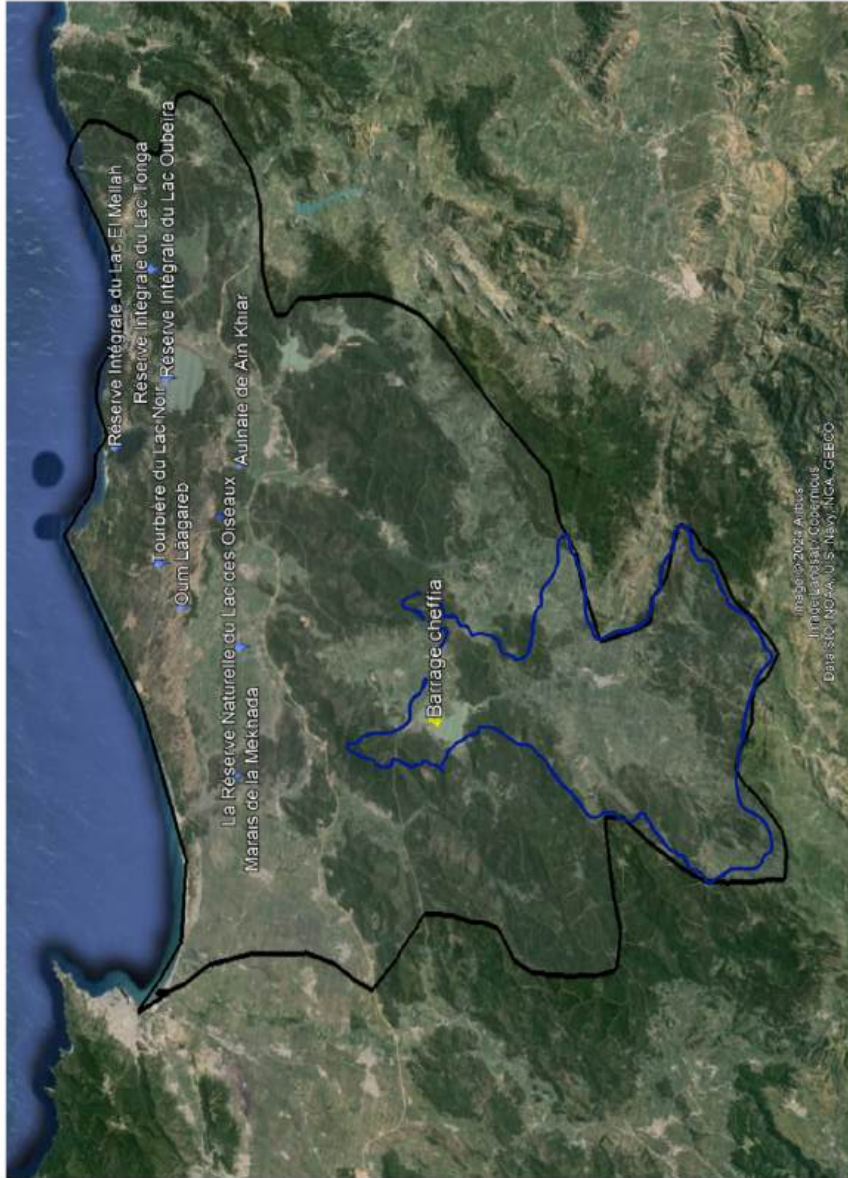


FIGURE 2.9 – Les zones humides présentes dans Le bassin versant des CCE et de Bounamoussa d'après la liste Ramsar 1.3.

2.5 Conclusion

En conclusion, la topographie (pente, altitude, etc.), l'hydrologie (précipitations, réseau hydrographique), le type de sol ainsi que l'occupation du sol sont des paramètres qui influencent la pollution d'un bassin versant. Cette pollution peut endommager les cours d'eau et entraîner le transport des polluants vers les barrages. Par conséquent, la présence des zones humides dans ce bassin contribue à la réduction de la pollution. Ce phénomène constitue l'objet de notre étude sur l'impact du bassin versant de Bounamoussa sur la qualité de l'eau.

Chapitre 3

Pollution des eaux et des sols

3.1 Introduction

La pollution représente une altération défavorable de l'environnement naturel, affectant l'eau, les sols et les écosystèmes par les rejets domestiques, industriels et agricoles. Dans ce chapitre, nous aborderons la pollution des eaux et des sols, ainsi que ses sources et ses conséquences.

3.2 Généralités sur la pollution

La pollution constitue une modification défavorable de l'environnement naturel, apparaissant en totalité ou en partie, à travers des effets directs ou indirects qui altèrent les critères de répartition des flux d'énergie, les niveaux de radiation, la constitution physicochimique du milieu naturel, ainsi que l'abondance des espèces vivantes (BENGRINE, 2019).

La pollution peut affecter divers éléments de l'environnement, notamment les eaux et les sols. Elle peut résulter de rejets industriels, domestiques ou agricoles.

3.2.1 Source de la pollution

3.2.1.1 Pollution domestique

La pollution domestique est la contamination des eaux par les rejets provenant des différents usages de l'eau dans les foyers. Elle est principalement due à la présence de polluants organiques issus des activités domestiques courantes.

Les rejets domestiques contiennent deux types principaux de polluants : les matières mi-

nérales (chlorures, phosphates, sulfates, etc.) qui proviennent principalement des produits d'entretien ménagers et des sels minéraux présents dans l'eau du robinet, ainsi que les matières organiques (azote, soufre, phosphore, fer, etc.) qui proviennent des résidus alimentaires, des produits d'entretien ménagers, des déjections humaines et des animaux domestiques (BELLIR, 2013), (BENGRINE, 2019).

3.2.1.2 Pollution industrielle

La pollution industrielle est la contamination de l'environnement par les rejets provenant des activités industrielles. Ces rejets peuvent être dus à un manque de contrôle ou à un accident. Cette pollution présente une grande diversité de composition en fonction des secteurs d'activité. Elle peut contenir des substances chimiques toxiques, des métaux lourds, des hydrocarbures, des agents pathogènes, des résidus alimentaires, etc. La pollution industrielle peut avoir des impacts graves sur l'environnement, par exemple en entraînant la contamination des sols et des eaux, ainsi que sur la santé humaine (BOUMALEK, 2020)). Les rejets industriels doivent subir un traitement conforme à la réglementation avant d'être rejetés dans le milieu naturel.

3.2.1.3 Pollution agricole

La pollution agricole est définie comme la contamination de l'environnement résultant des rejets liés aux activités agricoles. Elle résulte principalement de l'utilisation excessive d'engrais chimiques, de pesticides et d'herbicides¹, ainsi que des pratiques agricoles intensives qui favorisent l'érosion des sols et le ruissellement (BENGRINE, 2019).

3.2.2 Types de polluants

Les types de polluants présents dans l'environnement peuvent être classés en deux grandes catégories : les polluants organiques et les polluants inorganiques.

3.2.2.1 Polluants organiques

Les polluants organiques sont des matières organiques issues à la fois de la matière vivante telle que les végétaux et les animaux, ainsi que de l'industrie chimique principalement composée de carbone. Elle comprend une gamme variée de composés tels que les sucres, les protéines, les acides organiques tels que le lactique et l'acétique, les acides gras, ainsi que des macromolécules telles que l'amidon et la cellulose (BENGRINE, 2019).

1. Un produit chimique utilisé pour tuer les mauvaises herbes.

En outre, la matière organique peut se présenter sous forme soluble ou insoluble. La matière soluble se trouve dissoute dans l'eau, souvent sous forme de molécules simples ou de macromolécules telles que les protéines et les colloïdes, qui sont invisibles à l'œil nu. En revanche, la matière insoluble se présente sous forme particulaire, pouvant flotter ou se déposer en fonction de sa densité (BOUMALEK, 2020).

Les polluants organiques constituent une forme majeure de contamination environnementale dans les milieux naturels. Ces polluants proviennent principalement des effluents domestiques et des rejets industriels. Parmi ces substances, on trouve les phénols, les hydrocarbures, les colorants, les détergents et les pesticides, qui sont parmi les plus nombreux et les plus dangereux pour les ressources en eau. Ils sont souvent caractérisés par leur potentiel cancérigène ou mutagène, soulignant ainsi l'importance vitale de leur élimination pour préserver l'environnement aquatique (BENGRINE, 2019).

3.2.2.2 Polluants inorganiques

Les polluants inorganiques sont des substances qui ne contiennent généralement pas de carbone. Parmi eux, on trouve les métaux lourds tels que le mercure, le plomb, le cuivre, l'arsenic, le nickel, le zinc, le cobalt et le manganèse. L'ammoniac est également présent, utilisé comme engrais et dans la fabrication de produits chimiques. De plus, on compte les nitrates et les phosphates, issus des engrais azotés et phosphorés utilisés en agriculture, ainsi que le gaz carbonique (CO₂), principal gaz à effet de serre, issu de la combustion des énergies fossiles (BOUMALEK, 2020), (BENGRINE, 2019).

Ces polluants ont diverses origines, notamment des sources naturelles telles que l'érosion des sols, l'activité volcanique et le dégazage des sols. Ils proviennent aussi de sources anthropiques, comme les activités industrielles (électronique, traitements de surface, industrie chimique), la combustion de combustibles fossiles, l'agriculture intensive, les mines et les usines de traitement des minerais (BOUMALEK, 2020), (BENGRINE, 2019).

3.3 Pollution des eaux

La pollution de l'eau est une altération de sa qualité et de sa nature, rendant son utilisation dangereuse et perturbant l'écosystème aquatique. Elle peut affecter les eaux superficielles (rivières, plans d'eau) ainsi que les eaux souterraines (SOUDI et al., 2009). La pollution de l'eau peut être d'origine domestique, industrielle ou agricole. Elle se manifeste principalement dans les eaux de surface par (BOUMALEK, 2020) :

- **Diminution de la teneur en oxygène dissous** : Des quantités excessives de matières organiques, provenant de l'industrie laitière, des eaux usées domestiques, etc., consomment de l'oxygène et peuvent causer des mortalités massives de poissons.

- **Présence de produits toxiques** : Ces substances, issues principalement de l'industrie chimique, de l'agriculture, et des décharges, peuvent avoir des effets immédiats (toxicité aiguë) ou à long terme (accumulation chez les organismes).
- **Prolifération d'algues** : La présence d'engrais et de pesticides dans les milieux aquatiques favorise la croissance des algues. Bien que la présence de ces derniers soit bénéfique pour la production d'oxygène, une prolifération excessive peut provoquer l'eutrophisation, perturbant ainsi l'équilibre écologique.
- **Modification physique du milieu récepteur** : Des perturbations telles que l'augmentation de la turbidité, la modification de la salinité, et l'augmentation de la température peuvent altérer le milieu aquatique.
- **Présence de bactéries ou virus dangereux** : Des rejets de foyers domestiques, hôpitaux, élevages, et certaines industries agro-alimentaires introduisent des germes pathogènes dans l'eau, présentant un risque pour la santé.

3.3.1 Processus de transfert des polluants vers le milieu aquatique

Dans notre cas d'étude, nous allons nous intéresser à la pollution issue des activités agricoles. Les principales substances utilisées en agriculture qui polluent les milieux aquatiques sont les nutriments, comme l'azote et le phosphore, apportés sous forme d'engrais, ainsi que les produits phytosanitaires, tels que les herbicides, fongicides², insecticides³ et molluscicides⁴. Chaque substance a un comportement distinct dans l'environnement et, depuis la parcelle où elle est appliquée, elle peut être transportée de différentes manières vers les milieux aquatiques récepteurs, qu'ils soient souterrains ou de surface. Les types de transferts impliqués sont décrits ci-dessous.

- **Le transfert par ruissellement**

Le ruissellement constitue le refus à l'infiltration. Il existe diverses formes de ruissellement (BRUNO, 1999), (AUZET, 1997) :

- **Le ruissellement hortonien**, ou ruissellement par dépassement de l'infiltrabilité se produit lorsque l'intensité des apports d'eau dépasse la capacité d'infiltration du sol. Il est favorisé sur les sols nus ou peu couverts, ou ceux ayant une infiltrabilité très limitée (CORPEN, 2007).
- **Le ruissellement par saturation du sol** se produit lorsque l'eau de pluie, atteignant une zone saturée, ne peut s'infiltrer (capacité de stockage du sol

2. Un produit phytosanitaire destiné à éliminer ou limiter le développement des champignons parasites sur les végétaux.

3. Des substances ou des produits chimiques utilisés pour tuer ou contrôler les insectes.

4. Des produits chimiques ou des substances biologiques utilisés pour tuer ou contrôler les mollusques, tels que les escargots, les limaces et les moules.

réduite) et s'écoule à la surface, même si l'intensité de la pluie est inférieure à la capacité d'infiltration théorique du sol (CORPEN, 2007).

- **Les ruissellements diffus** se produisent lorsque la lame d'eau se répartit de manière relativement homogène à la surface du sol, en écoulement pelliculaire ou en filets instables (CATALOGNE et al., 2016).
- **Les ruissellements concentrés** surviennent lorsque, en raison de caractéristiques topographiques locales ou micro-topographiques comme les traces de roues d'engins ou les lignes de semis, les écoulements convergent, adoptent un cheminement préférentiel, prennent de la vitesse et un caractère turbulent pouvant générer de l'érosion par incision (CATALOGNE et al., 2016).
- **Le transfert par drainage enterré**
Ce type de transfert se produit lorsque l'eau et les contaminants, infiltrés dans le sol, atteignent les drains installés sous les parcelles agricoles sensibles aux excès d'eau, tels que les sols hydromorphes. Cette eau est ensuite rapidement restituée au réseau hydrographique, soit par l'intermédiaire de fossés, soit directement au niveau des cours d'eau (CATALOGNE et al., 2016)
- **Le transfert par infiltration**
Lorsque l'eau et les contaminants s'infiltrent dans les couches supérieures du sol, ils initient un processus de transfert par infiltration. Cela implique que l'eau pénètre dans le sol et s'écoule verticalement à travers celui-ci et le sous-sol, sous l'effet de la gravité et de la pression. Finalement, cette eau et les contaminants qu'elle transporte rejoignent les nappes d'eau souterraine (CORPEN, 2007).

3.3.2 Conséquences de la pollution des eaux de surfaces

La pollution des eaux de surface, causée par le transfert de substances agricoles tels que les pesticides et les engrais, entraîne des conséquences dévastatrices pour la faune, la flore, les animaux et la santé humaine qu'on peut citer :

- **L'eutrophisation** qui est un phénomène lent d'asphyxie des écosystèmes aquatiques résultant de la prolifération de plantes aquatiques dues aux engrais et aux pesticides, qui consomment l'oxygène indispensable à la survie de l'écosystème. Il résulte d'un excès d'apports en substances nutritives et survient principalement dans des milieux aquatiques où l'eau stagne ou s'écoule lentement.
- **L'anaérobiose** se produit lorsque la teneur en oxygène dissous devient trop faible, créant ainsi un environnement anaérobie. Cela peut entraîner la mort des organismes aérobies, favoriser la prolifération d'espèces anaérobies, ainsi que le dégagement de gaz nocifs tels que le méthane et le sulfure d'hydrogène, qui peuvent être dangereux pour la santé humaine et l'environnement.

- **L’empoisonnement ou la mort des animaux** , tels que le bétail, peut résulter de l’utilisation directe des eaux polluées.
- **Les effets néfastes sur la santé humaine** résultant de l’utilisation directe d’eaux de surface polluées pour l’irrigation des cultures.
- **L’odeur nuisible** des eaux polluées peuvent en effet affecter la santé humaine, notamment par inhalation.

3.4 Pollution des sols

Le sol est un écosystème essentiel en raison de sa production de nourriture, ainsi que de son rôle dans la purification de l’eau. Cependant, il est également un milieu complexe qui peut à la fois transférer la pollution et être pollué par diverses sources, notamment les activités domestiques, industrielles et agricoles.

Il est constitué de trois fractions principales, dont les proportions, la structure et l’organisation varient d’un sol à un autre (GOURDON, 1997) :

- **Fraction solide** : Cette fraction est composée de composés minéraux tels que les sables, les limons, les argiles, les oxydes et les hydroxydes métalliques. Elle comprend également une fraction organique qui regroupe les organismes vivants, les débris végétaux et les animaux, ainsi que l’humus. Cette fraction solide peut agir comme un vecteur de rétention et de transfert de la pollution, car les fractions minérales et organiques permettent de maîtriser le transport et la rétention des polluants dans le sol (MIRSAL, 2008).
- **Fraction liquide** : Cette fraction est constituée par l’eau contenue dans le sol. Cette eau peut dissoudre les substances solubles présentes dans le sol, telles que les produits chimiques provenant des pesticides, des engrais ou d’autres sources de pollution. Ainsi, la fraction liquide du sol peut être à l’origine de la pollution en dissolvant et en transportant ces substances chimiques vers d’autres zones, notamment les nappes phréatiques ou les cours d’eau (MIRSAL, 2008).

3.4.1 Contamination des Sols

La contamination des sols peut se produire par deux principaux mécanismes : le lavage par les eaux de pluie et la volatilisation.

Lavage par les eaux de pluie La pluie joue un rôle important dans la propagation des contaminants présents dans le sol. En ruisselant, l’eau peut transporter ces polluants vers les couches plus profondes du sol, les eaux souterraines, et même les eaux de surface. Cette dispersion peut entraîner la pollution des sources d’eau potable et affecter les écosystèmes

aquatiques, posant des risques importants pour la santé publique et l'environnement.

Volatilisation Certains contaminants dans le sol peuvent s'évaporer et se transformer en gaz, se diffusant ainsi dans l'air. Ce processus de volatilisation expose les humains à des risques par inhalation, car les polluants présents dans l'air peuvent être respirés, entraînant des problèmes respiratoires et d'autres effets toxiques.

Les polluants du sol peuvent affecter les humains par trois voies principales : inhalation, ingestion et contact dermique.

Inhalation La volatilisation des contaminants permet leur entrée dans l'air, où ils peuvent être inhalés par les humains. Cette exposition peut causer des problèmes respiratoires et divers effets toxiques dus à l'inhalation de ces polluants.

Ingestion

- **Chaîne alimentaire** : Les polluants du sol peuvent être absorbés par les plantes, qui sont ensuite consommées par les animaux et les humains. Cela constitue une voie indirecte par laquelle les contaminants peuvent entrer dans le corps, intégrant ainsi les polluants dans la chaîne alimentaire.
- **Directe** : L'ingestion directe de sol contaminé, par exemple par les enfants jouant dans la terre ou par la consommation de poussières contaminées, représente une autre voie d'exposition.

Contact dermique

Le contact direct avec le sol contaminé permet aux polluants d'être absorbés par la peau. Cette absorption peut provoquer des irritations cutanées ou des réactions toxiques.

3.4.2 Impacts de la contamination du sol

La contamination des sols présente des risques à moyen terme pour la santé humaine et à long terme pour l'environnement.

Santé Humaine Les effets sur la santé humaine peuvent être aigus ou chroniques, en fonction du type de polluant, de la concentration et de la durée d'exposition. Les risques incluent des cancers, des maladies respiratoires, des troubles digestifs, des problèmes de reproduction et de développement, et des atteintes au système nerveux.

Environnement La pollution des sols peut avoir diverses conséquences environnementales néfastes. Elle contribue notamment à la dégradation de la qualité de l'eau, à la perte de biodiversité, à la diminution de la fertilité des sols, et à la perturbation des écosystèmes. Ces conséquences affectent négativement les cultures, la pêche, ainsi que la faune et la flore.

La figure 3.1 présente un schéma simplifié des risques associés à la pollution des sols (ARRAR, 2024).

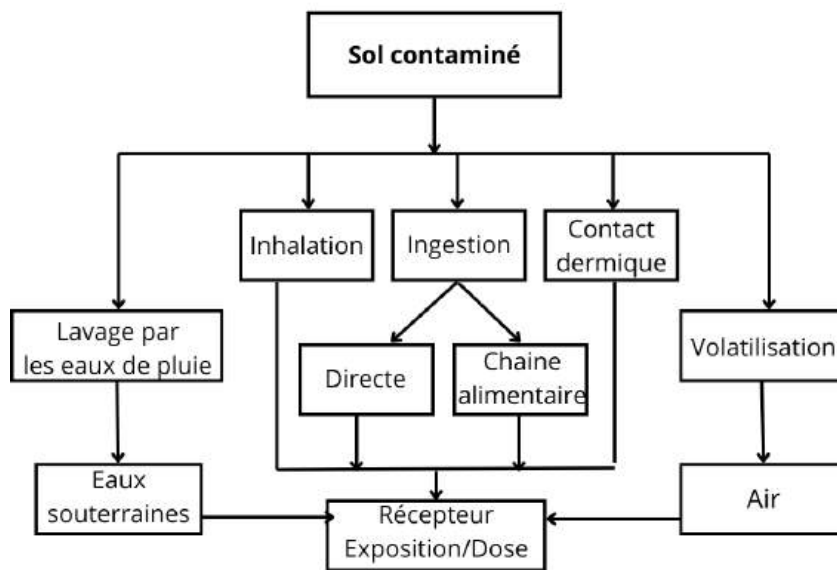


FIGURE 3.1 – Un schéma simplifié des risques associés à la pollution des sols.

3.5 Qualité de l'eau

Pour évaluer la pollution de l'eau et identifier ses sources potentielles, un indice de qualité de l'eau peut être calculé. Ce type d'indice synthétise plusieurs paramètres physico-chimiques et biologiques pour fournir une mesure globale de la qualité de l'eau dans une région donnée. De plus, cet indice permet de comparer la qualité de l'eau d'un site à un autre et de suivre son évolution dans le temps.

3.6 Conclusion

La pollution des eaux et des sols représente une menace pour l'environnement et la santé humaine en perturbant les écosystèmes aquatiques, en contaminant les ressources alimentaires et en compromettant la qualité de l'eau potable.

Pour évaluer cette pollution, il est recommandé de faire des prélèvements des échantillons à la fois au niveau du sol et des cours d'eau pour les analyses. De plus, il est possible de calculer un indice de qualité de l'eau afin d'évaluer de manière globale la qualité de l'eau.

Chapitre 4

Méthodes d'évaluation de la qualité de l'eau du barrage Cheffia

4.1 Introduction

L'évaluation de la qualité des eaux du barrage Cheffia est basée sur des données récupérées de l'ANBT. Ces données ont été collectées mensuellement sur une période de cinq ans. Dans ce chapitre, nous allons présenter les méthodes utilisés pour l'évaluation de la qualité des eaux du barrage Cheffia.

4.2 Méthodes

Dans notre étude, nous avons sélectionné deux indices de qualité pour évaluer la qualité de l'eau du barrage de la Cheffia, dans le but de comparer leur précision. De plus, nous avons prédit l'évolution de chaque paramètre sur une période de 7 ans.

4.2.1 Indice de qualité de l'eau (Bascaron.1979)

L'indice de qualité de l'eau (IQE) est une valeur numérique qui permet d'évaluer la qualité globale de l'eau en se basant sur un ensemble étendu de données. Selon (MOSCUZZA et al., 2007) l'indice de qualité de l'eau (IQE) a été développé sur la base de la proposition de Rodríguez de Bascaron.

Pour l'application de cet indice dans notre étude, huit paramètres ont été sélectionnés : pH (potentiel hydrogène), O_{2d} (oxygène dissous), NO₃⁻ (nitrate), NO₂⁻ (nitrite), NH₄⁺ (ammonium), PO₄³⁻ (phosphate), DBO₅ (demande biochimique en oxygène sur cinq jours), DCO (demande chimique en oxygène)

L'indice de qualité se calcule comme suit :

$$IQE = k \times \frac{\sum_{i=1}^n C_i \times P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}$$

- C_i : la valeur attribuée (en %) à chaque paramètre après la normalisation (Tableau 4.1).
- W_i : le poids attribué à chaque paramètre (Tableau 4.1). Le poids relatif du paramètre varie de 1 à 4, où 4 représente l'importance majeure pour la conservation de la vie aquatique et 1 l'importance relative mineure pour la vie aquatique.

La variable k représente l'évaluation subjective de la détérioration de l'eau évaluée par une personne non spécialisée dans les problèmes environnementaux k. C'est une constante qui peut prendre les valeurs suivantes en relation avec l'état de l'eau :

- $k = 1$: eau sans pollution apparente, claire ou avec une présence naturelle de matières en suspension ;
- $k = 0,75$: eau légèrement contaminée, avec une couleur claire, de la mousse, une turbidité légèrement non naturelle ;
- $k = 0,50$: eau avec l'apparence d'être contaminée et une forte odeur ;
- $k = 0,25$: eau noire qui présente une fermentation et une odeur.

Dans notre cas d'étude, nous avons pris $k=0,75$. Pour justifier cette valeur, nous avons calculé le pourcentage global de conformité de tous les paramètres.

$$\text{Pourcentage de conformité} = \frac{\text{Nombre total} - \text{valeurs non conformes}}{\text{Nombre total}} \quad (4.1)$$

Nous avons trouvé que le pourcentage de conformité est de 0,73, ce qui signifie que 73 % de l'eau est conforme aux normes.

Le tableau 4.1 représente les valeurs de référence (c'est-à-dire les facteurs de normalisation, C_i et les poids, P_i) nécessaires pour développer l'indice de qualité de l'eau de Bascaron.

TABLE 4.1 – Les valeurs de référence nécessaires pour développer l'Indice de Qualité de l'Eau de Bascaron (KIM et al., 2020).

| Parameter | Unit | Weight (P_i) | Normalization Factor (C_j) | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|------|------------------|--------------------------------|-------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 100 | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 | 30 | 20 | 10 | 0 |
| pH | - | 1 | 7 | 7-8 | 7-8,50 | 7-9 | 6,50-7 | 6-9,50 | 5-10 | 4-11 | 3-12 | 2-13 | 1-14 |
| DO | mg/L | 4 | >7,50 | >7 | >6,50 | >6 | >5 | >4 | >3,50 | >3 | >2 | <1 | <1 |
| BOD ₅ | mg/L | 3 | <0,50 | <2 | <3 | <4 | <5 | <6 | <8 | <10 | <12 | <15 | >15 |
| COD | mg/L | 3 | <5 | <10 | <20 | <30 | <40 | <50 | <60 | <80 | <100 | <150 | >150 |
| NH ₄ ⁺ -N | mg/L | 3 | <0,01 | <0,05 | <0,10 | <0,20 | <0,30 | <0,40 | <0,50 | <0,75 | <1 | <1,25 | >1,25 |
| NO ₃ ⁻ -N | mg/L | 2 | <0,50 | <2 | <4 | <6 | <8 | <10 | <15 | <20 | <50 | <100 | >100 |
| PO ₄ ³⁻ -P | mg/L | 1 | <0,025 | <0,05 | <0,10 | <0,20 | <0,30 | <0,50 | <0,75 | <1 | <1,50 | <2 | >2 |

Cinq classes de qualité de l'eau peuvent être identifiées en fonction des valeurs de l'indice de qualité de l'eau (IQE) déterminées à partir de la méthode de Bascaron.

Le tableau 2 représente la classification de la qualité de l'eau selon l'indice de qualité de l'eau (IQE) (PESCE et al., 2000).

TABLE 4.2 – La classification de la qualité de l'eau selon l'Indice de Qualité de l'Eau déterminées à partir de la méthode de Bascaron. (PESCE et al., 2000)

| IQE | Classification |
|------------|--------------------------------|
| 91 – 100 | Excellente qualité de l'eau |
|]70 – 90] | Bonne qualité de l'eau |
|]50 – 70] | Qualité de l'eau moyenne |
|]25 – 50] | Mauvaise qualité de l'eau |
| ≥ 25 | Très mauvaise qualité de l'eau |

4.2.2 Indice de qualité de l'eau du CCME

Selon KHAN et al., 2005 l'indice de la qualité de l'eau (IQE) du CCME (Conseil canadien des ministres de l'Environnement) est une expression numérique qui permet d'évaluer la qualité globale de l'eau en se basant sur une grande quantité de données. Cet indice offre un moyen pratique de résumer ces données et de faciliter leur communication auprès du public. L'indice intègre trois éléments :

- L'étendue : le nombre de paramètres ne respectant pas les lignes directrices sur la qualité de l'eau ;
- La fréquence : le nombre de fois où ces normes ne sont pas respectées dans une période donnée ;
- L'amplitude : l'ampleur par laquelle les normes ne sont pas respectées. .

L'indice produit un nombre entre 0 (pire qualité de l'eau) et 100 (meilleure qualité de l'eau). Ces nombres sont divisés en cinq catégories descriptives pour simplifier la présentation.

Le tableau 4.3 présente la classification de la qualité de l'eau selon l'Indice de Qualité de l'Eau du CCME.

TABLE 4.3 – La classification de la qualité de l'eau selon l'indice de qualité de l'eau déterminées à partir de la méthode du CCME (KHAN et al., 2005).

| IQE | Classification | Descriptions |
|------------|-----------------------------|--|
| 95-100 | Excellente qualité de l'eau | La qualité de l'eau est préservée. Les conditions sont très proches des niveaux naturels ou souhaitables. Ces valeurs d'indice ne peuvent être obtenues que si toutes les mesures sont conformes aux recommandations à peu près en tout temps. |
| 80-94 | Bonne qualité de l'eau | La qualité de l'eau est préservée, seule une menace ou une détérioration mineure est observée; les conditions s'écartent rarement des niveaux naturels ou souhaitables. |
| 65-79 | Qualité de l'eau moyenne | La qualité de l'eau est ordinairement préservée, mais elle est occasionnellement menacée ou détériorée; les conditions s'écartent parfois des niveaux naturels ou souhaitables. |
| 45-64 | Qualité de l'eau médiocre | La qualité de l'eau est fréquemment menacée ou détériorée; les conditions s'écartent souvent des niveaux naturels ou souhaitables. |
| 0-44 | Mauvaise qualité de l'eau | La qualité de l'eau est presque toujours menacée ou détériorée; les conditions s'écartent généralement des niveaux naturels ou souhaitables. |

Pour l'application de cet indice dans notre étude, les mêmes paramètres que pour l'indice de Bascaron ont été sélectionnés. La formulation de l'IQE telle que décrite dans le rapport technique de l'indice de qualité de l'eau du Canada 1.0 CCME, 2001 est la suivante : Le calcul de l'étendue est F1. Ce terme représente le pourcentage de paramètres dont au moins un paramètre ne respecte pas la recommandation correspondante pendant la période d'étude.

$$F1 = \frac{\text{Nombre de paramètres non conformes}}{\text{Nombre total de paramètres}} \times 100 \quad (4.2)$$

Le calcul de la fréquence est F2. Cela représente le pourcentage de résultats analytiques non conformes aux normes.

$$F2 = \frac{\text{Nombre de résultats non conformes}}{\text{Nombre total de résultats}} \times 100 \quad (4.3)$$

Le calcul de l'amplitude est F3 et elle représente l'écart entre les résultats analytiques non conformes et les recommandations correspondantes. Le terme F3 est une fonction asymptotique qui ramène la somme normalisée des coefficients d'écart (sncé) par rapport aux recommandations à l'intérieur d'une plage de valeurs de 0 à 100.

$$F3 = \frac{sncé}{0.01 \times sncé + 0.01} \quad (4.4)$$

Pour calculer le degré global de non-conformité, on additionne les coefficients d'écart des résultats analytiques non conformes et on divise cette somme par le nombre total de résultats analytiques. Cette variable s'appelle la somme normalisée des coefficients d'écart (sncé).

$$sncé = \frac{\sum_{i=1}^n \text{coefficient d'écart}}{\text{Nombre total des résultats}} \quad (4.5)$$

Pour déterminer le coefficient d'écart, nous avons trois possibilités :

1. Si le résultat ne doit pas dépasser la recommandation :

$$\text{Coefficient d'écart}_i = \frac{\text{résultat non conforme}_i}{\text{recommandation}_i} - 1 \quad (4.6)$$

2. Si le résultat ne doit pas être inférieur à la recommandation :

$$\text{Coefficient d'écart}_i = \frac{\text{Recommandation}_i}{\text{résultat non conforme}_i} - 1 \quad (4.7)$$

3. Si la recommandation est nulle (égale à zéro) :

$$\text{Coefficient d'écart}_i = \text{résultat non conforme}_i \quad (4.8)$$

L'IQE est ensuite calculé comme suit :

$$\text{IQE} = \frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732} \quad (4.9)$$

La méthode du CCME, contrairement à la méthode de Bascaron, ne donne aucune indication sur le calcul de ces poids. Notre objectif est de comparer les deux méthodes en analysant les poids qu'elles attribuent. Pour ce faire, nous utiliserons la régression linéaire afin de déterminer les poids en nous basant sur l'indice de qualité de l'eau obtenu par la méthode du CCME.

4.2.3 Calcul des poids de la méthode CCME

La régression linéaire est une méthode statistique utilisée pour modéliser la relation entre une variable dépendante Y et une ou plusieurs variables indépendantes X . Elle permet de prédire la valeur de la variable dépendante en fonction des valeurs des variables indépendantes. La régression linéaire multiple repose sur le même principe que la régression linéaire simple mis à part qu'elle utilise plus d'une variable explicative (dite indépendante) pour déterminer un résultat (la variable dite expliquée).

Dans notre cas, nous avons utilisé la régression linéaire multiple pour calculer le poids de chaque paramètre dans la méthode de CCME, afin de déterminer leur influence mathématique sur l'indice de qualité. Ainsi, nous pouvons identifier les paramètres sur lesquels l'indice de qualité se focalise le plus dans son calcul.

Le modèle de régression linéaire est le suivant :

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n + \varepsilon \quad (4.10)$$

Le vecteur des poids estimés est calculé par la méthode des moindres carrés :

$$\hat{a} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (4.11)$$

Le calcul de la variable dépendante estimée :

$$\hat{Y} = X\hat{a} \quad (4.12)$$

Le calcul de l'erreur :

$$\varepsilon = Y - \hat{Y} \quad (4.13)$$

Avec :

- Y : variable dépendante.
- $X_1, X_2 \dots X_n$: variables indépendantes.
- a_0 : la constante d'interception.
- a_1, a_2, \dots, a_n : les coefficients de régression.

- \hat{Y} : variable dépendante estimée.
- ε : l'erreur.

Dans notre cas :

$$IQE = \text{paramètre} \times \text{poids estimé}$$

Avec

- Y : IQE
- $X_1, X_2 \dots X_n$: paramètres physico-chimiques
- \hat{a} : le poids estimé
- \hat{Y} : IQE estimé

Pour calculer le pourcentage de chaque poids :

$$\hat{a}(\%) = \frac{\hat{a}_i}{\sum_{i=1}^n \hat{a}_i} \times 100 \quad (4.14)$$

4.2.4 Prédiction des tendances futures des paramètres

Dans la prochaine partie, nous allons introduire une méthode mathématique différente pour prédire les paramètres physico-chimiques de notre étude pour l'avenir. Cette partie est indépendante de ce que nous avons fait précédemment. La prédiction des paramètres physico-chimiques est d'une importance capitale pour plusieurs raisons. Elle nous permet non seulement d'anticiper les changements environnementaux futurs mais aussi de planifier des interventions adéquates et de garantir une gestion durable des ressources naturelles. Par exemple, en connaissant les tendances futures des niveaux de pollution, des concentrations en nutriments ou d'autres indicateurs environnementaux, nous pouvons mettre en place des stratégies de gestion proactive pour prévenir des dégradations environnementales significatives.

Pour garantir la fiabilité de ces prédictions, il est important de choisir les méthodes statistiques appropriées. Une mauvaise sélection de la méthode peut entraîner des prévisions inexactes, compromettant ainsi les décisions basées sur ces données. C'est pourquoi nous avons opté pour l'utilisation de l'analyse chronologique combinée à la régression linéaire.

4.2.4.1 Analyse chronologique

L'analyse chronologique est un domaine de la statistique qui se concentre sur l'étude des données organisées chronologiquement. Son objectif est d'identifier les tendances, les modèles et les relations présentes dans ces données afin de permettre des prédictions et de prendre des décisions informées pour l'avenir.

Nous avons utilisé l'analyse chronologique pour prédire l'évolution de chaque paramètre de l'année 2023 jusqu'à 2030.

Le modèle est le suivant :

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n + \varepsilon \quad (4.15)$$

Le calcul du coefficient de pente de la droite de régression est estimé comme suit :

$$\hat{a} = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\text{var}(X)} \quad (4.16)$$

Le calcul de la constante d'interception a_0 :

$$a_0 = \bar{Y} - \hat{a} \times \bar{X}_n \quad (4.17)$$

Le calcul de la variable dépendante estimée \hat{Y} :

$$\hat{Y} = X \times \hat{a} \quad (4.18)$$

Le calcul de l'erreur ε :

$$\varepsilon = Y - \hat{Y} \quad (4.19)$$

Le calcul de la variable dépendante prédite Y^* :

$$Y^* = (X \times \hat{a} + a_0) \cdot C_s \quad (4.20)$$

Le calcul du coefficient saisonnier C_s :

$$C_s = \left(\frac{\text{Moyenne mensuelle de } \left(\frac{y_i}{y_i^*} \right)}{\text{Moyenne annuelle}} \right) \quad \forall i \in \{1, \dots, n\} \quad (4.21)$$

Avec :

- Y : variable dépendante.
- $X_1, X_2 \dots X_n$: variables indépendantes.
- \bar{Y} variable dépendante moyenne.
- \bar{X} variable indépendante moyenne.
- a_0 : la constante d'interception.
- a_1, a_2, \dots, a_n : les coefficients de régression.

- \hat{Y} : variable dépendante estimée.
- Y^* : variable dépendante prédite.
- ε : l'erreur.

Dans notre cas :

- Y : paramètre physico-chimique.
- X_1, X_2, \dots, X_n : mois.
- \hat{a} : coefficient de pente estimé.
- \hat{Y} : paramètre physico-chimique estimé.
- Y^* : paramètre physico-chimique prédit.

4.3 Conclusion

Dans cette étude, nous avons utilisé deux indices de qualité de l'eau et proposé une méthode de régression linéaire pour calculer les poids de chaque paramètre dans l'indice du CCME. Nous avons également proposé une analyse chronologique afin de prédire l'évolution future de la qualité de l'eau du barrage Cheffia. Notre objectif principal est de déterminer si la zone d'étude constitue actuellement une zone tampon ou si des aménagements sont nécessaires.

Chapitre 5

Résultats et discussion

5.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous évaluerons la qualité de l'eau du barrage de Cheffia en calculant deux indices de qualité : l'indice de Bascaron et l'indice CCME. Nous comparerons ensuite les résultats obtenus à partir de ces deux indices et analyserons l'évolution chronologique de chaque paramètre.

5.2 Evolution des paramètres

Pour exprimer l'évolution des paramètres en fonction du temps, nous avons tracé des graphiques illustrant cette évolution pour chaque paramètre. Ces graphiques permettent de visualiser non seulement les variations temporelles de chaque paramètre, mais aussi de les comparer aux normes établies pour les eaux de surface. Par ailleurs, nous avons également élaboré un tableau récapitulatif qui présente la variance et la moyenne de chaque paramètre sur la période 2018-2022.

Le tableau [5.1](#) présente les normes de l'OMS.

TABLE 5.1 – Les normes de l’OMS

| Paramètre | Norme min | Norme max |
|-------------------------|-----------|-----------|
| pH | 6,5 | 8,5 |
| O ₂ d (mg/L) | 5 | 7 |
| NO ₃ (mg/L) | | 44 |
| NO ₂ (mg/L) | | 0,1 |
| NH ₄ (mg/L) | 0,1 | 0,5 |
| PO ₄ (mg/L) | | 0,5 |
| DBO ₅ (mg/L) | 3 | 5 |
| DCO (mg/L) | 20 | 25 |

• pH

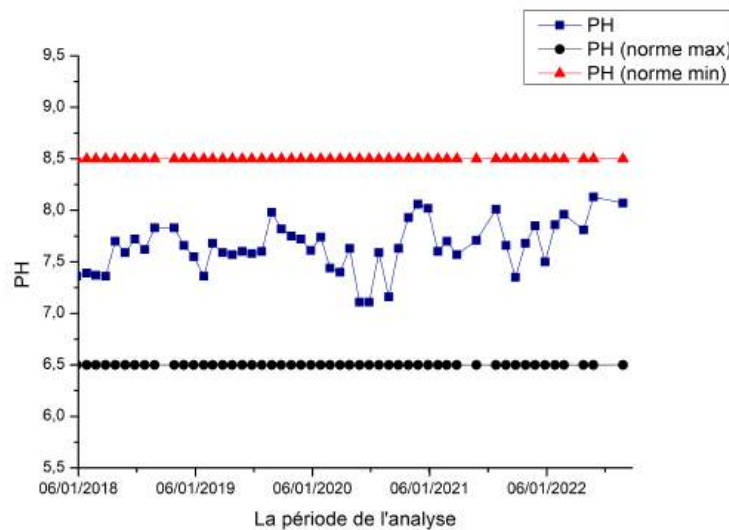


FIGURE 5.1 – L’évolution du pH pendant la période 2018-2022.

Ce graphique illustre que les valeurs de pH observées entre 2018 et 2022 sont conformes aux normes.

- L'oxygène dissous

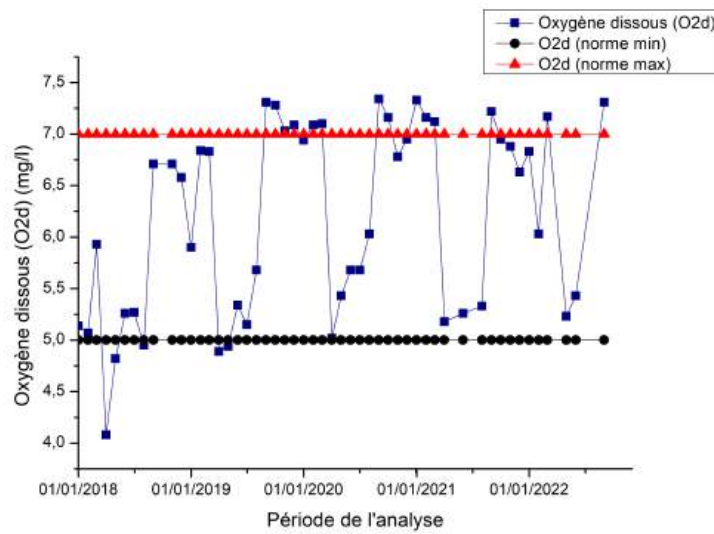


FIGURE 5.2 – L'évolution de l'oxygène dissous pendant la période 2018-2022.

L'oxygène dissous représente la quantité d'oxygène gazeux (O₂) présente dans l'eau, accessible aux organismes vivants, (figure 5.2). On observe que les concentrations d'oxygène dissous ont dépassé les normes de septembre à décembre 2019, en février et mars 2020, de janvier à mars 2021, en mars 2022, et en septembre 2022.

- Les nitrates NO₃

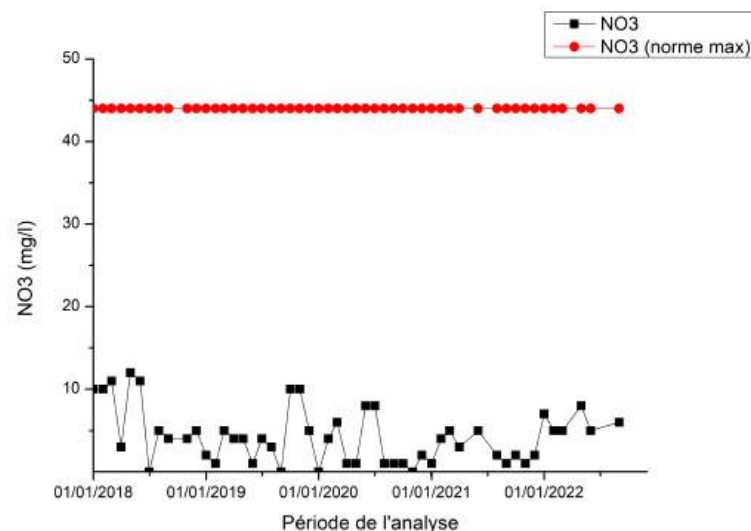


FIGURE 5.3 – L'évolution des nitrates pendant la période 2018-2022.

Les nitrates sont des composés chimiques naturellement présents dans l'environnement, mais une concentration excessive peut entraîner une pollution significative de l'eau.

Cette pollution par les nitrates est souvent due à l'utilisation d'engrais azotés, de lisier et de fumiers en agriculture.

La figure 5.3 indique que les concentrations des nitrates sont conformes aux normes établies pendant toute la période de l'analyse.

- Les nitrites NO₂

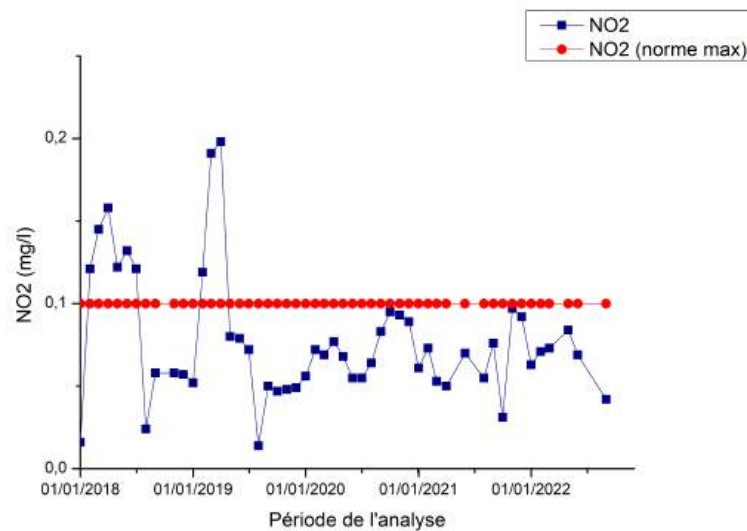


FIGURE 5.4 – L'évolution des nitrites pendant la période 2018-2022.

Les nitrites (NO₂⁻) sont des composés chimiques inorganiques présents naturellement dans l'environnement. Ils résultent de la dénitrification des nitrates, un processus biologique du cycle de l'azote qui implique la conversion des nitrates (NO₃⁻) en azote gazeux (N₂), en passant par des intermédiaires tels que les nitrites (NO₂⁻). Ce processus est réalisé par des bactéries dans des conditions anaérobies. Bien que les nitrites soient naturellement présents dans l'environnement, leur concentration excessive contribue à la détérioration de la qualité de l'eau.

La figure 5.4 montre que les concentrations des nitrites ont dépassé les normes de février à juillet 2018, et de février à avril 2019.

- L'ammonium NH₄

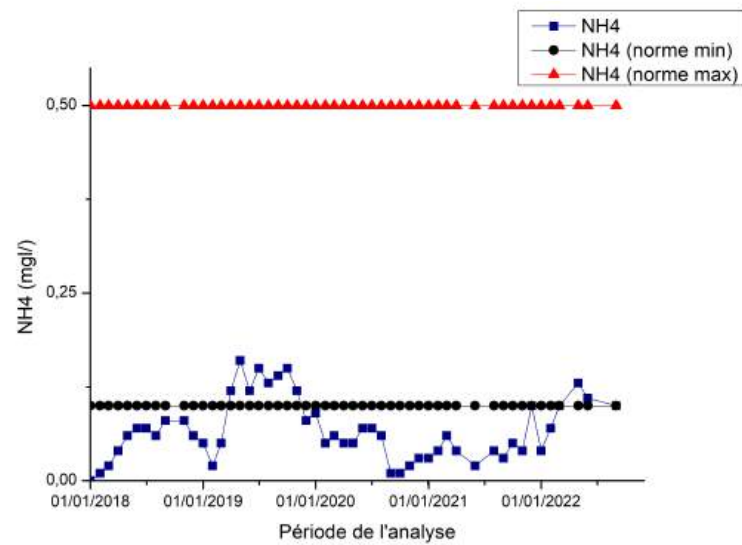


FIGURE 5.5 – L'évolution de l'ammonium pendant la période 2018-2022.

L'ammonium est un composé chimique naturellement présent dans l'environnement, résultant de la décomposition de la matière organique. Son accumulation excessive peut provenir de l'utilisation d'engrais azotés et de lisier d'élevage en agriculture, contribuant ainsi à la pollution aquatique.

La figure 5.5 montre que les concentrations d'ammonium étaient conformes aux normes durant la période d'avril 2019 à novembre 2019 ainsi qu'en mai 2022 et juin 2022. Pour les autres mois, de janvier 2018 à décembre 2022, les concentrations étaient en dessous des normes, ce qui est généralement un signe positif de la qualité de l'eau.

- Les phosphates PO4

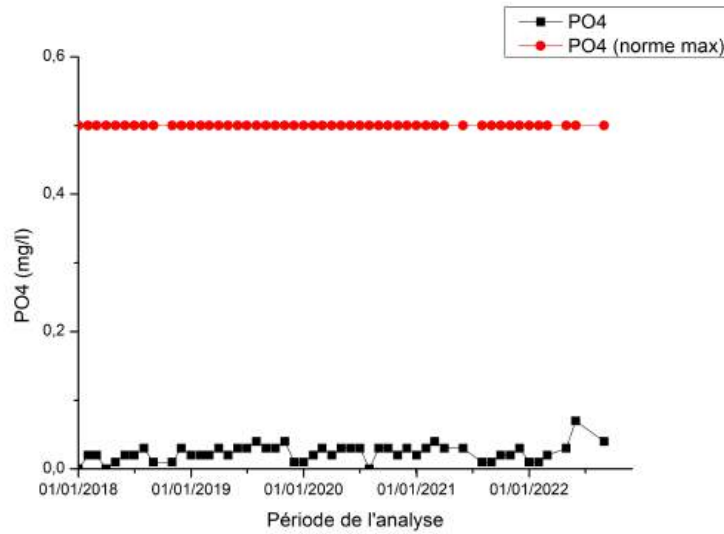


FIGURE 5.6 – L'évolution des phosphates pendant la période 2018-2022.

Les phosphates sont des composés chimiques contenant du phosphore qui sont utilisés comme engrais en agriculture et comme additifs dans les détergents. Cependant, leur utilisation excessive peut stimuler une prolifération excessive d'algues et d'autres plantes aquatiques, ce qui peut entraîner des problèmes environnementaux tels que l'eutrophisation des cours d'eau et des lacs, (voir section 3.3.2 du chapitre 3). La figure 5.6 montre que les concentrations des phosphates étaient conformes aux normes durant la période de l'analyse.

- La demande biologique en oxygène sur 5 jours (DBO5)

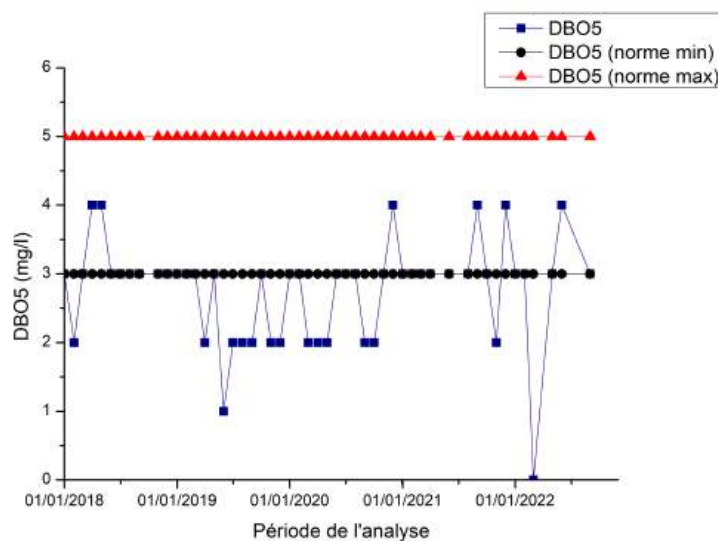


FIGURE 5.7 – L'évolution de la DBO5 pendant la période 2018-2022.

La demande biologique en oxygène sur cinq jours (DBO5) est un indicateur important de la qualité de l'eau. Elle représente la quantité d'oxygène consommée par les micro-organismes pour dégrader la matière organique biodégradable présente dans un échantillon d'eau sur une période de cinq jours à 20°C.

La figure 5.7 montre que les valeurs de DBO5 sont généralement conformes aux normes, indiquant une bonne qualité de l'eau. Les valeurs minimales par rapport aux normes indiquent une faible concentration de matière organique dans l'eau, ce qui confirme la bonne qualité de l'eau.

- **La demande chimique en oxygène DCO**

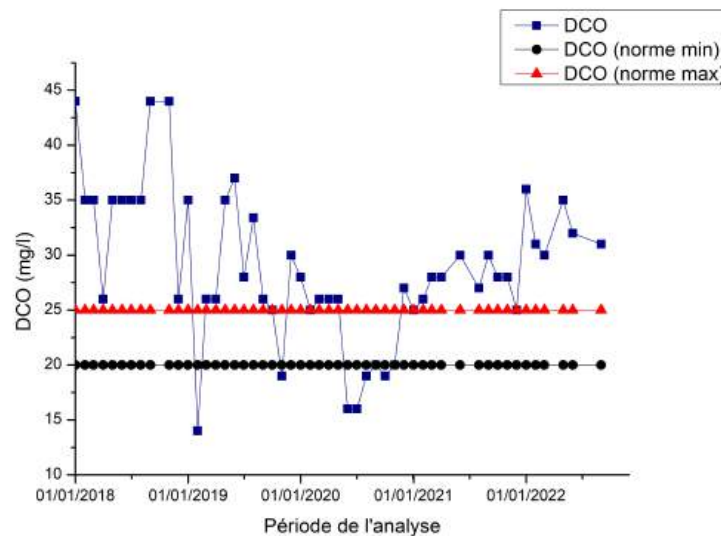


FIGURE 5.8 – L'évolution de la DCO pendant la période 2018-2022.

La demande chimique en oxygène (DCO) représente la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder chimiquement toutes les matières organiques et polluantes présentes dans un échantillon d'eau. Cet indicateur global de pollution offre une mesure complète de la pollution de l'eau, incluant à la fois les matières organiques biodégradables et non biodégradables.

La figure 5.8 montre que les concentrations de DCO dépassent les normes établies pendant une grande partie de la période d'analyse. Cela pourrait être lié aux activités agricoles, étant donné que les concentrations de nitrites dépassaient également les normes en 2018 et 2019. Cette situation pourrait favoriser la prolifération des algues, conduisant à une augmentation des concentrations de la DCO.

Les concentrations de DCO élevées indiquent la présence de matières organiques dans l'eau, qui peuvent inclure des substances biodégradables et non biodégradables.

Le fait que la DBO5 n'a jamais dépassé les normes suggère que les substances présentes sont en grande partie non biodégradables. Les activités agricoles peuvent contribuer à cette pollution, surtout si des engrais et pesticides sont utilisés, même en faible quantité.

5.3 Moyenne et variance des paramètres

Le tableau 5.2 présente la variance et la moyenne de chaque paramètre pendant la période 2018-2022.

TABLE 5.2 – La variance et la moyenne de chaque paramètre pendant la période 2018-2022.

| Paramètre | Norme max | Moyenne | Variance |
|-------------------------|-----------|---------|----------|
| pH | 8,5000 | 7,6500 | 0,0600 |
| O _{2d} (mg/l) | 7,0000 | 6,1800 | 0,8600 |
| NO ₃ (mg/l) | 44,0000 | 4,2900 | 11,0500 |
| NO ₂ (mg/l) | 0,1000 | 0,0800 | 0,0015 |
| NH ₄ (mg/l) | 0,5000 | 0,0700 | 0,0017 |
| PO ₄ (mg/l) | 0,5000 | 0,0200 | 0,0002 |
| DBO ₅ (mg/l) | 5,0000 | 2,8200 | 0,4400 |
| DCO (mg/l) | 25 | 28,7500 | 46,6600 |

Nous avons calculé la variance pour évaluer dans quelle mesure les paramètres varient autour de leur moyenne. Une variance élevée signifie que les valeurs sont très dispersées par rapport à la moyenne, ce qui peut indiquer une grande variabilité ou instabilité des valeurs. À l'inverse, une variance faible signifie que les valeurs sont plus proches de la moyenne, ce qui suggère une plus grande stabilité ou homogénéité des valeurs.

Nous remarquons que les moyennes des paramètres pH, NO₂, NH₄, PO₄, et l'oxygène dissous O_{2d} sont inférieures aux normes établies pour ces paramètres, et que leurs variances sont faibles ce qui est considéré comme acceptable et conforme. Pour les nitrates (NO₃), bien que la variance soit élevée par rapport à la moyenne, elle reste relativement stable. Par conséquent, cela peut être considéré comme acceptable car elle est inférieure à la norme. En revanche, nous observons que la moyenne de la demande chimique en oxygène (DCO) dépasse la norme établie, et que sa variance est très élevée, ce qui n'est pas acceptable.

5.4 Indice de qualité de l'eau

5.4.1 Indice de qualité de l'eau de Bascaron

Pour évaluer la qualité de l'eau sur une base mensuelle pendant la période de 2018 à 2022, nous avons calculé l'indice de qualité de l'eau (IQE) de Bascaron pour chaque mois.

Cet indice regroupe huit paramètres (pH, oxygène dissous, nitrates, nitrites, ammonium, phosphates, DCO, (DBO₅)) pour fournir une évaluation globale de la qualité de l'eau du barrage Cheffia.

TABLE 5.3 – L'évaluation de la qualité de l'eau selon l'indice de qualité de l'eau de Bascaron

| Mois | WQI | Classification |
|---------|-------|----------------|
| janv-18 | 52,11 | Moyenne |
| févr-18 | 50,92 | Moyenne |
| mars-18 | 49,74 | Mauvaise |
| avr-18 | 50,53 | Moyenne |
| mai-18 | 45,79 | Mauvaise |
| juin-18 | 48,55 | Mauvaise |
| juil-18 | 53,29 | Moyenne |
| août-18 | 51,71 | Moyenne |
| sept-18 | 53,68 | Moyenne |
| nov-18 | 53,68 | Moyenne |
| déc-18 | 56,05 | Moyenne |
| janv-19 | 52,50 | Moyenne |
| févr-19 | 59,21 | Moyenne |
| mars-19 | 54,47 | Moyenne |
| avr-19 | 49,74 | Mauvaise |
| mai-19 | 48,95 | Mauvaise |
| juin-19 | 54,47 | Moyenne |
| juil-19 | 52,89 | Moyenne |
| août-19 | 54,08 | Moyenne |
| sept-19 | 60,00 | Moyenne |
| oct-19 | 54,87 | Moyenne |

| | | |
|---------|-------|----------|
| nov-19 | 57,24 | Moyenne |
| déc-19 | 58,42 | Moyenne |
| janv-20 | 58,42 | Moyenne |
| févr-20 | 57,63 | Moyenne |
| mars-20 | 58,03 | Moyenne |
| avr-20 | 55,66 | Moyenne |
| mai-20 | 55,66 | Moyenne |
| juin-20 | 52,50 | Moyenne |
| juil-20 | 52,50 | Moyenne |
| août-20 | 57,24 | Moyenne |
| sept-20 | 61,58 | Moyenne |
| oct-20 | 62,76 | Moyenne |
| nov-20 | 59,61 | Moyenne |
| déc-20 | 56,84 | Moyenne |
| janv-21 | 60,39 | Moyenne |
| févr-21 | 58,82 | Moyenne |
| mars-21 | 57,63 | Moyenne |
| avr-21 | 54,87 | Moyenne |
| juin-21 | 52,89 | Moyenne |
| août-21 | 54,87 | Moyenne |
| sept-21 | 58,03 | Moyenne |
| oct-21 | 57,63 | Moyenne |
| nov-21 | 60,00 | Moyenne |
| déc-21 | 54,47 | Moyenne |
| janv-22 | 55,26 | Moyenne |
| févr-22 | 53,29 | Moyenne |
| mars-22 | 46,97 | Mauvaise |
| mai-22 | 48,95 | Mauvaise |
| juin-22 | 49,34 | Mauvaise |
| sept-22 | 55,26 | Moyenne |

D'après le calcul de l'indice de qualité de l'eau de Bascaron, on constate que la qualité de l'eau a généralement été moyenne entre 2018 et 2022.

5.4.2 Indice de qualité du CCME

Pour évaluer la qualité de l'eau sur une base mensuelle pendant la période de 2018 à 2022, nous avons calculé l'indice de qualité de l'eau (IQE) du CCME pour chaque mois. Cet indice regroupe les mêmes paramètres que la méthode de Bascaron pour fournir une évaluation globale de la qualité de l'eau du barrage Cheffia.

TABLE 5.4 – L'évaluation de la qualité de l'eau selon l'indice de qualité de l'eau du CCME

| Mois | WQI | Classification |
|---------|-------|----------------|
| janv-18 | 89,76 | Bonne |
| févr-18 | 82,90 | Bonne |
| mars-18 | 82,54 | Bonne |
| avr-18 | 83,02 | Bonne |
| mai-18 | 82,89 | Bonne |
| juin-18 | 82,74 | Bonne |
| juil-18 | 82,90 | Bonne |
| août-18 | 90,90 | Bonne |
| sept-18 | 89,76 | Bonne |
| nov-18 | 89,76 | Bonne |
| déc-18 | 91,66 | Bonne |
| janv-19 | 90,90 | Bonne |
| févr-19 | 91,76 | Bonne |
| mars-19 | 82,52 | Bonne |
| avr-19 | 74,40 | Moyenne |
| mai-19 | 82,28 | Bonne |
| juin-19 | 82,77 | Bonne |
| juil-19 | 82,99 | Bonne |
| août-19 | 82,89 | Bonne |
| sept-19 | 75,18 | Moyenne |
| oct-19 | 75,14 | Moyenne |
| nov-19 | 83,63 | Bonne |
| déc-19 | 83,43 | Bonne |

| | | |
|---------|--------|------------|
| janv-20 | 91,55 | Bonne |
| févr-20 | 83,60 | Bonne |
| mars-20 | 83,58 | Bonne |
| avr-20 | 91,66 | Bonne |
| mai-20 | 91,66 | Bonne |
| juin-20 | 100,00 | Excellente |
| juil-20 | 100,00 | Excellente |
| août-20 | 100,00 | Excellente |
| sept-20 | 91,83 | Bonne |
| oct-20 | 91,83 | Bonne |
| nov-20 | 100,00 | Excellente |
| déc-20 | 91,60 | Bonne |
| janv-21 | 83,58 | Bonne |
| févr-21 | 83,57 | Bonne |
| mars-21 | 83,51 | Bonne |
| avr-21 | 91,54 | Bonne |
| juin-21 | 91,38 | Bonne |
| août-21 | 91,6 | Bonne |
| sept-21 | 83,41 | Bonne |
| oct-21 | 91,54 | Bonne |
| nov-21 | 91,54 | Bonne |
| déc-21 | 91,71 | Bonne |
| janv-22 | 90,65 | Bonne |
| févr-22 | 91,27 | Bonne |
| mars-22 | 83,42 | Bonne |
| mai-22 | 82,77 | Bonne |
| juin-22 | 83,24 | Bonne |
| sept-22 | 83,31 | Bonne |

D'après le calcul de l'indice de qualité de l'eau du CCME, on constate que la qualité de l'eau a généralement été bonne entre 2018 et 2022.

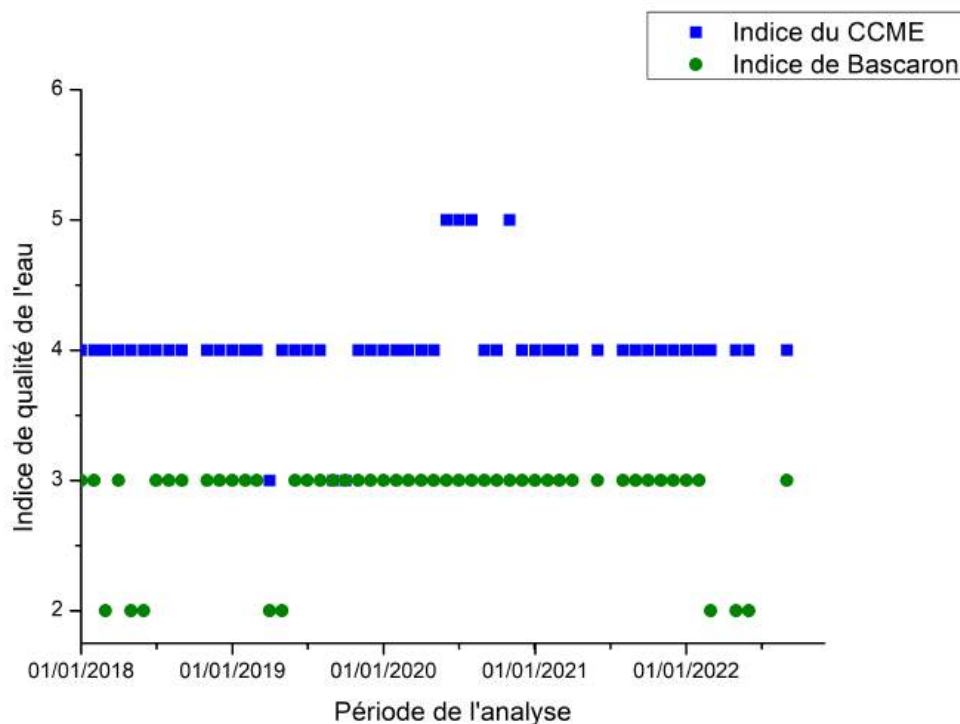
5.5 Comparaison des Indices de Qualité de l'Eau : CCME et Bascaron

Le tableau 5.5, indique les valeurs numériques attribuées à chaque catégorie de qualité de l'eau.

TABLE 5.5 – La légende des classifications de la qualité de l'eau

| Classification | Valeur attribué |
|----------------|-----------------|
| Excellente | 5 |
| Bonne | 4 |
| Moyenne | 3 |
| Mauvaise | 2 |
| Très mauvaise | 1 |

La figure 5.9 présente une comparaison des deux indices, Bascaron et CCME durant la période de l'étude.



Pourtant, les deux indices ont été calculés en utilisant les mêmes paramètres, pour le même barrage, et pour les mêmes dates de prélèvement.

Pour justifier cette différence, nous allons calculer le poids de chaque paramètre dans la méthode CCME afin de déterminer quels paramètres influencent le plus le calcul de cet indice. En effet, dans le modèle de Bascaron, un poids fixe a été attribué à chaque paramètre.

5.5.1 Comparaison des poids des paramètres physico-chimiques

Afin de calculer le poids de chaque paramètre dans l'indice de qualité de l'eau du (CCME), nous avons utilisé la régression linéaire. Le tableau 5.6 représente le poids (en %) de chaque paramètre utilisé pour le calcul de l'indice de qualité de l'eau selon le CCME.

TABLE 5.6 – Le poids de chaque paramètre dans le calcul de l'indice de qualité de l'eau du CCME.

| Paramètres | Poids (%) |
|-------------|-----------|
| pH | 5,59 |
| O2d (mg/l) | 0,74 |
| NO3 (mg/l) | 0,02 |
| NO2 (mg/l) | 23,35 |
| NH4 (mg/l) | 29,36 |
| PO4 (mg/L) | 40,68 |
| DBO5 (mg/l) | 0,10 |
| DCO (mg/l) | 0,15 |

Nous remarquons que les poids les plus importants dans le calcul de l'indice de qualité de l'eau du CCME sont ceux des phosphates, suivis de l'ammonium et des nitrites. Par conséquent, la qualité de l'eau a généralement été bonne, car cet indice se concentre principalement sur ces trois paramètres. Étant donné que les concentrations de phosphates, d'ammonium et de nitrites étaient conformes aux normes, cela explique pourquoi l'eau a été classifiée comme étant de bonne qualité.

En revanche, Bascaron a établi les poids de chaque paramètre comme indiqué dans le tableau 5.7. D'après ces poids, on remarque que dans le calcul de son indice de qualité de l'eau, il se focalise le plus sur l'oxygène dissous, l'ammonium, la DBO5 et la DCO. Selon l'évolution de chaque paramètre entre 2018 et 2022, les concentrations de la DCO ont dépassé les normes pendant une longue période, ce qui explique pourquoi l'eau a été classée comme de qualité moyenne.

TABLE 5.7 – Le poids de chaque paramètre dans le calcul de l'indice de qualité de l'eau de Bascaron.

| Paramètres | Poids |
|-------------|-------|
| pH | 1 |
| O2d (mg/l) | 4 |
| NO3 (mg/l) | 2 |
| NO2 (mg/l) | 2 |
| NH4 (mg/l) | 3 |
| PO4 (mg/L) | 1 |
| DBO5 (mg/l) | 3 |
| DCO (mg/l) | 3 |

Lors de l'évaluation de la qualité de l'eau, il est important de prendre en compte les différents types de pollutions affectant les ressources aquatiques. Le modèle Bascraon se concentre sur la pollution organique, tandis que le modèle CCME se focalise sur la pollution azotée et phosphorée. Par conséquent, pour obtenir une évaluation complète et précise dans notre cas d'étude, il est essentiel de calculer les deux indices.

5.5.1.1 Evaluation de la fiabilité de la méthode de régression linéaire multiple

Afin d'évaluer la fiabilité de la méthode de régression linéaire multiple pour le calcul des poids des paramètres physico-chimiques dans la méthode de CCME, nous avons comparé l'Indice de Qualité de l'Eau (IQE) réel, calculé en utilisant la méthode de CCME, et l'IQE estimé, calculé en utilisant la méthode de régression linéaire multiple, en les traçant sur un graphe (figure 5.10).

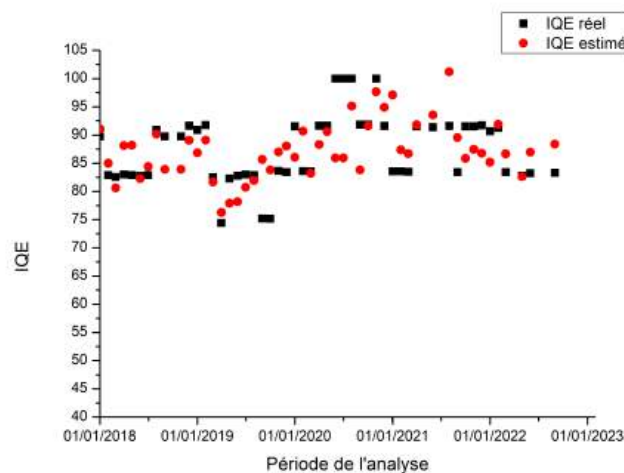


FIGURE 5.10 – La Comparaison entre l'IQE réel et l'IQE estimé

D'après le graphe, nous remarquons que les deux indices sont très proches, ce qui justifie la fiabilité de la méthode de régression linéaire. De plus, l'erreur moyenne calculée était égale à 4%.

5.6 Discussion sur la qualité de l'eau du barrage du Cheffia

L'évaluation de la qualité de l'eau du barrage de Cheffia a révélé une bonne qualité. Cette observation s'explique par plusieurs facteurs, tels que la présence de contre-pentes naturelles, le type de sol, et les pratiques agricoles traditionnelles.

Nous avons utilisé Google Earth pour analyser la topographie et identifier la présence de contre-pentes à proximité du barrage. La figure 5.11 montre plusieurs contre-pentes autour du barrage. Ces contre-pentes favorisent la formation de fossés naturels qui agissent comme des zones tampons, (voir chapitre 1 section 1.5).

En effet, l'eau s'écoule plus lentement dans ces fossés, ce qui permet aux sédiments et aux polluants d'avoir un long temps de séjour, favorisant ainsi leur adsorption et même leur dégradation. Pour optimiser la capacité de filtration de ces fossés, il est recommandé de les enherber, (voir chapitre 1 section 1.5.1).

D'autre part, la carte pédologique, figure 2.7 du chapitre 2, montre que le type de sol dans cette zone est du cambisol calcique, qui est peu perméable. Cette faible perméabilité constitue un avantage, car elle limite l'infiltration des polluants vers la nappe phréatique.

Selon la carte d'occupation des sols, figure 2.8 du chapitre 2, des zones agricoles se trouvent en amont du barrage. La bonne qualité de l'eau peut s'expliquer par l'hypothèse que les pratiques agricoles dans ces zones sont traditionnelles.

Les figures 5.11, 5.12 et 5.13 présentent les contre-pentes à proximité du barrage ainsi que leurs profils de dénivelé.



FIGURE 5.11 – Les contre-pentes à proximité du Barrage Cheffia.

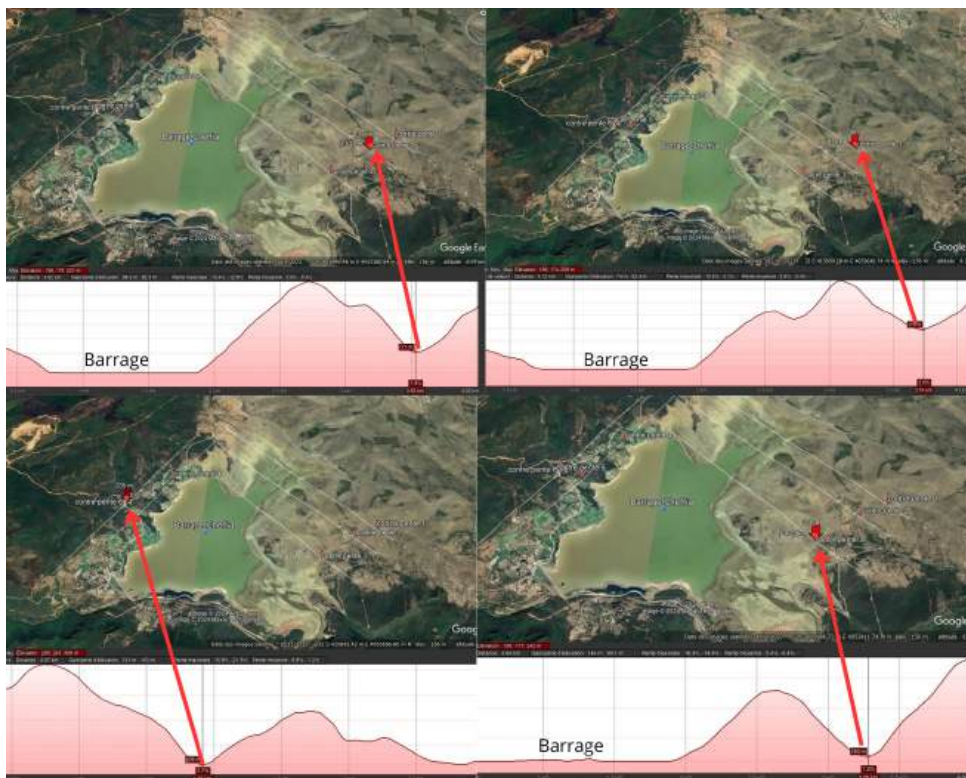


FIGURE 5.12 – Les contres pentes et leurs profils de dénivélé.

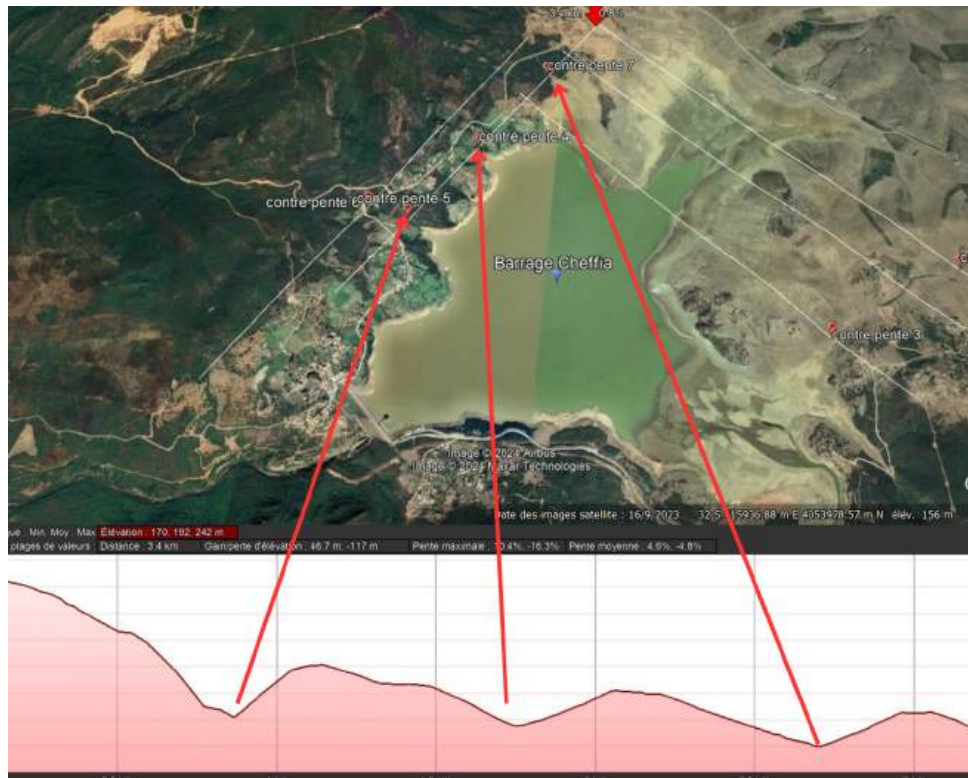


FIGURE 5.13 – Les contres pentes et leurs profils de dénivelé.

5.6.1 Analyse chronologique

Nous avons utilisé l'analyse chronologique pour prédire l'évolution de chaque paramètre de 2023 jusqu'à 2030. Les figures 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18, 5.19, 5.20 et 5.21 présentent respectivement les prédictions du pH, de l'oxygène dissous, des nitrates, des nitrites, de l'ammonium, des phosphates, de la DBO5 et de la DCO.

- pH

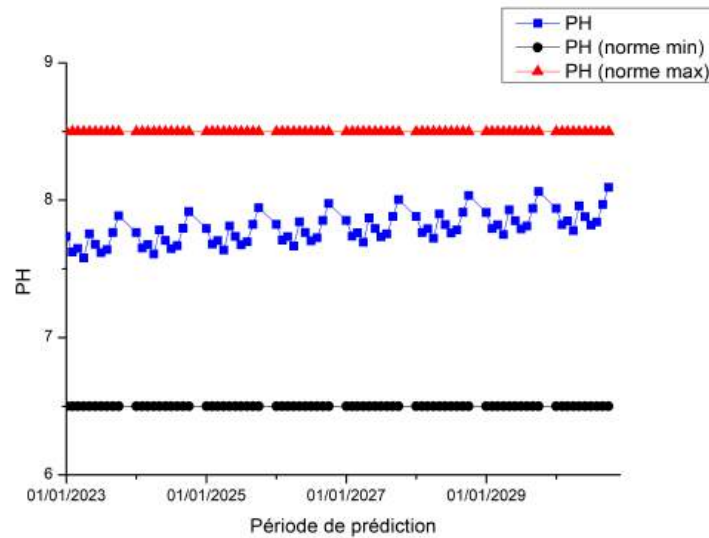


FIGURE 5.14 – L'évolution du pH pendant la période 2023-2030.

La figure 5.14 montre que le pH reste conforme aux normes jusqu'à l'année 2030.

- L'oxygène dissous

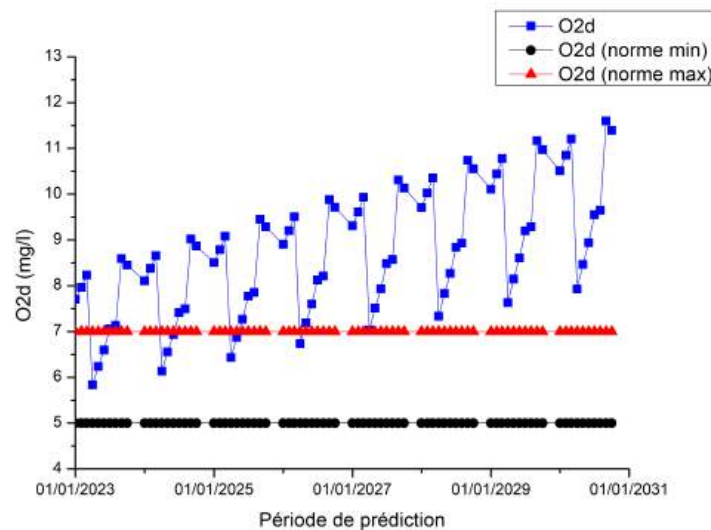


FIGURE 5.15 – L'évolution de l'oxygène dissous pendant la période 2023-2030

La figure 5.15 montre que les concentrations d'oxygène dissous ont tendance à augmenter pendant la période 2023-2033. Cette augmentation est acceptable et conforme, car plus la concentration d'oxygène dissous est élevée, plus la dégradation de la matière organique est facilitée. Cela empêche l'accumulation de polluants et contribue à maintenir la qualité de l'eau.

Cependant, il est important de noter que, compte tenu des conditions climatologiques de la région, la valeur réelle de l'oxygène dissous ne peut pas dépasser 10 mg/l. Par conséquent, cette méthode ne peut pas prédire cette condition.

- **Les nitrates NO_3**

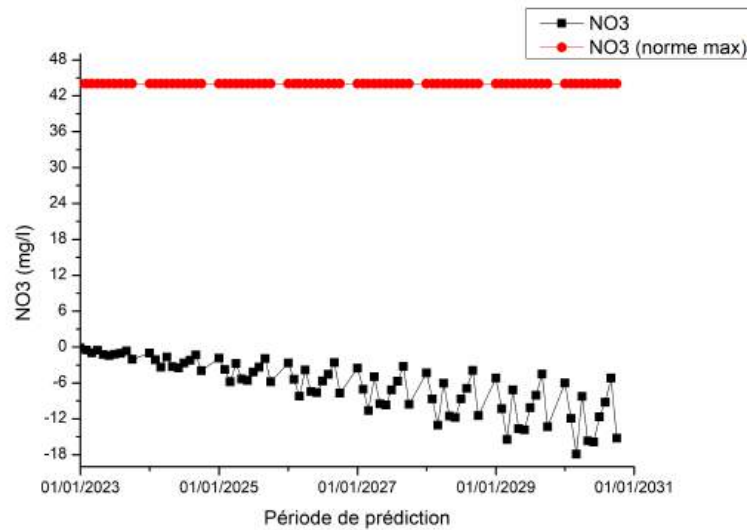


FIGURE 5.16 – L'évolution des nitrates pendant la période 2023-2030

- **Les nitrites NO_2**

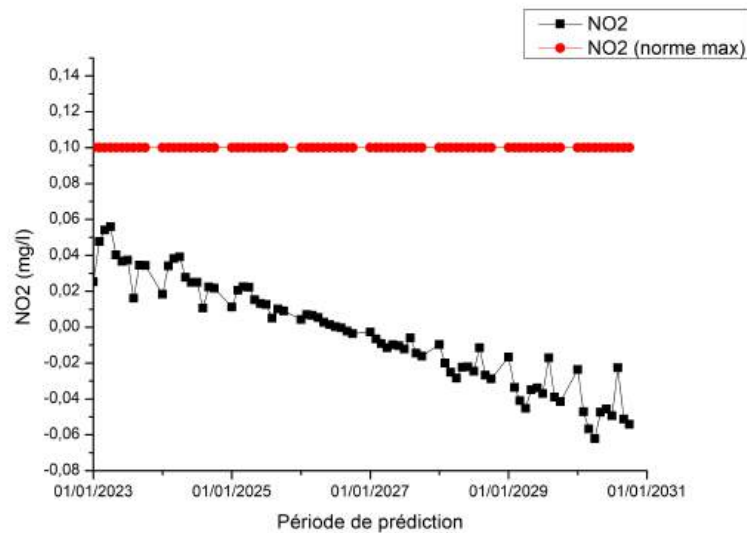


FIGURE 5.17 – L'évolution des nitrates pendant la période 2023-2030

Les figures 5.16 et 5.17 montrent une diminution des concentrations de nitrates et de nitrites respectivement, ce qui indique une absence de pollution azotée, notamment celle causée par les engrais et les pesticides.

• Les nitrites NH_4

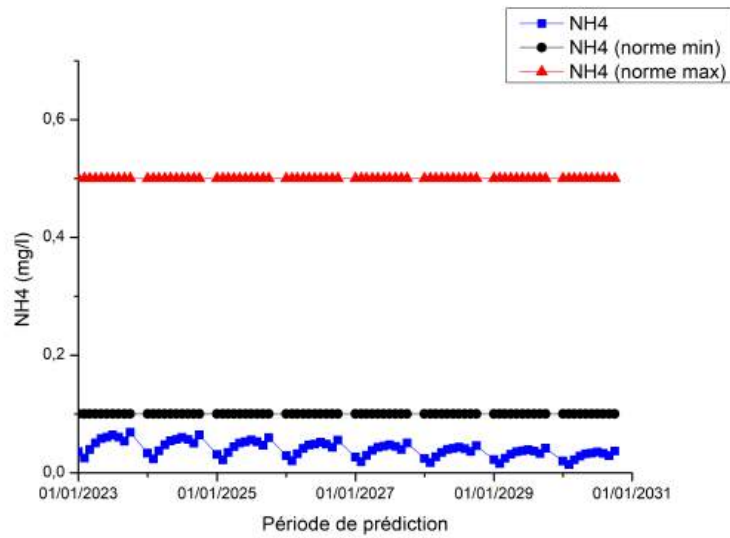


FIGURE 5.18 – L'évolution de l'ammonium pendant la période 2023-2030

D'après la figure 5.18 l'ammonium reste dans les normes et tend à diminuer.

• Les phosphates PO_4

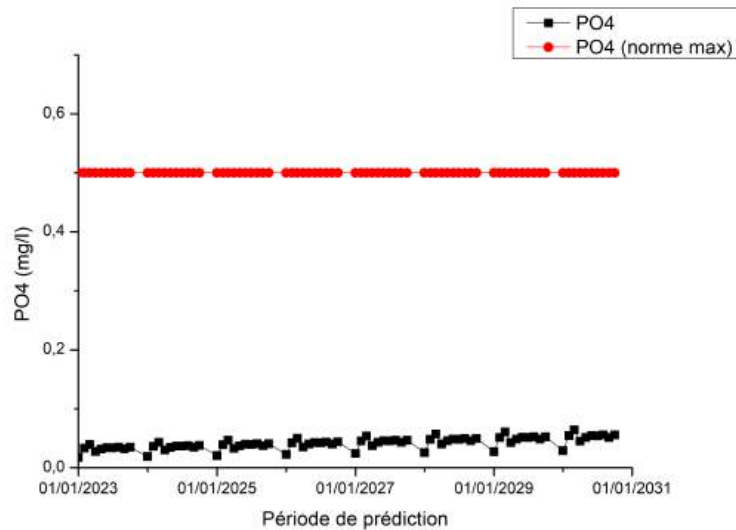


FIGURE 5.19 – L'évolution des phosphates pendant la période 2023-2030

D'après la figure 5.19, les concentrations des phosphates restent faibles et conformes aux normes.

- La demande biologique en oxygène sur 5 jours (DBO₅)

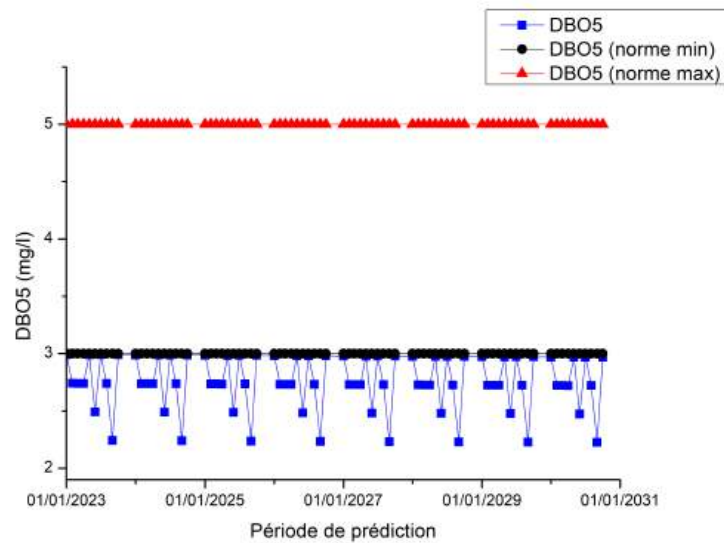


FIGURE 5.20 – L'évolution de la DBO5 pendant la période 2023-2030

La figure 5.20 montre que les concentrations de la DBO5 ne dépassent pas les normes et tendent à diminuer.

- La demande chimique en oxygène (DCO)

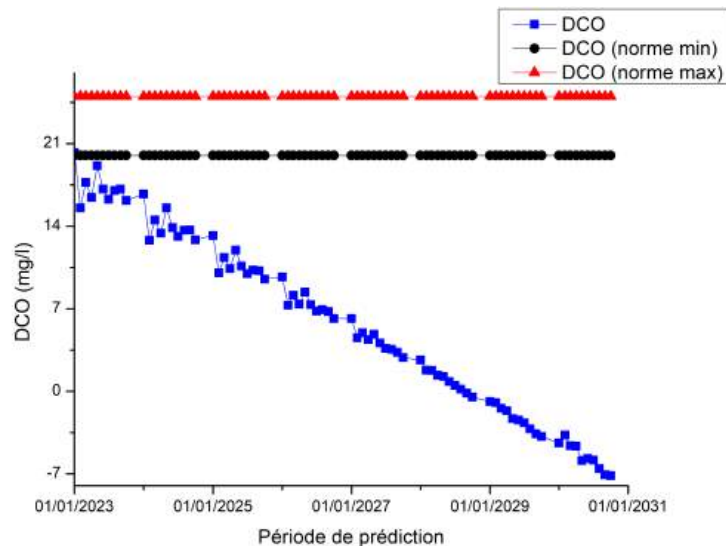


FIGURE 5.21 – L'évolution de la DCO pendant la période 2023-2030

La figure 5.21 montre une diminution des concentrations de DCO, indiquant une réduction de la pollution organique. Cette amélioration pourrait être liée à l'absence de pollution azotée, comme le montre la figure 5.17. La diminution des nitrites limite la prolifération des algues, ce qui contribue à la baisse des concentrations de DCO.

Caclul de l'erreur

Pour évaluer la fiabilité de cette méthode, nous avons calculé l'erreur absolue. Les résultats sont présentés dans le tableau 5.8.

TABLE 5.8 – Les erreurs absolues des paramètres

| Paramètre | Erreur absolue |
|-------------------------|----------------|
| pH | 2,07 |
| O _{2d} (mg/l) | 12,95 |
| NO ₃ (mg/l) | 90,40 |
| NO ₂ (mg/l) | 61,64 |
| NH ₄ (mg/l) | 88,20 |
| PO ₄ (mg/L) | 33,31 |
| DBO ₅ (mg/l) | 22,65 |
| DCO (mg/l) | 19,48 |

Concernant le pH, l'erreur de prédiction est inférieure à 10%, ce qui est considéré acceptable. En revanche, pour les phosphates (PO₄), l'ammonium (NH₄) et les nitrites (NO₂), l'erreur de prédiction dépasse 10%. Cette erreur notable est due à leurs valeurs souvent proches de zéro, rendant la prédiction plus difficile. Pour les autres paramètres, bien que des erreurs existent, elles restent dans une marge acceptable. Il est important de noter que la prédiction des paramètres de qualité de l'eau reste une estimation et ne peut pas atteindre une précision parfaite.

5.7 Conclusion

La qualité de l'eau dans la zone d'étude semble globalement bonne, favorisée par une topographie généralement basse qui limite le transfert des polluants.

De plus, la présence de zones tampons naturelles, comme les fossés, contribue à la protection de la qualité de l'eau. Cependant, en raison du manque de données sur l'ensemble du bassin versant, il est impossible de généraliser l'état de la pollution, que ce soit pour les cours d'eau ou pour les sols. La réalisation de prélèvements sur l'ensemble de la zone d'étude est nécessaire pour obtenir une évaluation complète et précise de la qualité de l'eau.

Conclusion générale

Le bassin versant de Bounamoussa influence de manière significative la qualité de l'eau du barrage Cheffia, tant positivement que négativement. En effet, les fortes précipitations et le type de sol, peu perméable, favorisent le transfert des polluants vers le barrage. De plus, l'occupation des sols, caractérisée par des zones agricoles et urbanisées, contribue également à cette dynamique de pollution. En revanche, la topographie basse du bassin versant limite ce transfert de pollution, tandis que les zones humides présentes jouent un rôle important dans la réduction des contaminants en agissant comme des zones tampons naturelles.

Pour évaluer l'état de la pollution dans le bassin versant de Bounamoussa, nous nous intéresserons à la qualité globale de l'eau du barrage Cheffia dans le cadre de cette étude. A cet effet, deux indices de qualité de l'eau, de Bascaron et du CCME ont été utilisés sur la base de données relatives au pH, de la conductivité EC, de l'oxygène dissous OD, de la demande biologique DBO₅, de la demande chimique DCO, des dérivés azotés et phosphorés, ... sur la période de 2018 à 2022 pour l'évaluation de la qualité de l'eau du barrage. Il ressort des résultats de calcul des IQE, que la qualité globale de l'eau du barrage Cheffia est moyenne à bonne, avec des indices compris entre 45,79 et 62,76 pour celui de Bascaron et entre 74,4 et 100 pour celui du CCME. Cela pourrait être attribué à la configuration topographique basse de la région et à la présence de fossés naturels, qui jouent le rôle de zones tampons. L'évaluation de la qualité de l'eau à l'aide des IQE de Bascaron a montré que le niveau de qualité de l'eau est resté constant et moyen de 2018 à 2022. Tandis que l'IQE du CCME a montré que le niveau de qualité de l'eau est resté constant et bon de 2018 à 2022.

Une méthode de régression linéaire a également été employée pour déterminer l'influence relative de chaque paramètre physico-chimique dans l'indice de qualité du CCME, révélant que cet indice se concentre sur les paramètres azotés et phosphorés, tandis que l'indice de Bascaron se concentre sur les paramètres organiques. L'analyse chronologique des données a permis de prévoir l'évolution de la qualité de l'eau du barrage Cheffia, révélant une tendance globalement positive.

L'évaluation de la qualité d'un bassin versant est étroitement liée à la qualité des cours d'eau, du sol et des sédiments mais également à la base de données disponibles et la fiabilité des mesures effectuées. Cependant, le manque de données exhaustives sur l'ensemble

du bassin versant restreint la capacité de généraliser les résultats concernant l'état de la pollution des cours d'eau et des sols. Pour obtenir une évaluation plus complète et précise, il est impératif de réaliser des prélèvements sur toute la zone d'étude, tant au niveau des sols que des cours d'eau. Ces prélèvements permettront d'affiner l'analyse et de mieux comprendre les dynamiques de pollution.

Enfin, une évaluation précise de la qualité de l'eau nécessite une compréhension approfondie de l'importance de chaque paramètre dans les indices de qualité de l'eau. Pour maintenir une bonne qualité de l'eau dans le bassin versant de Bounamoussa, il est indispensable de gérer et de préserver les zones tampons, ainsi que de procéder à une évaluation régulière de la qualité de l'eau.

Bibliographie

- ARRAR, J. (2024). *Pollution des eaux et des sols*. Cours dispensé à l'École Nationale Supérieure Polytechnique, Département Génie de l'Environnement.
- AUZET, A.V. (1997). *Processus élémentaires d'érosion : l'expérience des terres agricoles*. Mémoire de géosciences. hors-série. Rennes : Édition universitaire.
- BELLIR, K. (2013). "Caractérisation et étude de la rétention des polluants organiques et inorganiques par des argiles locales". Thèse de doct. Faculté de génie des procédés pharmaceutiques.
- BENGRINE, A. (2019). "Contribution à l'étude de la rétention des polluants par des réseaux de polymères". Thèse de doct. Université de Tlemcen-Abou Bekr Belkaid.
- BERMAD, A. (1990). "Elaboration d'un modèle de gestion d'un barrage réservoir : application au barrage de la Cheffia (Annaba)". Mémoire de Magister en Hydraulique. Alger : École Nationale Polytechnique.
- BOUBEKEUR, F.Z. (2021). "Contribution à l'étude de la biodiversité des zones humides de l'Est algérien : état des lieux, gestion et valorisation". Doctoral dissertation. Université.
- BOUMALEK, W. (2020). "Études des possibilités de valorisation agricole des sous-produits d'épuration et l'amélioration de la gestion des processus épuratoires d'une station d'épuration". Thèse de doct. École Nationale Polytechnique, Département Hydraulique.
- BRUNO, A. (1999). *La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant : processus, facteurs, modèles*. Bucarest : Édition universitaire, p. 200.
- CARLUER, N. (2021). *Des solutions techniques : les zones tampons*.
- CARLUER, N., C. CATALOGNE, C. DAGÈS et J. TOURNEBIZE (2017). "Aménager le territoire et gérer les aménagements : les zones tampons sèches et humides, les fossés pour lutter contre les pollutions diffuses par les produits phytosanitaires dans les aires de captage". In : *Innovations Agronomiques* 57. hal-01656661, p. 117-139. DOI : [10.15454/1.5137822668081328E12](https://doi.org/10.15454/1.5137822668081328E12).
- CARLUER, N. et V. GOUY (2020). "Des zones tampons pour limiter les pollutions diffuses d'origine agricole". In : *Phytoma*. hal-03131742.
- CATALOGNE, C. et G. LE HÉNAFF (2016). *Guide d'aide à l'implantation des zones tampons pour l'atténuation des transferts de contaminants d'origine agricole*. Guides et protocoles. 64 pages. Agence française pour la biodiversité.

- CCME (2001). *Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life : Canadian water quality index 1.0 technical report*. Winnipeg, Manitoba : Canadian Environmental Quality Guidelines.
- CORPEN, G. (2007). *Les fonctions environnementales des zones tampons*. Les bases scientifiques et techniques.
- DERRADJI, E.F. (2016). "Qualité, gestion et protection des eaux du barrage de Cheffia (Nord-Est algérien)". In : *Le 5ème Colloque international du réseau "Eaux & Climats"*. Fès, Maroc.
- DIMANE, F., K. HABOUBI, I. HANAFI, A. EL HIMRI et K. ANDALOUSSI (2017). "Impact des facteurs de pollution sur la qualité des eaux de la zone aval de la vallée de l'Oued Nekor (Al-Hoceima, Maroc)". In : *European Scientific Journal, ESJ* 13.3, p. 43-60.
- FAO-UNESCO. (1975). *Carte mondiale des sols, 1 :5000000, vol. 1. Légende*. Unesco Paris.
- GOURDON, R. (1997). *Etude de l'adsorption-désorption de polluants organiques dans les sols*. HSMRC - NSF, RECORD – CNRS.
- KHAN, A.A., A TOBIN, R PATERSON, H KHAN et R. WARREN (2005). "Application of CCME procedures for deriving site-specific water quality guidelines for the CCME Water Quality Index". In : *Water Quality Research Journal* 40.4, p. 448-456.
- KIM, T, Y KIM, J SHIN, B GO et Y. CHA (2020). "Assessing land-cover effects on stream water quality in metropolitan areas using the water quality index". In : *Water* 12.11, p. 3294.
- MIRSAL, I.A. (2008). *Soil Pollution : Origin, Monitoring & Remediation*. Germany : SpringerVerlagBerlin Heidelberg.
- MOSCUZZA, C, A.V VOLPEDO, C OJEDA et A.F. CIRELLI (2007). "Water quality index as a tool for river assessment in agricultural areas in the pampean plains of Argentina". In : *Journal of Urban and Environmental Engineering* 1.1, p. 18-25.
- PESCE, S.F. et D.A. WUNDERLIN (2000). "Use of Water Quality Indices to Verify the Impact of Córdoba City (Argentina) on Suquía River". In : *Water Research* 34, p. 2915-2926. DOI : [10.1016/S0043-1354\(00\)00036-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00036-1).
- SHENG, T.C. (1993). *Guide pratique d'aménagement des bassins versants - Étude et planification*.
- SOUFI, B., F. BENOSMANE, X. DIMITRI et M. MAHI (2009). *Etude ONEP / FAO - Atelier sur l'assainissement, l'épuration et la réutilisation des eaux usées*. Présentation du Guide Technique de la Réutilisation des Eaux Usées Epurées Agadir.
- YOVO, F., B. DIMON, E. YAYI, F. SUANON, I. AGANI, V. WOTTO, D. SOHOUNHLOUE et C. A. ENI (2017). "Caractérisation d'eaux usées des quartiers déshérités du sud du Bénin : Cas du quartier Agla". In : *Déchets Sciences et Techniques* 74, p. 1-7.