

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen

*Faculté des sciences de la Nature et de la Vie, des Sciences de la Terre et de
l'Univers*

Département de Biologie

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER en Biologie**

Spécialité : Microbiologie et Contrôle de Qualité

Thème

*Évaluation de la qualité des eaux usées épurées par la logique
floue : cas d'étude de la STEP d'Ain El Houtz*

Présenté par :

GUEYE Mahmadane

Soutenu le 18/06/2025, devant le jury composé de :

Président : Mr. LARBI Belyagoubi

Professeur

Encadrante : Mme MESLI-Merad Boudia Esmâ

Maitre de conférences A

Co-encadrant : Mr. BESSEDIK Madani

Maitre de conférences A

Examinatrice : Mme ABDELBAKI Chérifa

Professeure

Année Universitaire 2024-2025

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer mes sincères remerciements à ALLAH le Tout-Puissant, pour la volonté, la santé et la patience qu'Il m'a accordées durant toutes ces années d'étude.

Tout d'abord, une immense gratitude à mon encadrante, Dr. MESLI-Merad Boudia Esma, et à mon Co-encadrant, Dr. Madani BESSEDIK, pour leur accompagnement précieux, leurs conseils avisés et leur engagement constant dans la réussite de ce travail. Leur expertise et leur soutien ont été essentiels à la structuration et à l'avancement de cette recherche.

Mes remerciements les plus respectueux vont également à Monsieur le Président du jury, Pr LARBI Belyagoubi, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider cette soutenance, ainsi qu'à Madame l'examinatrice, Pr ABDELBAKI Chérifa, pour l'attention accordée à mon travail et ses remarques constructives qui contribueront à son amélioration.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers le corps professoral de l'Université de Tlemcen, qui m'a offert un cadre académique enrichissant et stimulant. Un merci particulier à Madame ABIYAD Salima, Monsieur BEHADADA Omar et Monsieur le Vice-recteur, pour leur accueil chaleureux et les services rendus qui ont facilité mon parcours au sein de cette institution.

Ma profonde gratitude va à la Commission AFRIDI et l'Union Européen, dont l'attribution de la bourse d'excellence a été une aide précieuse dans la concrétisation de ce travail. Votre soutien a joué un rôle majeur dans la poursuite de mes recherches, et je vous en suis profondément reconnaissant.

Un merci spécial à Dr. Abdelmouneme Hanane et Mouhamed Bendaoud, dont l'aide et les conseils ont été précieux tout au long de ce travail. Leur soutien a été un atout essentiel dans l'élaboration de ce mémoire.

Je souhaite également adresser un merci sincère à mes amis de l'Université de Kaolack, en particulier Mamadou Mboup, mon meilleur ami, dont la loyauté, la constance et la présence indéfectible ont toujours été une source de réconfort et de soutien.

À Ndoumbe Seck, une personne d'une grande générosité, toujours prête à aider et toujours présente. Ta bienveillance et ton soutien ont été précieux tout au long de cette aventure, et je t'en suis infiniment reconnaissant.

À mes amis de l'Université de Kaolack, notamment Baye Fall, Abdourahmane Sène, Modou Diagne, Maguet Beye, Bassisrou Ba, Modou Fall, Almeida, Pape sidy Touré, Balla Faly Dieng, Serigne Modou Gueye, Pape Moussa Ndoye, Ramatoulaye Ndiaye, fatou diop, moustapha cissé, Mara, Aminata mbaye, Sokhna Ndiaye, Ndiémé cousine, Abdou Karime, Ibou Faye, Awa Diagua, Cheikh Tidiane Diallo, Khardiata Ba, Mame Bousso Diop, Marième diop, Khadime Dia, Bousso Diakhoumpa, Mor Ndiaye, Khollé Mbengue, Bety Kébè, Babacar Mbaye, Fallou Bèye, Muhammed Diallo, Abdoulaye Faye, Diarra Ba, Madina, à tous ceux et celles qui ont partagé avec moi ces années riches en apprentissage et en camaraderie, même si je ne vous ai pas tous nommés directement, sachez que vous avez marqué mon parcours. Merci à chacun et chacune d'avoir rendu cette aventure universitaire aussi mémorable merci d'avoir partagé avec moi ces années riches en apprentissage et en camaraderie.

Ma reconnaissance va aussi au Dr. Momath Ndiaye, chef de département d'hydraulique de l'Université de Kaolack, dont l'appui et la bienveillance ont facilité mon parcours académique et contribué à l'aboutissement de ce travail.

Un immense merci également à Saliou Babou et mon grand Pape Badiane, dont la présence et les encouragements ont été d'une grande aide.

À mes amis de l'Université Gaston Berger de Saint-Louis, en particulier Momath Diagne, Amady Dieng et Rokhaya Diouf, Maimouna Sankare, Faty Diagne, Binta Sall, Moustapha Samb, Sonhibou Ndiaye, Bangaly Traoré, Aminata Ndour, fatima thiam, Abdelkader, merci pour votre amitié et votre soutien constant.

Un immense merci également à mes professeurs de l'Université Gaston Berger de Saint-Louis, Dr. Adama SY et Dr. Babacar LY, pour leur encadrement et leur expertise qui ont enrichi mon parcours académique. Votre soutien et votre implication ont été inestimables.

À mes amis avec qui je partage mon quotidien en Algérie, notamment Muhammad Camara, dont l'aide précieuse a été déterminante dans l'élaboration de ce mémoire. Ton soutien, tes conseils et ta présence ont joué un rôle essentiel dans la réussite de ce projet. À Zongo Nadia,

Évaluation de la qualité des eaux usées épurées par la logique floue

une personne d'une bienveillance remarquable, toujours présente et prête à aider. Ton amitié sincère et ton accompagnement ont été une source de motivation tout au long de cette aventure.

À Raveloson Ricca, Moussa Dramè, Mor Kane, Omar Mar et Ameth Fall, Racky Diallo, merci pour votre soutien et votre amitié précieuse tout au long de mon parcours en Algérie.

Ma reconnaissance éternelle va à ma famille, qui a toujours été un repère indéfectible, et en particulier Monsieur Gueye Serigne, dont l'engagement dans ma formation au collège a été fondamental. Une mention spéciale pour son encadrement et son soutien sans faille.

Une pensée toute particulière à Khoudia Gueye, ma meilleure sœur, qui fait tout pour moi et m'a toujours soutenu dans les moments importants. Merci pour tout.

À Mbène Gueye, Fallou Gueye, et à toute ma famille, votre amour et votre soutien ont été inestimables.

Enfin, je tiens à remercier Maïmouna Sène (oumaïma), une personne précieuse qui m'a soutenu à chaque étape. Sa présence, jour et nuit, a été une lumière dans les moments les plus exigeants, un appui indéfectible qui m'a permis d'avancer avec sérénité et confiance. Son soutien, empreint de bienveillance et de force, a fait toute la différence dans cette aventure.

À vous tous, merci du fond du cœur. Ce mémoire est aussi le reflet de votre amour, de votre amitié et de votre engagement à mes côtés.

DÉDICACE

Je dédie ce travail à :

Mes très chers parents, qui m'ont toujours encouragé et soutenu dans chaque étape de mon parcours. Votre amour et votre bienveillance ont été ma force et ma motivation. Que Allah vous protège et vous comble de ses bénédictions.

Ma mère, dont l'amour inconditionnel, les précieux conseils et le soutien indéfectible ont été la clé de ma réussite. Son dévouement et sa bienveillance ont illuminé mon parcours, et pour cela, je lui serai éternellement reconnaissant.

Mes très chers frères et sœurs, qui ont partagé avec moi des moments de joie, d'effort et de persévérance. Votre présence a été un soutien inestimable, et je vous en suis profondément reconnaissant.

Maïmouna Sène, une personne précieuse dont la bienveillance, le soutien et les encouragements ont illuminé ce parcours. Sa présence a été une source d'inspiration et de motivation, contribuant à la réussite de ce projet.

*Ce mémoire est le reflet de votre amour et de votre soutien. **Merci du fond du cœur.***

RÉSUMÉ

En Algérie, la gestion de l'eau constitue un enjeu majeur, particulièrement dans les zones à climat semi-aride où la faible pluviométrie et l'évaporation élevée accentuent la pression sur les ressources hydriques. Ce mémoire s'intéresse à l'évaluation de la performance de la station d'épuration d'Aïn El Houtz entre 2020 et 2022, en tenant compte des variations temporelles de la qualité des eaux usées.

L'étude analyse l'efficacité du traitement des eaux usées à trois échelles temporelles annuelle, saisonnière et mensuelle à travers des paramètres tels que la DBO₅, la DCO, le pH, les nitrates (NO₃⁻), les phosphates (PO₄³⁻) et la température. Pour interpréter les fluctuations observées, une modélisation basée sur la logique floue a été appliquée. Cette approche permet de représenter les comportements non linéaires du système à l'aide de règles linguistiques, en intégrant les incertitudes liées aux données environnementales et opérationnelles. Elle facilite ainsi la compréhension des dynamiques complexes du traitement et la mise en évidence des périodes critiques.

Les résultats ont révélé une forte dégradation de la qualité de l'eau en 2021, suivie d'un retour à un niveau comparable à celui de 2020 en 2022. Cette évolution s'expliquerait par une stabilisation des conditions de fonctionnement de la station et une réduction de la charge polluante en période sèche. La saison humide a été marquée par une baisse de performance, tandis que la saison sèche a présenté une qualité légèrement meilleure mais instable. À l'échelle mensuelle, des périodes critiques récurrentes ont été identifiées, notamment en début et milieu d'année, avant une amélioration progressive observée au second semestre de 2022.

Ces observations mettent en évidence l'influence des conditions climatiques et opérationnelles sur l'efficacité de traitement. L'utilisation de la logique floue comme outil de modélisation s'est révélée pertinente pour représenter les tendances observées et améliorer la compréhension du comportement global du système étudié.

Mots-clés : Station d'épuration, qualité des eaux, logique floue, variations temporelles, modélisation, Aïn El Houtz.

ABSTRACT

In Algeria, water management represents a critical challenge, particularly in semi-arid regions where low rainfall and high evaporation intensify pressure on water resources. This study focuses on evaluating the performance of the Aïn El Houtz wastewater treatment plant from 2020 to 2022, with particular attention to the temporal variations in wastewater quality.

The analysis assesses the treatment efficiency across three temporal scales annual, seasonal, and monthly based on key physicochemical and environmental parameters, including BOD₅, COD, pH, nitrates (NO₃⁻), phosphates (PO₄³⁻), and temperature. To interpret the observed fluctuations, a modeling approach based on fuzzy logic was applied. This method enables the representation of the system's nonlinear behavior using linguistic rules while accounting for uncertainties associated with environmental and operational data. It thus helps clarify the complex dynamics of the treatment process and highlights critical periods.

The results revealed a significant decline in water quality in 2021, followed by a return to levels comparable to those of 2020 in 2022. This evolution may be attributed to the progressive stabilization of operational conditions and a reduction in pollutant loads during the dry season. The wet season was associated with lower performance, while the dry season exhibited slightly better but still unstable water quality. On a monthly scale, recurring critical periods were observed, particularly at the beginning and middle of the year, with notable improvement during the second half of 2022.

These findings highlight the influence of climatic and operational conditions on treatment performance. The use of fuzzy logic as a modeling tool proved effective in representing observed trends and enhancing understanding of the system's overall behavior.

Keywords: Wastewater treatment plant, water quality, fuzzy logic, temporal variations, modeling, Aïn El Houtz.

المخلص

في الجزائر، تُعد إدارة الموارد المائية تحديًا كبيرًا، لا سيما في المناطق ذات المناخ شبه الجاف، حيث يؤدي ضعف التساقطات وارتفاع معدلات التبخر إلى زيادة الضغط على الموارد المائية. يهتم هذا البحث بتقييم أداء محطة معالجة المياه المستعملة بعين الحوتز خلال الفترة الممتدة من سنة 2020 إلى 2022، مع الأخذ بعين الاعتبار التغيرات الزمنية في جودة المياه المستعملة

تقوم الدراسة بتحليل فعالية المعالجة على ثلاث مستويات زمنية: السنوية، الموسمية، والشهرية، وذلك من خلال مؤشرات ، والأس الهيدروجيني(DCO) ، والطلب الكيميائي على الأوكسجين(DBO₅) مثل الطلب البيوكيميائي على الأوكسجين ، ودرجة الحرارة. ولتفسير التغيرات المسجلة، تم اعتماد نمذجة تعتمد (PO₄³⁻) ، والفوسفات(NO₃⁻) ، والنترات(pH) المنطق الضبابي، وهي مقارنة تسمح بتمثيل السلوكيات غير الخطية للنظام باستخدام قواعد لغوية، مع إدماج عدم اليقين المرتبط بالبيانات البيئية والتشغيلية. تسهم هذه المقاربة في فهم الديناميكيات المعقدة للمعالجة، وتساعد على تحديد الفترات الحرجة.

أظهرت النتائج تدهورًا ملحوظًا في جودة المياه خلال سنة 2021، تلاه تحسن في الأداء سنة 2022، ليصل إلى مستويات مشابهة لسنة 2020. يُعزى هذا التحسن إلى استقرار ظروف تشغيل المحطة، وانخفاض الحمولة الملوثة خلال الفترة الجافة. أما في الموسم الرطب، فقد سُجل انخفاض في الأداء، بينما عرفت الفترة الجافة نوعًا من التحسن غير المستقر. وعلى المستوى الشهري، تم تحديد فترات حرجة متكررة، خصوصًا في بداية ومنتصف السنة، قبل تسجيل تحسن تدريجي خلال النصف الثاني من سنة 2022.

تُبرز هذه الملاحظات تأثير الظروف المناخية والتشغيلية على فعالية المعالجة. وقد أثبت استخدام المنطق الضبابي كأداة نمذجة فعاليته في تمثيل الاتجاهات المُسجّلة، وتحسين فهم السلوك العام للنظام محل الدراسة.

الكلمات المفتاحية: محطة المعالجة، جودة المياه، المنطق الضبابي، التغيرات الزمنية، النمذجة، عين الحوت

TABLE DES MATIERES

| | |
|--|------|
| REMERCIEMENTS | I |
| DÉDICACE | IV |
| RÉSUMÉ | V |
| TABLE DES MATIERES | VIII |
| LISTE DES FIGURES | X |
| LISTE DES TABLEAUX..... | XI |
| LISTE DES ABREVIATIONS | XII |
| INTRODUCTION | 1 |
| PREMIÈRE PARTIE : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE..... | 3 |
| CHAPITRE I : QUALITÉ DE L'EAU | 3 |
| 1. L'INTÉRÊT DE L'ÉTUDE DE LA QUALITÉ DE L'EAU EN ALGÉRIE ET DANS LE MONDE..... | 3 |
| 1.1 PROBLEMATIQUES DE SANTE..... | 3 |
| 1.2- PROBLEMATIQUES ENVIRONNEMENTALES | 4 |
| 1.3- PROBLEMATIQUES SOCIO-ECONOMIQUES..... | 5 |
| 1.4- L'IMPORTANCE MONDIALE DE LA QUALITE DE L'EAU | 6 |
| 2. EAUX USSÉES | 6 |
| 2.1- ORIGINES DES EAUX USEES | 7 |
| 2.2- COMPOSITION DES EAUX USEES | 9 |
| 2.2.1- PARAMETRES DE POLLUTION | 9 |
| 2.2.1.1- PARAMETRES ORGANOLEPTIQUES..... | 9 |
| 2.2.1.2- LES PARAMETRES PHYSIQUES | 10 |
| 2.2.1.3- LES PARAMETRES CHIMIQUES | 12 |
| 2.2.1.4- LES PARAMETRES MICROBIOLOGIQUES | 15 |
| 2.3- IMPACTS DES EAUX USEES SUR L'ENVIRONNEMENT, LA SANTE HUMAINE ET L'ECONOMIE | 20 |
| CHAPITRE II : ÉVALUATION, SURVEILLANCE ET UTILISATION DES INDICES DE QUALITE DE L'EAU | 22 |
| 1. ÉVALUATION ET SURVEILLANCE DE LA QUALITÉ DE L'EAU..... | 22 |
| 1.1- PARAMETRES DE LA QUALITE DE L'EAU | 22 |
| 1.2- METHODES D'EVALUATION DE LA QUALITE DE L'EAU..... | 23 |
| 1.3- SUIVI DE LA QUALITE DE L'EAU | 24 |
| 1.4- STRATEGIES POUR OPTIMISER LE CONTROLE DE LA QUALITE DE L'EAU | 25 |
| 2. INDICE DE QUALITE DE L'EAU | 26 |
| 2.1- HISTORIQUE..... | 26 |
| 2.2- METHODES CLASSIQUES DES INDICES DE QUALITE DE L'EAU | 27 |
| 2.3- LOGIQUE FLOUE..... | 33 |

| | |
|---|-----------|
| 2.4 APPLICATION DE LA LOGIQUE FLOUE AU CALCUL DE L'INDICE DE QUALITE DE L'EAU (IQE) | 34 |
| 2.5 AVANTAGES DE L'UTILISATION DE LA LOGIQUE FLOUE POUR ANALYSER LA QUALITE DE L'EAU | 36 |
| DEUXIÈME PARTIE : MATÉRIELS ET MÉTHODOLOGIE | 37 |
| CHAPITRE III : MATÉRIELS ET MÉTHODES | 37 |
| 1. PRESENTATION DE LA STATION D'EPURATION D'AIN EL HOUTZ | 37 |
| 2. DESCRIPTION DE LA STEP | 38 |
| 3. PROCEDES DE TRAITEMENTS UTILISES | 39 |
| 3.1 SECTEUR DE L'EAU | 39 |
| 3.2 FILIERE BOUES | 42 |
| 4. PROGRAMMATION | 43 |
| 4.1 SELECTION DU LOGICIEL UTILISE | 43 |
| 4.2 AVANTAGES DE MATLAB POUR CE TRAVAIL | 43 |
| 5. DEVELOPPEMENT DE L'INDICE FLOU DE LA QUALITE DE L'EAU | 44 |
| 5.1 FONDEMENT DU MODELE FLOU | 46 |
| 6. STRUCTURE DU SYSTEME FLOU | 50 |
| 7. ALGORITHME DE LA LOGIQUE FLOUE | 53 |
| TROISIÈME PARTIE : RÉSULTATS ET INTERPRETATION | 54 |
| CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION | 54 |
| 1. ÉVOLUTION ANNUELLE DE LA QUALITE DE L'EAU DE LA STATION D'EPURATION D'AIN EL HOUTZ (2020-2022) | 54 |
| 1.1 ANALYSE DES RESULTATS ANNUELLES | 54 |
| 1.2 INTERPRETATION DES RESULTATS ET FACTEURS INFLUENTS | 56 |
| 1.3 ÉVALUATION DE L'EFFICACITE DU TRAITEMENT | 57 |
| 2. ÉVALUATION SAISONNIERE DE LA QUALITE DE L'EAU | 57 |
| 2.1 ANALYSE DES VARIATIONS SAISONNIERES | 57 |
| 2.2 INTERPRETATION DES RESULTATS PAR SAISON ET PAR ANNEE | 59 |
| 3. ÉVALUATION MENSUELLE DE LA QUALITE DE L'EAU | 62 |
| 3.1 ANALYSES DES RESULTATS | 62 |
| 3.2 INTERPRETATION DES RESULTATS MENSUELLE | 63 |
| 4. VALIDATION DES RESULTATS | 64 |
| CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS | 68 |
| | 69 |
| RÉFÉRENCES..... | 70 |
| ANNEXES | 78 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| Figure 1: Escherichia coli observées au microscope électronique | 15 |
| Figure 2: Entérovirus observés au microscope électronique | 16 |
| Figure 3 : Helminthe observé au microscope électronique..... | 18 |
| Figure 4 : Cryptosporidium parvum observé au microscope électronique..... | 19 |
| Figure 5: Localisation de la station d'Ain El Houtz | 37 |
| Figure 6: Dégrilleur mécanique | 40 |
| Figure 7 : Dessableur-déshuileur | 40 |
| Figure 8: Bassin d'aération | 41 |
| Figure 9 : Bassin de chloration | 41 |
| Figure 10: Épaississeur | 42 |
| Figure 11: Lit de séchage..... | 42 |
| Figure 12: Aire de stockage | 42 |
| Figure 13: Fonctions d'appartenance des paramètres d'entrées et de la sortie..... | 49 |
| Figure 14 : Évaluation annuelle de la qualité de l'eau..... | 55 |
| Figure 15 : Évaluation saisonnière de la qualité de l'eau | 58 |
| Figure 16: Évaluation mensuelle de la qualité de l'eau | 62 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|----|
| Tableau 1: Illustration de la corrélation entre la conductivité et la minéralisation. | 14 |
| Tableau 2 : Principales bactéries pathogènes présentes dans les eaux usées. | 16 |
| Tableau 3: Principaux virus présents dans les eaux usées. | 17 |
| Tableau 4: Principaux helminthes présents dans les eaux usées. | 18 |
| Tableau 5: Principaux protozoaires présents dans les eaux usées. | 19 |
| Tableau 6: Catégorie de classement WQI CCME | 28 |
| Tableau 7 : Catégorie de classement WQI Horton | 29 |
| Tableau 8 : Catégorie de classement WQI Brown | 30 |
| Tableau 9 : Catégorie de classement WQI IBNGN..... | 31 |
| Tableau 10 : Catégorie de classement WQI Shannon-Weaver..... | 31 |
| Tableau 11 : Catégories de classement WQI OMS | 32 |
| Tableau 12 : Catégorie de classement WQI Bhargava | 33 |
| Tableau 13 : Application de la théorie de Zadeh aux règles floues..... | 35 |
| Tableau 14 : Les valeurs de bases des données de la STEP de Tlemcen. | 38 |
| Tableau 15 : Description des installations de la STEP d'Ain El Houtz | 39 |
| Tableau 16 : Normes de rejets des eaux usées..... | 41 |
| Tableau 17 : Récapitulatif des paramètres a, b et c des fonctions d'appartenance triangulaires pour les variables d'entrée. | 45 |
| Tableau 18 : Récapitulatif des paramètres a, b et c des fonctions d'appartenance triangulaires pour les variables de sortie..... | 45 |
| Tableau 19 : Pondération des paramètres pour l'évaluation de la qualité de l'eau | 47 |
| Tableau 20 : Données d'entrée (moyennes janvier)..... | 64 |
| Tableau 21 : Résultats après fuzzification de tous les paramètres | 67 |

LISTE DES ABREVIATIONS

- **ADN** : Acide désoxyribonucléique
- **AFNOR** : Association française de normalisation
- **CCME** : Conseil canadien des ministres de l'environnement
- **DBO5** : Demande biochimique en oxygène sur 5 jours
- **DCO** : Demande chimique en oxygène
- **DLVO** : Théorie de Derjaguin, Landau, Verwey et Overbeek (interaction des colloïdes)
- **GEMS/water** : Programme mondial de surveillance de la qualité de l'eau des Nations Unies
- **H₂S** : Sulfure d'hydrogène
- **IBGN** : Indice biologique global normalisé
- **IFQE** : Indice flou de qualité de l'eau
- **MATLAB** : Matrix Laboratory
- **MES** : Matières en suspension
- **MMS** : Matière minérale sèche
- **MVS** : Matières volatiles sèche
- **NH₃** : Ammoniac
- **NH₄⁺** : Ammonium
- **NO₂⁻** : Nitrite
- **NO₃⁻** : Nitrate
- **N₂** : Azote
- **NSF** : National Science Foundation
- **NTU** : Unité de turbidité néphélométrique
- **OCDE** : Organisation de coopération et de développement économiques

- **ODD** : Objectifs de développement durable
- **O₂** : Oxygène
- **ONA** : Office national de l'assainissement
- **OMS** : Organisation mondiale de la santé
- **ONU** : Organisation des Nations Unies
- **pH** : Potentiel hydrogène
- **PO₄³⁻** : Phosphate
- **QE** : Qualité de l'eau
- **SIF** : Système d'inférence floue
- **SIG** : Système d'information géographique
- **STEP** : Station d'épuration
- **UNEP** : Programme des Nations Unies pour l'environnement
- **UNESCO** : Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture
- **WC** : Water Closet (toilettes)
- **WQI** : Water Quality Index (Indice de qualité de l'eau)
- **YSI** : Yellow Springs Instruments



INTRODUCTION

INTRODUCTION

L'eau, ressource naturelle vitale et bien national stratégique, constitue à la fois le socle du fonctionnement des écosystèmes naturels et un pilier du développement économique et social. En Algérie, pays largement dominé par un climat aride à semi-aride, la disponibilité des ressources hydriques présente une forte variabilité spatiale et temporelle, exacerbée par une pluviométrie faible et irrégulière ainsi qu'un taux d'évaporation élevé (Nadir et Boualem, 2016). Cette situation déjà fragile est exacerbée par une pression croissante liée à la dynamique démographique, à l'expansion des activités agricoles et industrielles, ainsi qu'aux effets du changement climatique, qui accentuent les tensions sur la disponibilité et la qualité des ressources hydriques (Benhaddad, 2022).

Parmi les causes majeures de pollution de l'eau figurent les rejets non maîtrisés d'effluents domestiques, industriels et agricoles. Ces rejets contribuent à la détérioration progressive des eaux de surface et des nappes souterraines. Plusieurs études menées sur des barrages algériens, tels que ceux de Béni Haroun, Fergoug ou Ghrib, ont mis en évidence cette dégradation continue (Belhadj et al., 2011 ; Hamed et al., 2018), soulignant les menaces qui pèsent tant sur les équilibres écologiques que sur la sécurité de l'alimentation en eau potable, notamment dans la région d'Alger alimentée par le barrage de Keddara (Fashagba et al., 2024).

Dans cette perspective, les Stations d'Épuration (STEP) jouent un rôle central dans la prévention de la pollution et la protection des milieux récepteurs. L'évaluation de leur performance constitue donc un enjeu stratégique pour la gestion durable de l'eau. Toutefois, les approches d'évaluation classiques, bien qu'indispensables, montrent leurs limites face à la complexité des phénomènes hydrologiques et à l'incertitude des données environnementales (CCME, 2004 ; OMS, 2012). C'est pourquoi le recours à des outils d'aide à la décision plus souples, tels que la logique floue, s'avère pertinent. En modélisant les incertitudes associées aux paramètres qualitatifs, cette approche permet une interprétation plus nuancée des performances de traitement. Elle facilite également la communication des résultats auprès des parties prenantes en les traduisant en indices compréhensibles, renforçant ainsi la transparence et l'appropriation des enjeux environnementaux (Salcedo-Sánchez et al., 2016).

La présente étude s'inscrit dans ce cadre et s'intéresse à la STEP d'Aïn El Houtz, dont la performance détermine directement la qualité des eaux rejetées dans le milieu naturel.

La problématique générale qui guide cette recherche est la suivante : ***Comment évaluer la performance de la STEP d'Aïn El Houtz face aux variations temporelles de la qualité des eaux usées traitées ?***

Pour y répondre, cette étude poursuit l'objectif général suivant : Évaluer la performance de la STEP d'Aïn El Houtz à partir d'une analyse des paramètres physico-chimiques des eaux usées traitées et de leur interprétation à l'aide d'un modèle fondé sur la logique floue.

Trois questions spécifiques permettent de structurer l'analyse :

- Quelle est la qualité des eaux traitées par la STEP d'Aïn El Houtz, sur la base de plusieurs paramètres physico-chimiques ?
- En quoi l'application de la logique floue permet-elle une interprétation plus nuancée et fiable des données relatives à la qualité de l'eau ?
- Quels sont les facteurs influençant l'efficacité du traitement dans cette STEP, et comment peut-on les identifier pour soutenir une gestion technique plus adaptée ?

Ces interrogations se déclinent en trois objectifs spécifiques :

- Évaluer la qualité des eaux traitées, à travers l'analyse de paramètres physico-chimiques tels que la DBO₅, la DCO, le pH, l'oxygène dissous, les nitrates, les phosphates et la température ;
- Appliquer la logique floue afin de modéliser l'efficacité du traitement et de détecter les tendances ainsi que les seuils critiques au fil du temps ;
- Analyser les facteurs influençant l'efficacité du traitement, en proposant des recommandations techniques pour renforcer la gestion opérationnelle de la station.

Ce travail est structuré en trois parties principales :

- La première partie est consacrée à une revue bibliographique et comprend deux chapitres. Le premier chapitre examine la qualité de l'eau, tandis que le deuxième chapitre concerne l'évaluation, la surveillance et l'utilisation des indices de qualité de l'eau.

- La deuxième partie est dédiée aux matériels et à la méthodologie. Elle est composée d'un seul chapitre, le troisième chapitre, qui présente les matériels et méthodes employés dans l'étude, en détaillant le modèle d'analyse adopté.
- Enfin, la troisième partie est consacrée aux résultats et à leur interprétation. Elle comprend également un seul chapitre, le quatrième chapitre, qui présente les résultats obtenus ainsi que leur interprétation. Elle se clôt par une conclusion générale, qui récapitule les principaux enseignements de l'étude, ainsi que par des recommandations opérationnelles et scientifiques en vue d'améliorer la gestion de la STEP d'Aïn El Houtz.



**PREMIÈRE PARTIE : REVUE
BIBLIOGRAPHIQUE**

PREMIÈRE PARTIE : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : QUALITÉ DE L'EAU

1. L'INTÉRÊT DE L'ÉTUDE DE LA QUALITÉ DE L'EAU EN ALGÉRIE ET DANS LE MONDE

L'eau est essentielle à l'existence, à la santé et au progrès socio-économique. Toutefois, sa qualité est mise en péril par des éléments naturels et humains, incluant la pollution, l'exploitation excessive et les modifications du climat. L'accès constant et pérenne à l'eau est une question cruciale dans tous les pays du globe. L'Algérie figure parmi les pays méditerranéens affectés par la pression sur l'eau. Elle est considérée comme un pays pauvre en termes de cette ressource, c'est-à-dire qu'elle se situe en dessous du seuil théorique de rareté déterminé à 1000 m³/hab/an (OMS, 1989). Toutefois, les ressources en cours d'utilisation sont influencées par divers éléments tels que : le changement climatique, l'augmentation de la demande de la population, l'insuffisance des infrastructures de conservation des ressources hydriques, et le phénomène de contamination des eaux souterraines et de surface par diverses activités humaines. En effet, le changement climatique entraîne une diminution des précipitations, une accentuation des sécheresses et une perturbation de la recharge des nappes phréatiques. Par ailleurs, la croissance démographique et l'expansion urbaine engendrent une demande accrue en eau, exerçant une pression importante sur les ressources disponibles. Le manque d'infrastructures adéquates limite, quant à lui, les capacités de stockage, de traitement et de valorisation des eaux. Enfin, la pollution issue de l'agriculture, de l'industrie et des rejets domestiques altère significativement la qualité des eaux souterraines et de surface, réduisant leur disponibilité pour les usages humains, agricoles et industriels (Nichane et Khelil, 2014).

Avec ce stress hydrique élevé, maintenir la qualité de l'eau est crucial. La dégradation de la qualité de l'eau à travers le monde a un impact sur des milliards d'individus, mettant en évidence la nécessité d'une gestion durable de cette ressource.

1.1 Problématiques de santé

La qualité de l'eau joue un rôle crucial dans la santé publique. Des maladies hydriques comme la diarrhée, le choléra, la typhoïde et les hépatites peuvent être transmises par une eau polluée,

affectant chaque année des millions d'individus, surtout dans les pays en voie de développement (OMS, 2019). Selon une recherche effectuée par Bouzid *et al.* (2018) dans la région de Tizi Ouzou (Algérie), des bactéries pathogènes comme *Escherichia coli* et *Salmonella* ont été identifiées dans des points d'eau, soulignant ainsi les dangers sanitaires associés à une contamination microbiologique.

L'évaluation de la qualité de l'eau repose sur des indicateurs microbiologiques tels que les coliformes fécaux et les bactéries pathogènes.

Mais également il est aussi nécessaire de surveiller d'autres éléments comme les nitrates, les métaux lourds (plomb, arsenic, mercure) et les substances chimiques industrielles, car ils peuvent causer des impacts à long terme sur la santé humaine tels que des cancers, des dérèglements neurologiques et des affections rénales (UNESCO, 2021).

En Algérie, l'infiltration de nitrates dans les eaux souterraines, causée par une utilisation abusive d'engrais agricoles, constitue un enjeu en augmentation (Kettab *et al.*, 2019).

1.2- Problématiques environnementales

La préservation de la qualité de l'eau est primordiale pour la conservation des écosystèmes aquatiques, qui offrent des services indispensables comme la filtration de l'eau, le contrôle du climat et la diversité biologique. Dans une perspective écologique, la qualité de l'eau a un impact direct sur la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes. L'eutrophisation des environnements aquatiques, un processus qui étouffe les écosystèmes en encourageant la multiplication d'algues et en diminuant l'oxygène accessible pour la faune et la flore est causée par une contamination par des nutriments tels que les phosphates ou les nitrates (Camargo & Alonso, 2006). Dans les régions désertiques, où l'eau est souvent rare, une salinisation excessive due à l'évaporation ou à une irrigation mal contrôlée peut rendre l'eau inadaptée à la vie aquatique et à l'agriculture, contribuant ainsi à la progression de la désertification (Rodier *et al.*, 2009).

En Algérie, la pollution provenant de l'industrie, de l'agriculture et des habitations met en péril, les nappes d'eau souterraines et les milieux humides. La dégradation de ces écosystèmes est exacerbée par l'évacuation d'eaux usées non purifiées, l'utilisation de pesticides et d'engrais chimiques, qui ont un impact négatif sur la faune et la flore aquatiques. Une recherche menée par Saadi *et al.* (2020) dans la zone de Constantine a révélé une pollution des eaux superficielles par des métaux lourds, comme le cadmium et le plomb, associée aux opérations industrielles.

Ces contaminants s'accumulent dans les organismes aquatiques, perturbant l'équilibre des écosystèmes et intégrant la chaîne alimentaire, ce qui a surement des répercussions sur la santé humaine et animale.

À l'échelle mondiale, la contamination de l'eau par les microplastiques, les médicaments et les substances chimiques industrielles est devenue une problématique cruciale, et où les solutions sont toujours à la traîne et sont loin des résultats escomptés.

D'après un rapport de l'ONU (2020), plus de 80 % des eaux résiduaires mondiales sont déversées dans la nature sans un traitement approprié, ce qui contribue à la détérioration des écosystèmes aquatiques. Cette contamination naissante, conjuguée aux tensions traditionnelles telles que l'eutrophisation et la salinisation, met en péril la résistance des écosystèmes aquatiques ainsi que leur faculté à assurer des services indispensables. En effet, ces écosystèmes jouent un rôle essentiel dans la régulation de la qualité de l'eau, la préservation de la biodiversité, la recharge des nappes phréatiques, la maîtrise des crues et de l'érosion, ainsi que dans le soutien aux activités humaines telles que l'agriculture, la pêche ou l'approvisionnement en eau potable. Lorsqu'ils sont dégradés, leur capacité à remplir ces fonctions diminue, compromettant ainsi la résilience environnementale et la sécurité hydrique des populations (MEA, 2005).

1.3- Problématiques socio-économiques

La qualité de l'eau est essentielle pour le développement socio-économique. En Algérie, où l'eau est rare et mal répartie, la mauvaise qualité de l'eau a des répercussions sur l'agriculture, l'industrie et la santé des habitants. Par exemple, la surexploitation des nappes phréatiques dans les zones agricoles du sud de l'Algérie entraîne une salinisation des eaux souterraines qui menace la productivité agricole (Kettab *et al.*, 2019). Par ailleurs, dans les zones industrielles, la pollution de l'eau par des substances chimiques restreint son emploi dans les procédés industriels, ce qui fait grimper les dépenses de traitement.

Sur le plan mondial, la mauvaise qualité de l'eau engendre des milliards de dollars chaque année en dépenses de santé, en diminution de la productivité agricole et en détérioration des écosystèmes. D'après la Banque mondiale (2019), la contamination de l'eau freine la croissance économique dans certains pays de près d'un tiers, mettant en évidence la nécessité de conserver cette ressource pour promouvoir le développement durable.

1.4- L'importance mondiale de la qualité de l'eau

Sur le plan mondial, la qualité de l'eau est un enjeu transversal influençant toutes les dimensions de l'existence humaine et des écosystèmes. D'après l'UNESCO (2021), plus de deux milliards d'individus à travers le monde n'ont pas accès à une eau potable saine, alors que 4,5 milliards d'entre eux ne bénéficient pas de services d'assainissement appropriés. L'eau polluée par les plastiques, les substances chimiques et les micro-organismes représente non seulement un danger pour la santé humaine, mais également pour la biodiversité et les écosystèmes.

Les Objectifs de Développement Durable (ODD) de l'ONU, notamment l'ODD 6, ont pour ambition d'assurer l'accès à l'eau potable et à l'assainissement pour tous d'ici 2030. Afin d'atteindre cet objectif, il est crucial d'améliorer les systèmes de contrôle de la qualité de l'eau, de favoriser des technologies de purification avant-gardistes et d'éveiller les consciences sur les défis liés à la conservation de l'eau.

2. EAUX USSÉES

- **Définition**

Nous définissons les eaux usées comme des eaux modifiées par des éléments minéraux ou biologiques issus des activités humaines, dont une concentration trop importante cause une détérioration de la qualité des milieux aquatiques qui les reçoivent (Ghettas, 2009). Ces composés, englobant des éléments organiques, des nutriments (comme l'azote et le phosphore), des métaux lourds, des micropolluants, des hydrocarbures ou encore des agents pathogènes, découlent directement des activités domestiques, industrielles, agricoles ou urbaines. L'existence de ces contaminants à des niveaux anormaux peut causer d'importants effets écologiques, comme l'eutrophisation des environnements aquatiques, la toxicité pour les êtres vivants ou le déséquilibre des écosystèmes (Chapman, 1996).

Selon leur provenance et les actions humaines qui les produisent, on divise généralement les eaux usées en quatre principales catégories : les eaux domestiques, les eaux provenant de l'industrie, les eaux de pluie et les eaux issues de l'agriculture. Chaque catégorie possède des traits distincts quant à sa composition et à son niveau de pollution, illustrant la variété des origines de la contamination et des mécanismes qui contribuent à leur création.

2.1- Origines des eaux usées

- **Eaux usées domestiques**

Les eaux usées domestiques proviennent des diverses utilisations de l'eau au sein des ménages. Elles représentent une source majeure de pollution physico-chimique et organique, affectant la qualité de l'eau et engendrant des impacts notables sur l'environnement et les écosystèmes aquatiques (Crites & Tchobanoglous, 1998).

Nous distinguons principalement deux types d'eaux : les eaux vannes et les eaux ménagères.

- **Les eaux de vannes**

Elles sont majoritairement composées de matières fécales, d'urine, les résidus de médicaments, et de papier toilette, provenant des eaux usées domestiques (eaux de WC). Ces eaux regorgent de matières organiques, d'azote, de phosphore et de micro-organismes pathogènes (bactéries, virus, etc.) (Tchobanoglous *et al.*, 2014).

- **Les eaux ménagères**

Elles sont issues des activités courantes comme le lavage de la vaisselle, la lessive, la prise de douche et le ménage. Ces eaux renferment des restes de nourriture, des graisses, des agents nettoyants, des solvants et divers produits de nettoyage domestiques (Ladjel, 2006).

Ces liquides domestiques contiennent aussi des micropolluants, comme les phosphates, les tensioactifs qui ont la capacité de subsister dans l'environnement et de déranger les écosystèmes aquatiques (Margot *et al.*, 2013).

- **Les eaux résiduaires industrielles**

Les eaux résiduaires industrielles, provenant des processus de production et de transformation des secteurs industriels, se différencient des eaux usées domestiques en raison de leur composition particulière qui est directement liée au type d'industrie impliquée. Ces rejets sont issus de différentes activités industrielles, comme la production de produits chimiques, l'usinage des métaux, l'industrie agroalimentaire, le secteur textile ou encore les industries pétrolières. À l'inverse des eaux domestiques, dont la pollution est généralement uniforme, les rejets industriels peuvent renfermer une multitude de substances diverses, qui vont des matières organiques, azotées et phosphorées à des éléments bien plus préoccupants tels que les métaux lourds, les solvants, les micropolluants organiques, les hydrocarbures et autres produits chimiques nocifs (Rodier *et al.*, 2005). Ces particularités spécifiques attribuent un potentiel toxique élevé à ces eaux, qui peut grandement fluctuer en fonction des processus industriels et des matériaux employés.

Du fait de leur complexité et du risque qu'elles présentent fréquemment, les eaux usées industrielles requièrent généralement un traitement préalable avant d'être déversées dans les systèmes d'assainissement. Ce processus de préparation, effectué directement dans les infrastructures industrielles, a pour but d'éliminer ou minimiser les substances les plus nuisibles afin d'éviter tout danger de contamination des systèmes de collecte ou d'entrave au fonctionnement des stations d'épuration (Metcalf & Eddy, 2014). Effectivement, ces eaux ne peuvent être combinées avec les eaux domestiques que lorsque leur nuisance pour les infrastructures et les procédures de traitement est minimisée.

Les grandes compagnies, spécifiquement, possèdent souvent des départements internes de traitement pour se conformer à ces normes environnementales et réglementaires.

- **Les eaux de ruissellement**

Les eaux usées de ruissellement englobent les eaux pluviales, les eaux issues du lavage et les eaux provenant du drainage. Ces eaux sont fréquemment contaminées par les substances qu'elles transportent lors de leur parcours sur des surfaces étanches telles que les trottoirs et les routes. Effectivement, on compte parmi ces contaminants les hydrocarbures (huiles, mazouts), les graisses et les sables, sans oublier des métaux lourds tels que le zinc, le plomb et le cuivre (Boutoux, 1983).

L'origine principale de ces matières est l'usure des véhicules, les opérations industrielles et les dépôts atmosphériques (Zgheib *et al.*, 2012). De plus, les eaux de drainage peuvent être issues de la montée d'une nappe phréatique dans le sol. Par rapport aux eaux de ruissellement, celles-ci sont habituellement moins contaminées, puisqu'elles subissent une filtration naturelle à travers les strates du sol (Boutoux, 1983). Toutefois, la qualité de ces derniers peut fluctuer selon le type de sol et les actions humaines à proximité (Marsalek *et al.*, 1999).

- **Eaux usées agricoles**

L'agriculture produit des eaux résiduaires qui contiennent essentiellement des substances azotées, phosphorées, des pesticides et des huiles minérales. Ces composés sont principalement issus du lessivage des sols agricoles fertilisés avec des engrais minéraux abondants en phosphore et en azote. Effectivement, les engrais utilisés sur les plantations peuvent être emportés par les eaux pluviales ou d'irrigation, et se retrouvent donc dans les systèmes de drainage et les rivières (Benslimane, 2001). De plus, les eaux usées issues de l'agriculture peuvent aussi renfermer des traces de pesticides, comme des herbicides et des insecticides, utilisés pour défendre les cultures contre les nuisibles et les plantes indésirables.

Ces substances, malgré leur utilité en agriculture, peuvent contaminer les eaux de surface et souterraines par lessivage ou infiltration (Pimentel *et al.*, 1992).

En outre, les huiles minérales, employées pour l'opération des machines et équipements agricoles, ont également le potentiel de polluer les eaux usées agricoles.

Ces huiles peuvent se diffuser dans le sol ou être transportées par les eaux de ruissellement, ajoutant ainsi à la pollution des eaux agricoles (Novotny, 2003).

2.2- Composition des eaux usées

- **Définition de la pollution**

Nous définissons la pollution de l'eau comme une altération de sa composition physico-chimique ou biologique qui compromet son usage ou perturbe l'harmonie des écosystèmes aquatiques. Cette contamination peut avoir un impact tant sur les eaux de surface (comme les rivières, les lacs et les océans) que sur les eaux souterraines (telles que les nappes phréatiques) (Mekkaoui et Hamdi, 2006).

2.2.1- Paramètres de pollution

2.2.1.1- Paramètres organoleptiques

- **La couleur**

La couleur de l'eau peut être affectée par des éléments naturels ou découler d'incidents de pollution, en particulier par la présence de matières organiques ou inorganiques qui altèrent son aspect. Les acides humiques et fulviques, dérivés de la décomposition de matières organiques comme les feuilles et les végétaux, influencent la coloration naturelle de l'eau, qui prend souvent une teinte jaunâtre à brunâtre (Cuthbert *et al.*, 1993). Toutefois, une décoloration inhabituelle peut découler de rejets provenant de l'industrie, de l'agriculture ou du secteur domestique, qui contiennent des pigments artificiels, des métaux lourds ou d'autres substances polluantes (Chapman, 1996).

- **L'odeur**

L'odeur de l'eau est une caractéristique sensorielle importante qui peut donner des informations sur sa pureté et son état. Par exemple, une eau d'égout neuve émet habituellement une senteur neutre, qui n'est pas spécialement désagréable. Toutefois, quand cette eau se met à fermenter, elle peut émettre des gaz comme le sulfure d'hydrogène (H₂S), l'ammoniac (NH₃) ou divers composés organiques volatils, ce qui lui donne une senteur désagréable et distinctive (Ladjel, 2006). Cela est généralement attribué à l'action des micro-organismes anaérobies, qui dégradent les matériaux organiques contenus dans l'eau, générant de cette manière des substances nauséabondes (Suffet *et al.*, 1999). Ainsi, l'odeur peut fonctionner comme un signal précoce de contamination organique ou de conditions anaérobies dans les systèmes aquatiques. Il est important de noter que l'appréciation des odeurs est une expérience personnelle qui peut différer d'une personne à l'autre. Cependant, cela demeure un indicateur précieux pour juger rapidement la dégradation de la qualité de l'eau, surtout dans les situations liées au traitement des eaux usées ou à la surveillance environnementale (Young *et al.*, 1996).

2.2.1.2- Les paramètres physiques

- **La température**

La croissance des micro-organismes et l'activité enzymatique sont également influencées par la température, ce qui peut avoir un impact majeur sur l'efficacité des procédés biologiques dans les usines de traitement des eaux usées (Chapman, 1996). Effectivement, les micro-organismes qui dégradent la matière organique sont réceptifs aux fluctuations de température, ce qui influence leur métabolisme et leur aptitude à convertir les polluants.

Une température idéale stimule leur activité, alors que des températures extrêmes peuvent entraver ou arrêter ces processus biologiques, affectant par conséquent la performance du traitement (Metcalf & Eddy, 2014). Par ailleurs, la température influence les écosystèmes aquatiques. Par exemple, une élévation de la température peut diminuer la capacité de l'eau à dissoudre l'oxygène, restreignant par conséquent la disponibilité de cet élément vital pour les écosystèmes aquatiques (Brett, 2017). Elle peut aussi perturber les cycles de reproduction et de croissance des espèces, déséquilibrant ainsi l'équilibre écologique.

Ainsi, le suivi et la régulation de la température sont cruciaux pour juger la qualité de l'eau, perfectionner les procédés de purification et prévoir les effets sur l'environnement.

- **La turbidité**

La turbidité est un indicateur qui évalue le degré de trouble de l'eau, découlant de la diminution de sa clarté en raison de la présence de particules non dissoutes. Celle-ci est principalement due à la présence de solides en suspension (MES), en particulier des particules fines, dans les environnements aquatiques. On mesure généralement la turbidité avec un turbidimètre, et on l'exprime en unités NTU (Nephelometric Turbidity Unit) (Hadji *et al.*, 2010). Pour mieux comprendre cette définition, il est essentiel de souligner que la turbidité est un critère crucial dans la détermination de la qualité de l'eau, du fait qu'elle a un impact direct sur la transmission lumineuse et, par extension, sur les processus biologiques et écologiques au sein des écosystèmes aquatiques (Davies-Colley et Smith, 2001). Par ailleurs, des recherches actuelles ont indiqué que des taux élevés de turbidité peuvent nuire à la santé des êtres aquatiques en diminuant la disponibilité de l'oxygène dissous et en rehaussant la concentration de polluants adsorbés sur les particules suspendues (Bilotta et Brazier, 2008).

- **Les matières en suspension (MES)**

Les matières en suspension (MES) caractérisent la portion de polluants, tant organiques que minéraux, qui ne se dissout pas dans l'eau (Gomella et Guerree, 1978). Ces particules solides en suspension peuvent avoir pour origine l'érosion des sols, les déversements industriels, agricoles ou domestiques, ou encore des processus naturels comme la décomposition de la matière organique. Les systèmes d'exploitation miniers ont des répercussions majeures sur les écosystèmes aquatiques. Ces dernières sont à l'origine de phénomènes d'ensablement pouvant nuire aux habitats aquatiques, tout en diminuant la transparence de l'eau.

La réduction de la lumière accessible a un impact direct sur l'activité photosynthétique des plantes aquatiques et du phytoplancton, ce qui conduit à une diminution de la productivité primaire et, par extension, à une altération de la chaîne alimentaire aquatique (Chapman, 1996).

- **Les matières minérales sèches (MMS)**

Les MMS désignent des substances organiques dépourvues d'eau libre (< 5% d'humidité), telles que les sables, les argiles ou les minerais métallifères. Leur composition chimique (silicates carbonés oxydes) et leur structure cristalline déterminent leurs propriétés mécaniques et leur réactivités (Hazen, 2013). Elles représentent la différence entre les matières en suspension (MES) et les matières volatiles en suspension (MVS) et correspondent à la présence de sel, et de silice (Gaid, 1984).

- **Les matières décantables et non décantables**

Les matières décantables et non décantables jouent un rôle central dans la gestion des effluents et la pollution aquatique. Les matières décantables comme les sédiments grossiers, se séparent naturellement par gravité selon la loi de Stokes, qui décrit la vitesse de sédimentation en fonction de la taille des particules, de leur densité et de la viscosité (Stokes, 1851). En revanche, les matières non décantables, telles que les colloïdes argileux ou les microplastiques, persistent en suspension en raison de leur taille réduite ($<1 \mu\text{m}$) et de leur charge électrostatique stabilisante, comme l'explique la théorie DLVO (Trefalt & Borkovec, 2014 ; Hernández, 2023). On distingue les fractions qui décantent en un temps donné (2 heures) suivant les conditions opératoires, et les matières non décantables qui restent dans l'eau et qui vont donc être dirigées vers les procédés biologiques (Gaid, 1984).

2.2.1.3- Les paramètres chimiques

- **Le potentiel hydrogène (pH)**

Le pH, indicateur de l'acidité ou de l'alcalinité d'un milieu (échelle 0-14), joue un rôle central dans la gestion des eaux usées, tant lors des phases de traitement qu'au moment du rejet dans l'environnement. Optimal entre 6.5 et 8.5, il conditionne l'efficacité des processus biologiques : les microorganismes responsables de la dégradation des polluants organiques (boues actives, bactéries nitrifiantes) voient leur activité métabolique réduite en dehors de cette plage, risquant de compromettre l'épuration (Metcalf et Eddy, 2014). Il est important pour la vie et le développement de la faune et de la flore existante dans les cours d'eau.

Cependant, sa valeur peut être à l'origine des ennuis dans les canalisations (corrosion et dépôts calcaires) (Belkhiri, 1999).

- **La demande biochimique en oxygène (DBO₅)**

L'analyse de la demande biochimique en oxygène devrait nous aider à évaluer la quantité de substances putrescibles présentes dans le milieu considéré, sa capacité d'auto-épuration et à déterminer la charge maximale admissible, principalement lors des traitements primaires dans les stations d'épuration (Rodier, 2005).

D'après Rejsek (2002), la DBO₅ d'un échantillon est le volume d'oxygène utilisé par les microorganismes aérobies de cet échantillon pour effectuer l'oxydation biochimique des substances organiques et/ou inorganiques sur une période de 5 jours.

- **La demande chimique en oxygène (DCO)**

La demande chimique en oxygène représente la quantité d'oxygène utilisée par les substances présentes dans l'eau ou selon des conditions d'exploitation spécifiques. En réalité, cette mesure est une évaluation des substances chimiquement oxydables dans l'eau, indépendamment de leur source organique ou minérale. Elle représente la quantité d'oxygène requise pour leur décomposition (RODIER, 1996).

- **L'azote**

Dans les eaux usées, l'azote se présente principalement sous les formes de NH_4^+ (ammonium), de NO_2^- (nitrite) et de NO_3^- (nitrate). Ces substances provenant des déchets agricoles, domestiques et industriels, peuvent engendrer des soucis environnementaux en particulier l'eutrophisation des milieux aquatiques. Afin de réduire ces effets les stations d'épuration appliquent des techniques biologiques telles que la nitrification, qui convertit l'ammonium en nitrates, puis la dénitrification, où les nitrates se transforment en azote gazeux (N_2), une forme neutre pour l'environnement (Metcalf et Eddy, Inc., 2014).

Ces opérations sont indispensables pour maintenir la pureté des eaux et minimiser les dangers environnementaux associés à la pollution par l'azote.

- **Les nitrites (NO_2^-)**

Les nitrites (NO_2^-) dans les eaux usées sont souvent produits lors du processus de nitrification, où l'ammonium (NH_4^+) est transformé en nitrates (NO_3^-). Ils sont préoccupants en raison de leur toxicité pour les organismes aquatiques et leur capacité à contribuer à la formation de composés nocifs, comme les nitrosamines, potentiellement cancérigènes. Dans le processus de traitement des eaux usées, la leur gestion est cruciale pour éviter leur accumulation.

Cela se passe par un contrôle rigoureux des conditions opérationnels, notamment l'oxygénation et le temps de rétention, afin d'assurer leur conversion complète en nitrates puis en azote gazeux (N_2) lors de la dénitrification (Metcalf et Eddy, Inc., 2014).

Leur élimination efficace contribue ainsi à la protection des écosystèmes aquatiques et à la réduction des risques sanitaires.

- **Les nitrates (NO_3^-)**

Les nitrates représentent la dernière phase de l'oxydation de l'azote organique dans l'eau. Les nitrobactères effectuent la conversion des nitrites en nitrates.

Les nitrates eux-mêmes ne sont pas nocifs ; cependant, leur concentration élevée favorise une croissance excessive des algues qui contribue à l'eutrophisation de l'environnement.

Selon Rodier *et al.* (2009), le risque qu'ils présentent reste toutefois lié à leur transformation en nitrates.

- **Le phosphore**

On peut aussi rencontrer le phosphore sous sa forme minérale (provenant de détergents ou de déchets industriels) ou organique. Le phosphore, élément essentiel à la survie des algues, peut provoquer une eutrophisation du cours d'eau ou du lac. Cela signifie que l'eau pourrait être soumise à une prolifération incontrôlée de la population algale (Martin, 1979).

- **L'oxygène dissous**

L'oxygène dissous est un élément crucial de l'eau car il soutient la vie animale et détermine les réactions biologiques qui se déroulent dans les écosystèmes d'eau. La capacité de l'oxygène à se dissoudre dans l'eau est influencée par plusieurs éléments, comme la température, la pression et la force ionique de l'environnement. La teneur en oxygène dissous est indiquée en mg O₂/L (Rejsek, 2002).

- **La conductivité électrique**

L'évaluation de la conductivité électrique, un paramètre non spécifique, est sans doute l'une des plus élémentaires et cruciales pour la surveillance de la qualité des eaux résiduaires (Thomas, 1995). Elle offre la possibilité d'estimer, de manière approximative, le niveau global de minéralisation de l'eau.

Tableau 1: Illustration de la corrélation entre la conductivité et la minéralisation (Gaid, 1984).

| Conductivité (us/cm) | Appréciation |
|--------------------------------------|----------------------------------|
| Conductivité < 100us/cm | Minéralisation très faible |
| 100 us/cm < conductivité < 200 us/cm | Minéralisation faible |
| 200 us/cm < conductivité < 333 us/cm | Minéralisation moyenne accentuée |
| 333 us/cm < conductivité < 600 us/cm | Minéralisation moyenne |
| 666 us/cm <conductivité < 1000 us/cm | Minéralisation importante |
| Conductivité > 1000 us/cm. | Minéralisation excessive |

2.2.1.4- Les paramètres microbiologiques

Les eaux usées contiennent tous les microorganismes excrétés avec les matières fécales.

Cette flore entérique normale est accompagnée d'organismes pathogènes.

L'ensemble de ces organismes se répartissent en 4 groupes : les virus, les bactéries, les protozoaires et les helminthes. Ils proviennent de l'environnement et des matières fécales (ATTAB, 2011).

- **Les bactéries**

Les bactéries sont des entités unicellulaires élémentaires comme *Escherichia coli* (Figure 1) et dépourvues de noyau. Ils mesurent entre 0,1 et 10 μm . Les eaux usées en milieu urbain renferment approximativement 10^7 à 10^8 bactéries par litre, parmi lesquelles figurent 10^6 entérocoques et entérobactéries, 10^4 à 10^5 streptocoques fécaux et 10^3 à 10^4 Clostridium. Ces entités ne représentent généralement pas une menace pour la santé, et la présence de bactéries pathogènes peut s'élever à environ $10^4/\text{L}$.



Figure 1: *Escherichia coli* observées au microscope électronique

(Source : www.niaid.nih.gov)

Néanmoins, dans un hôte contaminé, la quantité de bactéries nuisibles peut être considérable. Les bactéries entériques se sont adaptées à vivre dans l'intestin, où elles rencontrent une abondance de matière carbonée et de nutriments, ainsi qu'une température plutôt élevée (37°C). Ainsi, leur durée de vie dans l'environnement extérieur, où les conditions diffèrent complètement, est restreinte. De plus, les bactéries pathogènes se verront en concurrence avec les bactéries indigènes provenant de l'environnement, ce qui freine leur croissance.

La principale méthode de contamination est l'ingestion (Boutin *et al.*, 2009). Les bactéries pathogènes liées à l'eau causent la mort de 3 à 10 millions d'individus chaque année à l'échelle mondiale, et même les pays développés ne sont pas exempts.

Tableau 2 : Principales bactéries pathogènes présentes dans les eaux usées.

| Agent pathogène | Symptômes, maladie | Mode(s) de contamination |
|--|--|-------------------------------|
| <i>Salmonella</i> (Différent serotypes ⁴) | Salmonellose | Ingestion |
| <i>Yersinia enterocolitica</i> | Gastro-entérite | Ingestion |
| <i>Leptospira spp</i> | Leptospirose | Cutanée /Ingestion/Inhalation |
| <i>Legionella</i> | Légionellose | Inhalation |
| <i>Campylobacter jejuni</i> | Gastro-entérite | Ingestion |
| <i>Listeria monocytogènes</i> | Listériose | Ingestion |
| <i>Escherichia coli</i> (Certains sérotypes dont O157 :H7) ⁵ | Syndrome Hémolytique et Urémique ⁶ (SHU) | Ingestion |
| <i>Shigella</i> ⁷ | Dysenterie bacillaire | Ingestion |
| <i>Salmonella typhi</i> ⁷ | Fièvre typhoïde | Ingestion |
| <i>Vibrio cholerae</i> ⁷ | Choléra | Ingestion |
| <i>Mycobacterium</i> ⁷ | Tuberculose | Inhalation |

Source : adapté de l'US-EPA (1992) ; Asano (1998) et www.hc-sc.gc.ca cité dans Baumont (2004)

- **Les virus**

Les virus (figure 2) sont des parasites intracellulaires de très petite taille (10 à 350 nm) qui ne peuvent se multiplier que dans une cellule hôte.

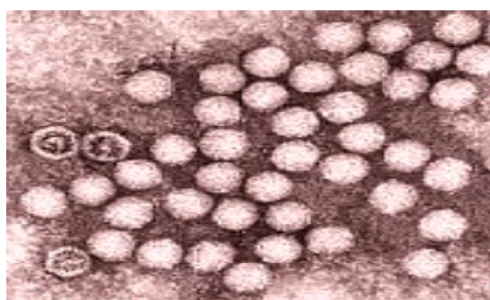


Figure 2: *Entérovirus* observés au microscope électronique

(Source : www.worsleyschool.net)

Leur concentration dans les eaux usées urbaines est comprise entre 10^3 et 10^4 particules par litre. Leur isolement et leur dénombrement dans les eaux usées sont difficiles, ce qui conduit vraisemblablement à une sous-estimation de leur nombre réel (Boutin et al., 2009).

Ils ne sont constitués que d'une molécule d'ADN, entourée d'une capsid (coque protéique). Ne possédant ni noyau, ni capacité de synthèse, ce sont des parasites obligatoires d'une cellule vivante dont ils détournent (Vandermeersch, 2005-2006).

Il semble que les virus soient plus résistants dans l'environnement que les bactéries et que leurs faibles dimensions soient à l'origine de leurs possibilités de dissémination (Noble & Fuhrman, 1997). Le tableau 3 regroupe les principaux virus pathogènes potentiellement présents dans les eaux usées.

Tableau 3: Principaux virus présents dans les eaux usées.

| Agent pathogène | Symptômes, maladie | Mode(s) de contamination |
|------------------------------|---|---------------------------------|
| <i>Virus de l'hépatite A</i> | Hépatite A | Ingestion |
| <i>Virus de l'hépatite E</i> | Hépatite E | Ingestion |
| <i>Parvovirus</i> | Vomissement, diarrhée | Ingestion |
| <i>Reovirus</i> | Affection respiratoire bénigne et diarrhée | Ingestion |
| <i>Rotavirus</i> | Vomissement, diarrhée | Ingestion |
| <i>Calicivirus</i> | Vomissement, diarrhée | Ingestion |
| <i>Coronavirus</i> | Vomissement, diarrhée | Ingestion/Inhalation |
| <i>Astrovirus</i> | Vomissement, diarrhée | Ingestion |
| <i>Virus de Norwalk</i> | Vomissement, diarrhée | Ingestion |
| <i>Coxsackie</i> | Méningite, maladie respiratoire | Ingestion |
| <i>Echovirus</i> | Méningite, diarrhée | Ingestion |
| <i>Adenovirus</i> | Maladie respiratoire, conjonctivite, diarrhée | Ingestion |

Source : adapté de l'US-EPA (1992) ; Asano (1998) et www.hc-sc.gc.ca cité dans Baumont (2004)

- **Les helminthes**

Les helminthes (figure 3 et tableau 3) sont des vers multicellulaires fréquemment rencontrés dans les eaux résiduaires. Tout comme les protozoaires, ce sont majoritairement des organismes parasites.



Figure 3 : *Helminthe* observé au microscope électronique

(Source : www.cnrs.fr)

Dans les eaux usées urbaines, le nombre d'œufs d'helminthes peut être évalué entre 10 et 10³/L (Capizzi & Schwartzbrod, 1998). Beaucoup d'helminthes ont des cycles de vie complexes comprenant un passage obligé par un hôte intermédiaire. Le stade infectieux de certains helminthes est l'organisme adulte ou larve, alors que pour d'autres, ce sont les œufs.

Les œufs et les larves sont résistants dans l'environnement, ils peuvent survivre plusieurs semaines voire plusieurs mois sur les sols et les plantes cultivées (Baumont *et al.*, 2004). Le risque lié à leur présence est à considérer pour le traitement et la réutilisation des eaux résiduaires.

Tableau 4: Principaux helminthes présents dans les eaux usées.

| Agent pathogène | Symptômes, maladie | Mode(s) de contamination |
|----------------------------------|------------------------------------|--------------------------|
| <i>Ascaris lumbricoides</i> | Ascariadiase | Ingestion |
| <i>Ancylostoma duodenale</i> | Ancylostomiase | Ingestion/Cutanée |
| <i>Ancylostoma spp.</i> | Anémie | Ingestion/Cutanée |
| <i>Necator americanus</i> | Necatoriase | Cutanée |
| <i>Strongyloides stercoralis</i> | Strongyloïdase | Cutanée |
| <i>Trichuris trichuria</i> | Trichuriase | Ingestion |
| <i>Taenia spp.</i> | Diarrhée, douleurs musculaires | Ingestion |
| <i>Enterobius vermicularis</i> | Enterobiase | Ingestion |
| <i>Hymenolepis</i> | Nervosité, troubles digestifs, ... | Ingestion |
| <i>Toxocara</i> | Fièvre, douleur abdominale | Ingestion |
| <i>Echinococcus granulosus</i> | Hydatidose | Ingestion |

Source : adapté de l'US-EPA (1992) ; Asano (1998) et www.hc-sc.gc.ca cité dans Baumont (2004)

- **Les protozoaires**

Les protozoaires sont des organismes unicellulaires eucaryotes, plus complexes et plus gros que les bactéries. Leur taille varie de quelques microns à quelques millimètres, mais la plupart des espèces ne dépassent pas quelques centaines de microns.

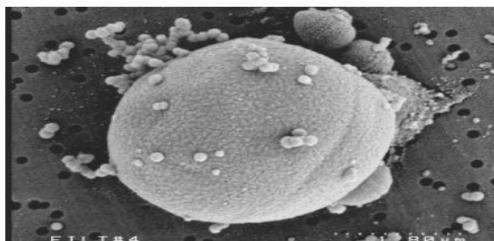


Figure 4 : *Cryptosporidium parvum* observé au microscope électronique

(Source : www.esemag.com)

La plupart des protozoaires pathogènes sont des organismes parasites et se développent aux dépens de leur hôte. Ils sont souvent rencontrés dans les eaux où ils se nourrissent de matière organique ou de bactéries (Vandermeersch, 2005-2006). Certains protozoaires adoptent au cours de leur cycle de vie une forme de résistance, appelée kyste (en particulier, *oocyste* pour *Cryptosporidium* et *kyste* pour *Giardia*) cette forme peut résister généralement aux procédés de traitements des eaux usées (Boutin *et al.*, 2009). Parmi les protozoaires les plus « connus » (tableau 4), on peut citer *Entamoeba histolytica*, responsable de la dysenterie amibienne ou encore *Cryptosporidium parvum* (figure 4).

Tableau 5: Principaux protozoaires présents dans les eaux usées.

| Agent pathogène | Symptômes, maladie | Mode(s) de contamination |
|-------------------------------|---|--------------------------|
| <i>Entamoeba histolytica</i> | Dysenterie amibienne | Ingestion |
| <i>Giardia lamblia</i> | Giardiase | Ingestion |
| <i>Balantidium coli</i> | Dysenterie balantidienne | Ingestion |
| <i>Cryptosporidium parvum</i> | Diarrhée, fièvre | Ingestion |
| <i>Toxoplasma gondii</i> | Toxoplasmose | Ingestion / Inhalation |
| <i>Cyclospora</i> | Diarrhée, légère fièvre | Ingestion |
| <i>Microsporidium</i> | Diarrhée | Ingestion |
| <i>Naegleria</i> | Méningite | Inhalation |
| <i>Enterocytozoon spp.</i> | Diarrhée chronique, problèmes rénaux, musculaires, pulmonaires et oculaires | Ingestion |

Source : adapté de l'US-EPA (1992) ; Asano (1998) et www.hc-sc.gc.ca cité dans Baumont (2004)

2.3- Impacts des eaux usées sur l'environnement, la santé humaine et l'économie

Le rejet direct des eaux usées domestiques et des eaux résiduaires industrielles dans le milieu naturel perturbent l'équilibre aquatique de surface et souterrain, et la pollution de l'environnement engendrée, menace la biodiversité de notre environnement, parfois d'une manière irréversible (Sahnoun, 2010). Par ailleurs toutes formes de pollution entraînent une forte dégradation des milieux aquatiques récepteurs aux conséquences diverses à savoir : sanitaires, écologiques et économiques (Kegne, 2008 ; Mbog, 2013).

- **Conséquence d'ordre sanitaire**

Outre les impacts environnementaux (eutrophisation, dispersion des odeurs nauséabondes) induits par le déversement illégal des eaux usées dans l'environnement, on observe des répercussions sanitaires ayant des conséquences tragiques notamment dans les pays en développement qui ne disposent pas de systèmes appropriés pour le traitement des déchets ou des eaux usées polluées.

Toutefois, l'emploi d'eaux usées non traitées a démontré être une source potentielle de contaminations microbiologiques et chimiques dans les nappes phréatiques et les eaux de surface (Howard *et al.* 2003 ; Taylor, 2004). L'usage des eaux de la nappe polluée par les eaux résiduaires entraîne l'apparition de maladies liées à l'eau. Selon (Gaye et Niang, 2002), les épidémies de typhoïde, de paratyphoïde et de choléra survenues à Dakar, au Sénégal, sont dues aux eaux usées. De même, des recherches récentes menées à Kampala en Ouganda ont démontré le lien entre l'épidémie de choléra de 1997-1998 et la pollution des puits (Howard *et al.*, 2003). L'exposition peut se produire par contact lors des baignades, en consommant des aliments aquatiques comme les poissons ou encore les légumes irrigués avec de l'eau contaminée durant leur culture.

Au-delà des germes indésirables, les eaux usées, selon leur source d'origine, peuvent receler des éléments toxiques susceptibles de provoquer de sérieux problèmes de santé chez l'individu.

- **Conséquence d'ordre écologique**

L'évacuation des eaux usées non traitées dans l'environnement peut provoquer d'importants changements dans l'écosystème qui les accueille (Agendia *et al.*, 2000).

On peut mentionner notamment :

- la réduction de la biodiversité aquatique due à la toxicité environnementale et l'émergence de nouvelles espèces ;
- l'eutrophisation des environnements aquatiques qui reçoivent les eaux ;

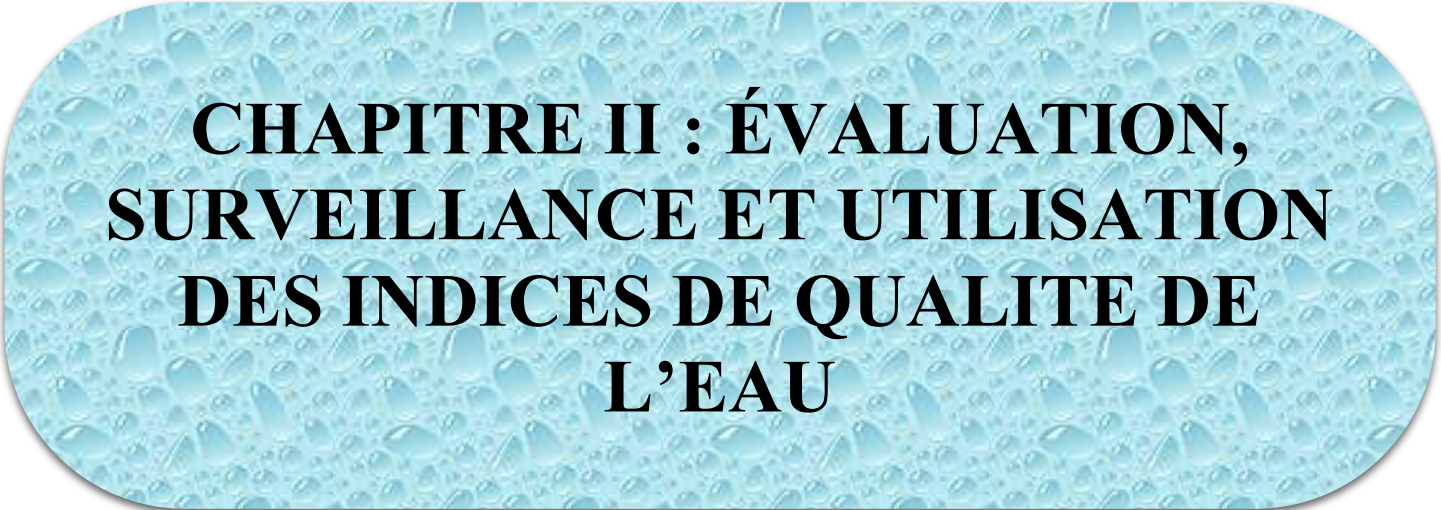
- la détérioration de l'aspect esthétique du lieu en raison de l'expansion des mauvaises senteurs.

De plus, les eaux usées renferment fréquemment des contaminants chimiques comme les métaux lourds, les pesticides et les médicaments, qui tendent à s'accumuler dans les tissus des êtres vivants. Cette accumulation biologique peut déranger les réseaux alimentaires, touchant non seulement les espèces marines, mais également les prédateurs terrestres qui se nourrissent de celles-ci (Schwarzenbach *et al.*, 2006).

- **Conséquence d'ordre économique**

Les eaux usées ont des implications économiques significatives, aussi bien en termes de dépenses que de possibilités. Une mauvaise gestion ou un rejet non résolu entraîne des coûts significatifs pour les entreprises, notamment à cause de l'impact sur la santé publique, de la détérioration des écosystèmes et de l'épuisement des ressources naturelles.

Par exemple, la pollution des sources d'eau potable par des substances chimiques ou biologiques impose des traitements onéreux pour assurer la potabilité de l'eau, ce qui alourdit les dépenses financières pour les municipalités et les foyers (Hutton *et al.*, 2007). Par ailleurs, les affections associées à l'eau polluée, génèrent des dépenses médicales considérables et une diminution de la productivité due à l'absentéisme professionnel. L'eutrophisation et la toxicité des étangs destinés à la pisciculture entraînent d'énormes pertes pour les promoteurs des projets dans ce domaine.



**CHAPITRE II : ÉVALUATION,
SURVEILLANCE ET UTILISATION
DES INDICES DE QUALITE DE
L'EAU**

CHAPITRE II : ÉVALUATION, SURVEILLANCE ET UTILISATION DES INDICES DE QUALITE DE L'EAU

1. ÉVALUATION ET SURVEILLANCE DE LA QUALITÉ DE L'EAU

Le contrôle et la surveillance de la qualité de l'eau sont des processus fondamentaux pour assurer la santé publique, sauvegarder les écosystèmes aquatiques et garantir une exploitation pérenne des ressources en eau. Ces procédures s'appuient sur des méthodes scientifiques précises et des outils technologiques avancés, facilitant l'appréciation des propriétés physico-chimiques, microbiologiques et biologiques de l'eau (Chapman, 1996). Au niveau mondial, la détérioration de la qualité de l'eau causée par la pollution industrielle, agricole et domestique constitue un enjeu crucial qui exige des systèmes de suivi efficaces (UNEP, 2016). En Algérie, à l'instar de nombreux pays en voie de développement, ces problématiques sont intensifiées par un climat aride, une augmentation démographique constante et une gestion parfois défailante des ressources hydriques (Negm *et al.*, 2020 ; Neama *et al.*, 2020). L'évaluation des ressources en eau de surface et souterraines montre l'impact du climat et les défis liés à leur gestion (Negm *et al.*, 2020).

Il est essentiel d'instaurer des systèmes de contrôle solides pour faire face aux enjeux particuliers du pays, y compris la contamination des rivières et des eaux souterraines, ainsi que le manque de ressources en eau. D'après le Ministère algérien des Ressources en Eau (2020), presque 60 % de l'eau du pays est vulnérable à la pollution, mettant en évidence le besoin pressant d'implémenter des actions préventives et correctives. De plus, des recherches récentes telles que l'étude de Bekkouche *et al.* (2017) concernant la qualité de l'eau de l'Oued El Harrach indique que les taux de pollution excèdent fréquemment les standards internationaux, ce qui compromet la santé publique et menace les écosystèmes environnants.

1.1- Paramètres de la qualité de l'eau

L'évaluation de la qualité de l'eau s'effectue via diverses catégories de paramètres, chacun étant crucial pour appréhender l'état de cette ressource :

- **Paramètres physico-chimiques**

On retrouve parmi ces paramètres le pH, la turbidité, la conductivité, la température, le taux d'oxygène dissous, et également les concentrations de nitrates, de phosphates, de métaux lourds (plomb, cadmium, arsenic) ainsi que les substances chimiques industrielles.

Par exemple, une recherche réalisée par Saadi *et al.* (2020) dans la région de Constantine a mis en évidence des niveaux importants de métaux lourds dans les eaux superficielles, associés aux déversements industriels. Ces composés peuvent engendrer des conséquences nuisibles pour la santé humaine et les écosystèmes.

Par ailleurs, les nitrates et phosphates, généralement dérivés des fertilisants agricoles, participent à l'eutrophisation des plans d'eau, un processus qui nuit considérablement à la biodiversité aquatique (Smith *et al.*, 2018).

- **Paramètres microbiologiques**

La détection de germes pathogènes comme *Escherichia coli*, *Salmonella* et *Vibrio cholerae* est un indicateur essentiel de la pollution fécale de l'eau. En Algérie, des recherches telles que celle de Bouzid *et al.* (2018) ont révélé que les eaux de surface dans certaines localités, notamment Tizi Ouzou, affichent une forte contamination microbiologique, rendant indispensable un contrôle renforcé. D'après l'Organisation mondiale de la santé OMS (2019), des millions de cas de maladies hydriques sont attribuables à la pollution microbiologique de l'eau chaque année, notamment dans les pays en voie de développement.

- **Paramètres biologiques**

L'examen des communautés aquatiques, comme les macro-invertébrés, les algues et les poissons, donne la possibilité d'apprécier la condition écologique des écosystèmes aquatiques. Selon l'UNESCO (2021), ces bioindicateurs sont particulièrement précieux pour identifier les impacts cumulés de la pollution sur une longue durée.

Par exemple, certaines espèces de macro-invertébrés, telles que les larves d'éphémères, signalent une bonne qualité de l'eau, alors que la prédominance des vers oligochètes témoigne d'une pollution organique (Rosenberg et Resh, 1993).

1.2- Méthodes d'évaluation de la qualité de l'eau

L'appréciation de la qualité de l'eau se fonde sur des procédés de laboratoire et des méthodes environnementales, chacune présentant ses propres atouts et contraintes :

- **Analyses effectuées en laboratoire**

Des prélèvements d'eau sont effectués sur site et soumis à une analyse en laboratoire afin d'évaluer les niveaux de contaminants chimiques et microbiologiques.

On recourt à des méthodes sophistiquées, comme la chromatographie en phase gazeuse et la spectrométrie de masse, afin de repérer des impuretés à des niveaux de concentration extrêmement faibles (OMS, 2019).

Par exemple, une recherche réalisée par Zhang *et al.* (2021) a fait appel à la chromatographie liquide associée à la spectrométrie de masse pour identifier des traces de médicaments dans les eaux résiduaires.

- **Équipements et techniques de terrain**

Les capteurs électroniques offrent la possibilité d'évaluer en direct des indicateurs tels que le pH, la conductivité et la turbidité. On utilise de plus en plus ces dispositifs pour le suivi constant des cours d'eau et des nappes phréatiques. Par exemple, les capteurs multi-paramètres, tels que ceux élaborés par YSI (2020), facilitent une observation automatisée et instantanée de la qualité de l'eau.

1.3- Suivi de la qualité de l'eau

Surveiller la qualité de l'eau est un processus complexe qui requiert d'importantes ressources humaines, techniques et financières. En Algérie, la mise en œuvre de systèmes de surveillance performants est entravée par plusieurs obstacles :

- **Absence de données crédibles**

Dans plusieurs zones, les informations relatives à la qualité de l'eau sont éparpillées ou absentes, entravant ainsi la possibilité de faire des choix judicieux (Saadi *et al.*, 2020).

D'après un document publié par la Banque mondiale en 2019, l'absence de données constitue un frein majeur à une gestion durable des ressources hydriques dans les pays en voie de développement.

- **Manque d'infrastructures**

Les équipements d'analyse et de surveillance sont fréquemment obsolètes ou inadéquats, surtout dans les régions rurales. Pour illustrer, une recherche réalisée par Haddouche *et al.* (2021) a mis en évidence l'insuffisance de laboratoires adaptés pour examiner les micropolluants émergents comme les traces de médicaments et les microplastiques.

- **Pollution diffuse**

Il est ardu de maîtriser la pollution de l'eau causée par les pratiques agricoles (pesticides, engrais) et les déchets domestiques non traités en raison de sa nature dispersée. D'après l'OCDE (2020), la pollution diffuse figure parmi les causes majeures de la détérioration de la qualité de l'eau à travers le monde.

La surveillance de la qualité de l'eau à travers le monde fait face à d'importants défis, comme la pollution émergente (microplastiques, médicaments) et les conséquences des changements climatiques sur les ressources hydriques (UNESCO, 2021).

1.4- Stratégies pour optimiser le contrôle de la qualité de l'eau

Pour améliorer la surveillance de la qualité de l'eau, diverses approches peuvent être appliquées :

- **Amélioration des compétences techniques**

Investir dans des laboratoires à la pointe de la technologie, des capteurs de terrain et des systèmes de monitoring en direct. Par exemple, l'emploi de capteurs IoT (Internet des Objets) offre une surveillance constante et à distance de la qualité de l'eau (Garcia *et al.*, 2020).

- **Coopération à l'échelle mondiale**

Diffuser les informations et les meilleures méthodes entre les nations, en particulier dans le cadre des bassins transfrontaliers. Par exemple, le programme GEMS/Water des Nations Unies favorise la collecte et la diffusion de données relatives à la qualité de l'eau à l'échelle internationale (UNEP, 2021).

- **Éducation et formation**

Éduquer les intervenants locaux et sensibiliser la communauté à la nécessité de maintenir une qualité d'eau optimale. Par exemple, des initiatives éducatives, telles que celles déployées par l'UNESCO, ont pour objectif de consolider les aptitudes des communautés locales dans le domaine de la gestion de l'eau (UNESCO, 2021).

2. INDICE DE QUALITE DE L'EAU

2.1- Historique

L'historique des indices de qualité de l'eau est foisonnant et témoigne des préoccupations environnementales, sanitaires et scientifiques changeantes au cours des décennies. Ces indicateurs ont été élaborés pour juger de la condition des écosystèmes aquatiques, quantifier l'effet des actions humaines et assurer la conformité aux standards de qualité. Leur évolution a été caractérisée par l'incorporation de paramètres de plus en plus diversifiés et sophistiqués, afin de répondre aux enjeux liés à la pollution et à la gestion des ressources hydriques.

- **Les premières démarches visant à évaluer la qualité de l'eau**

L'examen de la qualité de l'eau est une pratique qui remonte à très longtemps, lorsque des sociétés telles que les Romains ou les Égyptiens employaient des techniques empiriques pour déterminer si l'eau était potable, en s'appuyant sur des paramètres sensoriels comme l'odeur, la couleur ou le goût. Toutefois, ce n'est qu'au cours du XIXe siècle, grâce aux recherches de scientifiques tels que Louis Pasteur, que nous avons commencé à saisir le rôle des micro-organismes dans la propagation des maladies associées à l'eau. Ces découvertes ont posé les fondations des premières normes de santé publique pour l'eau potable (Pasteur, 1864).

- **L'apparition des indices physico-chimiques**

L'industrialisation et l'urbanisation croissantes au début du XXe siècle ont intensifié la pression sur les ressources hydriques, conduisant à une détérioration de leur qualité. Les premiers indicateurs de qualité de l'eau ont été conçus pour contrôler des paramètres physico-chimiques comme la température, le pH, la turbidité et la teneur en oxygène dissous. Horton a proposé l'un des premiers systèmes intégrés en 1965, qui a fusionné plusieurs paramètres en un indice unique pour juger la qualité des cours d'eau (Horton, 1965).

- **L'incorporation des paramètres biologiques**

Au cours des années 1970, les indices de qualité de l'eau ont été révisés pour intégrer des critères biologiques, témoignant d'une compréhension accrue des écosystèmes aquatiques.

Par exemple, les macro-invertébrés benthiques sont souvent employés comme bioindicateurs du fait de leur sensibilité aux changements environnementaux. Une illustration notable de cette méthode est l'indice biotique de Hilsenhoff (1987), qui détermine la qualité de l'eau selon la présence et le nombre d'organismes indicateurs (Hilsenhoff, 1987).

- **L'élaboration des indices globaux**

Depuis les années 1980, les indices composites ont connu une popularité croissante, offrant la possibilité d'inclure des facteurs physico-chimiques, biologiques et occasionnellement socio-économiques. Le World Quality Index (WQI), élaboré par la National Sanitation Foundation (NSF) aux États-Unis, s'est imposé comme une norme internationale. Cet indice compile des facteurs comme la demande biochimique en oxygène (DBO), les nitrates, les phosphores et les particules en suspension pour produire un score unique, ce qui simplifie la présentation des résultats au grand public et aux décideurs (Brown *et al.*, 1970).

- **Les progrès récents et les défis contemporains**

Actuellement, les indices de qualité de l'eau continuent de se développer pour faire face à des problématiques naissantes, comme la contamination par les micropolluants, les perturbateurs endocriniens et les microplastiques. Les outils de modélisation, les systèmes d'information géographique (SIG) et les méthodes basées sur l'intelligence artificielle sont de plus en plus utilisés dans les techniques d'évaluation pour augmenter la précision et la pertinence des résultats (Li *et al.*, 2019). Toutefois, ces progrès posent aussi des difficultés, notamment sur le plan de l'harmonisation des méthodes, de l'accès aux données et de la considération des particularités locales.

2.2- Méthodes classiques des indices de qualité de l'eau

Les approches traditionnelles pour évaluer la qualité de l'eau se basent sur des indices qui résument des informations issues de divers paramètres physico-chimiques, biologiques, ou une fusion des deux. Ces indicateurs visent à rendre l'interprétation des résultats plus aisée, en fournissant une évaluation ou un classement de la qualité de l'eau, ce qui facilite ainsi la prise de décisions relatives à la gestion des ressources en eau.

Ces méthodes peuvent être classées en trois groupes principaux : les indices physico-chimiques, les indices biologiques et les indices globaux.

- **Indices fondés sur des paramètres physico-chimiques**

Pour juger de la qualité de l'eau, les experts ont principalement recours aux indices physico-chimiques. Ces derniers s'appuient sur l'évaluation de divers paramètres comme le pH, la turbidité, la conductivité, les particules en suspension, les nutriments (nitrates, phosphates) et les métaux lourds. Ces paramètres sont comparés à des normes ou des seuils préétablis afin d'évaluer la qualité de l'eau.

Un cas marquant est l'indice de qualité de l'eau canadien (CCME WQI), élaboré par le Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME). Cet indice juge la qualité de l'eau en confrontant les concentrations relevées de divers paramètres à des normes de qualité établies. L'évaluation prend en compte trois éléments cruciaux : l'importance des écarts par rapport aux normes, la régularité de ces écarts, et l'étendue des facteurs touchés. Cet indice est largement apprécié pour sa simplicité et sa capacité à s'appliquer dans divers contextes (CCME, 2001).

Formule :

$$CCME\ WQI = 100 - \frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732} \dots\dots\dots \text{Équation (1)}$$

Où :

- $F_1 = (\text{Nombre de paramètres ne respectant pas les objectifs} / \text{Total des paramètres}) \times 100$
- $F_2 = (\text{Nombre de fois où les objectifs ne sont pas respectés} / \text{Total des mesures}) \times 100$
- $F_3 = \text{Amplitude des dépassements des objectifs.}$

Tableau 6: Catégorie de classement WQI CCME

| Score | Catégories de qualité de l'eau |
|----------|--------------------------------|
| 95 – 100 | Excellente |
| 80 – 94 | Bonne |
| 65 – 79 | Passable |
| 45 – 64 | Médiocre |
| 0 – 44 | Mauvaise |

Source: Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME), 2001. Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life: CCME Water Quality Index 1.0 – Technical Report. Winnipeg, MB: CCME.

Un autre exemple historique serait l'indice de qualité de l'eau proposé par Horton en 1965, qui est l'un des indices pionniers élaborés. Il intègre divers paramètres physico-chimiques en leur assignant des poids particuliers. Cet indice, bien que basique, a établi les fondements de nombreux instruments contemporains pour évaluer la qualité de l'eau (Horton, 1965).

$$\text{Horton WQI} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot q_i \dots \text{Équation (2)}$$

Où :

- w_i : Poids attribué au paramètre i
- q_i : Sous-indice de qualité du paramètre i
- i : Rang du paramètre dans la sommation (ex. 1 = pH, 2 = nitrates...)
- n : Nombre total de paramètres considérés

Tableau 7 : Catégorie de classement WQI Horton

| Score | Catégorie de qualité de l'eau |
|----------|-------------------------------|
| 0 – 25 | Très mauvaise |
| 26 – 50 | Mauvaise |
| 51 – 70 | Moyenne |
| 71 – 90 | Bonne |
| 91 – 100 | Excellente |

Source: Horton, R.K., 1965. An index number system for rating water quality. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 37(3), pp.300–306.

L'indice de Brown, aussi appelé Indice de Qualité de l'Eau Brown (WQI), est une approche simplifiée pour mesurer la qualité de l'eau. Brown et ses collègues l'ont conçu en 1970 comme un instrument pour condenser divers paramètres de qualité de l'eau en une unique note numérique. Cet indice est particulièrement pratique pour offrir une appréciation rapide et générale de la qualité de l'eau, même s'il n'est pas aussi fréquemment employé que d'autres indices plus contemporains (Brown *et al.*, 1970). L'indice de Brown se fonde sur une méthode pondérée, dans laquelle chaque critère de la qualité de l'eau (tels que le pH, la turbidité, les matières en suspension, les nitrates, etc.) reçoit un coefficient selon son importance relative pour la qualité générale de l'eau. Par la suite, chaque paramètre est converti en un indice de qualité partiel qui est ensuite fusionné pour générer une note finale.

Formule:

$$\text{Brown WQI} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot q_i \dots \text{Équation (3)}$$

Où :

- w_i : Poids attribué au paramètre i (reflétant son importance relative)
- q_i : Sous-indice de qualité du paramètre i (basé sur des seuils prédéfinis)
- i : Rang du paramètre dans la sommation
- n : Nombre total de paramètres pris en compte

Tableau 8 : Catégorie de classement WQI Brown

| Score | Catégorie de qualité de l'eau |
|----------|-------------------------------|
| 0 – 25 | Très mauvaise |
| 26 – 50 | Mauvaise |
| 51 – 70 | Moyenne |
| 71 – 90 | Bonne |
| 91 – 100 | Excellente |

Source : Brown, R.M., McClelland, N.I., Deininger, R.A. and Tozer, R.G., 1970. A water quality index—do we dare? *Water and Sewage Works*, 117(10), pp.339–343.

▪ **Indices biologiques**

Les bioindicateurs, qui sont des organismes vivants, sont utilisés pour juger de la vitalité des écosystèmes aquatiques. Des entités comme les macro-invertébrés, les poissons ou les diatomées réagissent aux variations de leur milieu et délivrent des données concernant la qualité de l'eau sur une période prolongée.

Un bon exemple serait l'indice biologique global normalisé (IBGN), qui est utilisé en France. Cet indice repose sur l'observation et la variété des macro-invertébrés benthiques, qui sont réceptifs aux pollutions organiques et chimiques. Ces entités constituent de très bons indicateurs de la qualité de l'eau, puisqu'elles révèlent les conditions environnementales par leur présence ou leur absence (AFNOR, 2004).

$$\text{IBGN WQI} = \sum_{i=1}^n \text{Nombre de taxons} \times \text{Coefficient de sensibilité} \dots \text{Équation (4)}$$

Tableau 9 : Catégorie de classement WQI IBNGN

| Score | Catégorie de qualité de l'eau |
|---------|-------------------------------|
| 0 – 5 | Très mauvaise |
| 6 – 9 | Mauvaise |
| 10 – 13 | Moyenne |
| 14 – 17 | Bonne |
| 18 – 20 | Excellente |

Source : AFNOR, 2004. Qualité de l'eau – Détermination de l'indice biologique global normalisé (IBGN). Norme NF T90-350. Paris : Association Française de Normalisation.

Un autre instrument fréquemment employé est l'indice de diversité de Shannon-Weaver. Même si cet indice est plutôt général, on l'applique fréquemment aux communautés aquatiques pour mesurer la biodiversité, généralement liée à la qualité de l'eau.

Un écosystème sain est généralement caractérisé par une grande diversité d'espèces, alors qu'un faible niveau de diversité peut être le signe d'une dégradation environnementale (Shannon & Weaver, 2010).

$$\text{Shannon-Weaver WQI} = \sum_{i=1}^S (p_i \cdot \ln p_i) \dots \text{Équation (5)}$$

Où :

- p_i = Proportion des individus de l'espèce i
- S = Nombre total d'espèces
- i : Rang du taxon dans la sommation

Tableau 10 : Catégorie de classement WQI Shannon-Weaver

| | |
|-------|-------------------|
| 0 – 1 | Faible diversité |
| 1 – 3 | Diversité modérée |
| 3 | Forte diversité |

Source: Shannon, C.E. and Weaver, W., 1949. *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana, IL: University of Illinois Press.

▪ **Indices incorporés**

Les indices intégrés utilisent des paramètres à la fois physico-chimiques et biologiques pour offrir une évaluation plus exhaustive de la qualité de l'eau. Ces indicateurs sont particulièrement précieux pour la gestion intégrale des ressources en eau, étant donné qu'ils intègrent tant les facteurs sanitaires qu'écologiques.

Un exemple marquant est l'indice de la qualité de l'eau de l'OMS, qui prend en compte des critères sanitaires (tels que la présence de germes nuisibles) et environnementaux (comme les niveaux de nitrates et de phosphates). Cet indicateur sert à juger de la qualité de l'eau potable et de ses effets sur la santé des humains, fournissant une vue d'ensemble des dangers sanitaires associés à la consommation de l'eau (OMS, 2017).

• **Formule**

Basée sur des seuils de concentration pour des paramètres spécifiques.

Tableau 11 : Catégories de classement WQI OMS

| | |
|---------------------|-----------------|
| Conforme aux normes | Eau potable |
| Non conforme | Eau non potable |

Source: World Health Organization (WHO), 2017. Guidelines for Drinking-water Quality, 4th edition incorporating the 1st addendum. Geneva : WHO.

Un autre cas est l'indice de qualité de l'eau élaboré par Bhargava (1983), conçu précisément pour juger la qualité de l'eau du Gange en Inde.

Cet indice associe des critères physico-chimiques, comme la demande biologique en oxygène (DBO), à des signaux biologiques afin d'offrir une appréciation globale de l'état du fleuve (Bhargava, 1983).

$$\text{Bhargava WQI} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot q_i \dots \text{Équation (6)}$$

Où :

- w_i = Poids du paramètre i
- q_i = Sous-indice de qualité pour le paramètre i
- i : Rang du paramètre dans la sommation
- n : Nombre total de paramètres pris en compte

Tableau 12 : Catégorie de classement WQI Bhargava

| Score | Catégorie de qualité de l'eau |
|----------|-------------------------------|
| 0 – 25 | Très mauvaise |
| 26 – 50 | Mauvaise |
| 51 – 70 | Moyenne |
| 71 – 90 | Bonne |
| 91 – 100 | Excellente |

Source: Bhargava, D.S., 1983. Use of a water quality index for river classification and zoning of Ganga River. Environmental Pollution Series B : Chemical and Physical, 6(1), pp.51–67.

2.3- Logique floue

L'approche mathématique de la logique floue autorise le traitement d'informations qui sont imprécises, incertaines ou subjectives. Par opposition aux approches conventionnelles basées sur des données binaires (oui/non, vrai/faux), elle intègre des niveaux de vérité, ce qui la rend spécifiquement appropriée pour représenter des systèmes complexes et mal délimités.

Dans l'évaluation de la qualité de l'eau, elle propose une solution novatrice pour combiner des informations qualitatives et quantitatives, tout en prenant en compte les incertitudes liées aux observations environnementales.

- **Histoire de la logique floue**

Lotfi Zadeh, professeur à l'Université de Californie à Berkeley, a introduit la logique floue en 1965 dans son article pionnier intitulé « Fuzzy Sets » (Zadeh, 1965). Zadeh a introduit une approche inédite pour décrire des notions vagues ou indéterminées, tels que « chaud », « froid », « grand » ou « petit », grâce à l'emploi d'ensembles flous.

Ces ensembles autorisent la représentation d'appartenances partielles à une catégorie, plutôt que de simples appartenances binaires (oui/non).

1970-1980 : La logique floue a initialement été utilisée dans des domaines théoriques, comme les systèmes de contrôle et l'intelligence artificielle.

Années 1990 : Son adoption s'est accrue dans les applications industrielles, notamment pour les systèmes de contrôle automatique (comme les lave-linges ou les climatiseurs), contribuant à sa popularité grandissante.

De l'an 2000 à nos jours : L'emploi de la logique floue se répand de plus en plus dans les secteurs environnementaux, particulièrement pour l'évaluation de la qualité des eaux, la gestion des ressources en eau et la modélisation des écosystèmes (Ocampo-Duque *et al.*, 2006).

2.4 Application de la logique floue au calcul de la Qualité de l'Eau (QE)

La logique floue est une approche mathématique particulièrement appropriée pour gérer des situations complexes où les informations sont vagues, indéterminées ou subjectives.

Elle offre la possibilité de représenter les interactions non linéaires entre divers facteurs physico-chimiques et biologiques dans le cadre de l'appréciation de la qualité de l'eau, fournissant ainsi une évaluation plus précise et réaliste. Cette méthode est généralement mise en œuvre grâce à un système d'inférence floue (SIF), qui se déploie en quatre phases clés : la fuzzification, l'attribution de poids, l'application des règles d'inférence et la défuzzification. Selon Nozari et Ebrahimi (2011), cette méthode se révèle particulièrement utile pour mesurer la qualité de l'eau dans des situations où les informations sont incomplètes ou peu claires.

▪ Fuzzification

La phase initiale, appelée fuzzification, vise à convertir les données numériques relatives à la qualité de l'eau (telles que le pH, la turbidité, le niveau d'oxygène dissous ou la teneur en nitrates) en niveaux d'appartenance à des ensembles flous.

Ces ensembles flous sont caractérisés par des fonctions d'appartenance qui correspondent à des catégories linguistiques comme « faible », « moyen » ou « élevé ». Par exemple, une teneur en oxygène dissous de 3 mg/L pourrait être catégorisée comme « faible » avec un niveau d'appartenance de 0,8, « moyenne » avec un niveau de 0,2, et « élevée » avec un niveau de 0. Cette phase facilite la conversion de données spécifiques en notions vagues, rendant leur manipulation plus aisée dans un contexte qualitatif (Ocampo-Duque *et al.*, 2006).

▪ Pondération

La pondération attribue une valeur à chaque critère, basée sur son importance comparative dans l'appréciation globale de la qualité de l'eau. Par exemple, le niveau d'oxygène dissous est fréquemment jugé plus crucial que la turbidité pour la préservation des écosystèmes aquatiques. Ces poids peuvent être définis par des spécialistes ou par le biais de techniques statistiques, et ils peuvent aussi être exprimés de manière floue afin d'incorporer l'incertitude associée à leur attribution. Par exemple, un poids « élevé » pourrait être attribué à l'oxygène dissous, tandis qu'un poids « modéré » serait associé au pH (Lermontov *et al.*, 2009).

▪ **Évaluation des règles d'inférence floues**

Le système repose sur le cœur constitué par les règles d'inférence floues. Elles se présentent sous la forme de règles « SI... ALORS... » qui établissent un lien entre les entrées floues et les sorties floues. Pour illustration :

Si le taux d'oxygène dissous est bas ET la turbidité élevée, alors cela indique une mauvaise qualité de l'eau. Si le pH est idéal ET que la teneur en nitrates est basse, alors l'eau est de bonne qualité. Ces règles s'appuient sur des savoirs spécialisés, des informations passées ou des recherches scientifiques. On utilise des opérateurs flous comme le ET flou (minimum) ou le OU flou (maximum) pour juger de ces règles.

Par exemple, si on attribue un degré d'appartenance de 0,7 à l'ensemble « faible » pour la concentration en oxygène dissous et un degré de 0,8 à l'ensemble « élevée » pour la turbidité, alors la règle « SI l'oxygène dissous est faible ET turbidité est élevée, ALORS qualité de l'eau est mauvaise » sera déclenchée avec une valeur de 0,7 (qui représente le minimum des deux degrés d'appartenance) (Icaga, 2007).

Pour appliquer les règles, on peut utiliser la théorie de Zadeh, comme le montre le tableau suivant :

Tableau 13 : Application de la théorie de Zadeh aux règles floues

| Dénomination | Intersection (ET) | Réunion (OU) |
|-------------------------------|--|--|
| Opérateur de Zadeh MIN/MAX | $\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$ | $\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$ |

Source : (Kilani, 2020)

▪ **Défuzzification**

La défuzzification constitue la phase finale qui transforme les résultats flous en une valeur numérique exacte, symbolisant l'indice de qualité de l'eau. Il existe diverses techniques de défuzzification :

- ✓ la technique du centre de gravité (centroïde) ;
- ✓ la méthode des moyennes des maxima (fait la moyenne des valeurs maximal trouvés) ;

- ✓ la méthode du maximum de l'appartenance (choisi la valeur ayant le plus haut degré d'appartenance).

Par exemple, si le résultat flou détermine que la qualité de l'eau est « moyenne » avec un coefficient d'appartenance de 0,6 et « bonne » avec un coefficient de 0,4, la défuzzification produira une valeur singulière qui représente cette évaluation. Cette valeur finale représente l'indice de qualité de l'eau, selon (Ross, 2010).

- **Formule détaillée du centre de gravité**

La formule du centre de gravité pour la défuzzification est la suivante :

$$QE = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot \mu(y_i)}{\sum_{i=1}^n \mu(y_i)} \dots \dots \text{Équation (7)}$$

(Source : Ross, 2010)

Où :

- (QE) : la valeur de défuzzification (indice de qualité de l'eau) ;
- y_i : les valeurs discrètes de la variable de sortie ou valeurs représentative (ces valeurs sont des points spécifiques sur l'échelle de la variable de sortie) ;
- $\mu(y_i)$: le degré d'appartenance de y_i à l'ensemble flou résultant ;
- n : nombre de paramètres évalués (ex: pH, DBO, DCO,...).

2.5 Avantages de l'utilisation de la logique floue pour analyser la qualité de l'eau

- **Gestion des incertitudes**

La logique floue facilite le traitement de données vagues ou incomplètes, un phénomène fréquent dans les recherches environnementales (Zadeh, 1965).

Exemple : Une étude menée par Ocampo-Duque *et al.* (2006) a utilisé la logique floue pour évaluer la qualité de l'eau dans une rivière en Colombie.

Les auteurs ont montré que cette méthode permettait de mieux intégrer les incertitudes liées aux mesures et aux seuils de qualité, offrant ainsi une évaluation plus réaliste.

- **Souplesse**

Elle est capable d'incorporer des données qualitatives (telles que des observations humaines) et quantitatives (comme des valeurs de pH).

Exemple : Dans une étude sur la gestion des ressources en eau, Adriaenssens *et al.* (2004) ont utilisé la logique floue pour combiner des données qualitatives (avis d'experts) et quantitatives (mesures de débit et de qualité de l'eau) afin de prendre des décisions de gestion plus éclairées.

- **Interprétabilité**

Les règles floues sont généralement intuitives et aisées à comprendre, ce qui rend la transmission des résultats plus simple (Li *et al.*, 2013).

Exemple : Dans une étude sur la qualité de l'air, Lu *et al.* (2011) ont utilisé la logique floue pour modéliser les niveaux de pollution atmosphérique. Les règles floues ont permis de simplifier la complexité des données tout en fournissant des résultats facilement compréhensibles pour les gestionnaires environnementaux.



**DEUXIÈME PARTIE : MATÉRIELS ET
MÉTHODOLOGIE**

DEUXIÈME PARTIE : MATÉRIELS ET MÉTHODOLOGIE

CHAPITRE III : MATÉRIELS ET MÉTHODES

1. Présentation de la station d'épuration d'Ain El Houtz

La station d'épuration des eaux usées d'Ain El Houtz d'une capacité de 150 000 équivalents habits occupe une place cruciale dans la gestion des eaux résiduaires d'origine domestique. Ouverte en 2005, elle est conçue pour épurer jusqu'à 30 000 m³ d'eaux résiduaires par jour (ONA, 2006).

- **Localisation et situation géographique**

La STEP d'Ain El Houtz se trouve à 6 km au nord de la ville de Tlemcen, sur la rive droite de l'oued Ain El Houtz, juste au pied du Djebel Touma ; elle couvre une superficie de 13 hectares (ONA, 2013).

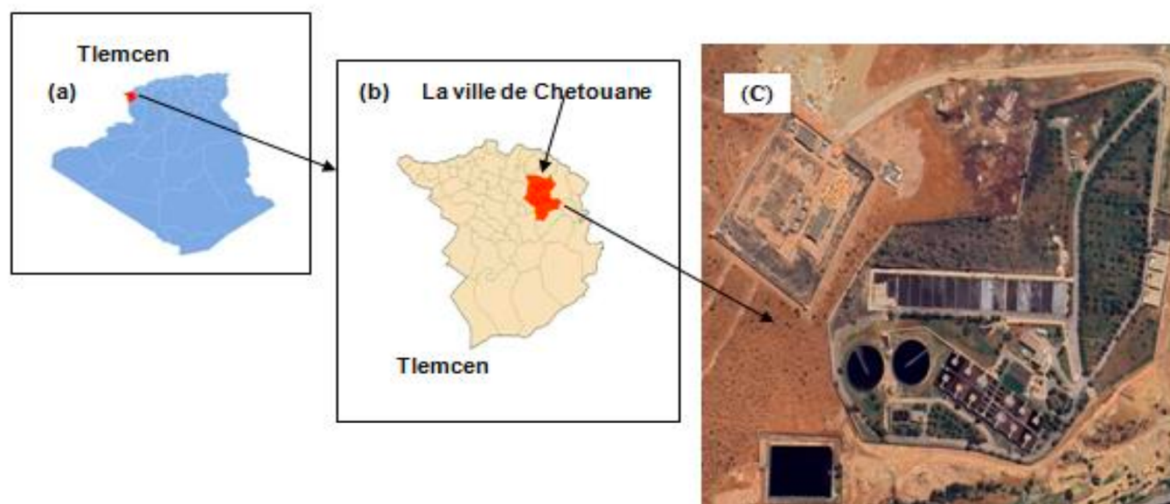


Figure 5: Localisation de la station d'Ain El Houtz (Abdelmoumene *et al.*, 2024)

2. Description de la STEP

- **Fonctionnement de la STEP**

La station d'épuration utilise une méthode de boues activées à faible charge pour le traitement biologique des eaux usées, favorisant principalement les processus aérobies. Ces derniers autorisent les bactéries à oxyder directement les substances organiques contenues dans les eaux résiduaires (ONA, 2006). Les eaux usées sont acheminées à la station via un collecteur de 1250 mm de diamètre, par le biais de la gravité. La station a une capacité maximale de traitement efficace fixée à 3800 m³/h. Si ce seuil est franchi, les eaux usées en surplus sont déversées par une surverse d'orage positionnée à l'amont, qui oriente le surplus vers l'oued d'Ain El Houtz. Les eaux usées sont par la suite dirigées par gravité vers la première phase de traitement à travers un tuyau de 800 mm de diamètre, appelé « Liaison entre ouvrage ». La station possède deux voies de traitement : une consacrée aux eaux résiduaires et l'autre aux boues (ONA, 2006).

La conception de la station d'épuration de Tlemcen repose sur les données présentées dans le tableau suivant :

- Type de réseaux unitaire.

Tableau 14 : Les valeurs de bases des données de la STEP de Tlemcen (ONA, 2013).

| Paramètre | Unité | Valeur |
|--|-------------------|---------------|
| Population | Eq/hab | 150000 |
| Débit journalier | m ³ /j | 30000 |
| Débit de point horaire admis au traitement | m ³ /h | 3800 |
| DBO ₅ journalière | Kg/j | 9300 |
| MES | Kg/j | 13950 |
| Azote à nitrifier | Kg | 1980 |
| Équivalence calculée sur la DBO | Eq/hab | 172000 |

- **Description des installations de la STEP**

Les installations de la station d'épuration comprennent :

Tableau 15 : Description des installations de la STEP (ONA ; 2013)

| Pour la partie eaux usées | Pour la partie boue | Bâtiments |
|--|--|--|
| - déversoir d'orage ; - dessableur-déshuileur ; - quatre bassins d'aération ; - deux décanteurs secondaire (clarificateur) ; - un poste de désinfection. | - un épaisseur ; - quatorze lits de séchage ; - air de stockage des boues séchées. | - un bâtiment d'exploitation ; - un bâtiment de chloration. |

3. Procédés de traitements utilisés

La station d'épuration gère les eaux usées via une procédure segmentée en deux voies distinctes :

3.1 Secteur de l'eau

La chaîne de traitement des eaux usées couvre toutes les phases depuis leur introduction dans la STEP jusqu'à leur élimination finale. Elle englobe le prétraitement, le traitement biologique et les finitions du traitement. À l'entrée de la station, un déversoir d'orage est en place, conçu pour traiter un débit maximal de 3800 m³/h. Les eaux usées sont dirigées vers l'étape initiale de traitement par gravité, à travers un tuyau ayant un diamètre de 800 mm de diamètre.

- **Prétraitement des eaux usées**

L'élimination des plus grosses particules susceptibles d'interférer avec les étapes suivantes du traitement est effectuée par un dégrilleur, qui représente la première phase du prétraitement. Un dessableur-déshuileur assume la suite du processus après cette phase.

Le dispositif est constitué de deux unités longitudinales dotées de canaux en béton armé à la forme trapézoïdale, facilitant ainsi la distinction entre le sable et les graisses.

Ce procédé est perfectionné par le biais de l'air insufflé à l'aide de surpresseurs, et l'installation est dotée d'un pont suceur et écumeur pour assurer une séparation efficace des contaminants (Abdelmoumene, 2025).



Figure 6 : Dégrilleur mécanique



Figure 7 : Dessableur-déshuileur

- **Traitement biologique**

La station possède quatre bassins de traitement biologique de forme rectangulaire, au cours desquels l'eau est soumise à un processus de dénitrification. Trois aérateurs de surface à faible vitesse sont utilisés dans chaque bassin pour assurer l'aération, ce qui favorise le développement des bactéries responsables de la suppression de la matière organique. Des capteurs surveillent en permanence la concentration d'oxygène dissous dans les réservoirs et activent automatiquement les aérateurs pour assurer l'apport d'oxygène requis par les bactéries. Selon l'ONA (2006), chaque bassin possède un volume de 4723 m³, une longueur de 55,5 m et une largeur de 18,5 m.



Figure 8: Bassin d'aération

- **Finitions de traitement**

Le processus de chloration a lieu dans un réservoir en béton renforcé d'une capacité de 700 m³, assurant que l'eau traitée est conforme aux normes sanitaires avant d'être rejetée.



Figure 9 : Bassin de chloration

Tableau 16 : Normes de rejets des eaux usées (ONA, 2006)

| Paramètre | Norme de rejet |
|---|----------------|
| pH | 5.5 - 8.5 |
| Température | < 30°C |
| DCO (Demande Chimique en Oxygène) | 150 mg/l |
| DBO ₅ (Demande Biochimique en Oxygène) | 100 mg/l |
| MES (Matières en Suspension) | 100 mg/l |
| Nitrates (NO ₃) | 30 mg/l |
| Phosphates | 2 mg/l |
| Oxygène dissous (O ₂) | > 2 mg/l |

3.2 Filière boues

Le secteur des boues englobe divers dispositifs indispensables : une vis d'Archimède pour le déplacement des boues, un épaisseur de boues en béton renforcé avec un pont tournant et un réacteur affichant un diamètre de 14 m et une hauteur utile de 4 m qui permet de réduire le volume des boues fraîches, et donne une consistance physique plus ou moins solide (ONA, 2013).



Figure 10: Épaisseur

Pour finir, les boues épaissies sont envoyées par pompage vers les lits de séchage qui dispose de 14 lits de séchage, d'une longueur de 30 m et d'une largeur de 15 m, ce qui permet un séchage efficace des boues générées par le processus de traitement (ONA, 2006).

Des zones spécifiques nommées « aires de stockage » sont dédiées au rangement des boues sèches, destinées à leur usage agricole ou à une éventuelle décharge. Un espace dégagé pour entreposer les boues sèches est prévu afin de faciliter le déplacement en grande quantité des boues vers le secteur agricole.



Figure 11: Lit de séchage



Figure 12: Aire de stockage

4. Programmation

4.1 Sélection du logiciel utilisé

Pour juger de la qualité de l'eau dans la station d'épuration en utilisant la logique floue, le choix s'est porté sur MATLAB (Matrix Laboratory) en raison de sa capacité à gérer efficacement des données complexes et son aptitude à travailler avec des systèmes d'inférence floue.

- **Introduction à MATLAB et explication de son choix**

MATLAB est fréquemment utilisé dans le domaine de l'ingénierie et la modélisation environnementale en tant qu'outil de programmation scientifique (MathWorks, 2023). Le Fuzzy Logic Toolbox offre des outils puissants pour la conception, la simulation et l'optimisation de systèmes basés sur la logique floue (Jang & Gulley, 1997), ce qui le rend idéal pour notre travail de recherche. Icağa (2007), dans le contexte de l'évaluation de la qualité de l'eau, a mis en évidence que cet environnement facilite la mise en œuvre efficace des fonctions d'appartenance et des règles d'inférence. Il offre également des outils de visualisation indispensables pour interpréter les résultats.

4.2 Avantages de MATLAB pour ce travail

- **Modélisation efficace**

La plateforme facilite la mise en œuvre des concepts de logique floue, notamment pour établir les critères d'évaluation des paramètres cruciaux tels que la DBO₅, la DCO ou l'oxygène dissous. Grâce à son architecture optimisée, l'implémentation rapide du système d'évaluation est facilitée.

- **Gestion des données floues**

Le logiciel, grâce à ses caractéristiques de pointe, gère naturellement les incertitudes inhérentes aux mesures environnementales. Cette compétence est essentielle pour garantir des résultats précis malgré la variation des données sur le terrain.

- **Visualisation intuitive**

Les outils graphiques intégrés permettent de représenter clairement les fonctions d'appartenance et les résultats de l'inférence floue.

- **Présentation intuitive des résultats**

Le programme produit de manière automatique des graphiques et diagrammes explicites qui illustrent comment les divers indicateurs (tels que la DBO₅ ou le pH, etc.) affectent la qualité de l'eau. Ces illustrations graphiques autorisent les techniciens et gestionnaires, même sans compétence en modélisation mathématique à :

obtenir une vue d'ensemble rapide de la qualité de l'eau ; saisir les liens entre les divers paramètres mesurés ; et repérer rapidement les problèmes potentiels requérant une attention spécifique.

5. Développement de l'indice flou de la qualité de l'eau

Développer un indice flou de qualité de l'eau (IFQE) n'est pas chose aisée. L'indice flou est une méthode d'évaluation qui repose sur la théorie des ensembles flous et permet de prendre en compte l'incertitude et l'imprécision des données environnementales. Contrairement aux indices classiques qui attribuent des valeurs fixes, l'indice flou exprime la qualité de l'eau sous forme de degrés d'appartenance à différentes catégories. L'intégration de la logique floue et du système d'inférence floue aux variables de surveillance environnementale nécessite une modification conceptuelle. Dans ce travail de recherche les ensembles flous ont été définis à l'aide d'une fonction d'appartenance associant un domaine d'intérêt à l'intervalle [0, 1].

Des courbes spécifiques permettent de visualiser cette fonction d'appartenance pour chaque catégorie de qualité (mauvaise, moyenne, bonne), illustrant ainsi le degré d'appartenance d'une valeur donnée à l'ensemble correspondant (Lermontov et al., 2009).

Les paramètres des fonctions d'appartenance triangulaires employées dans le modèle flou sont illustrés dans les tableaux 17 et 18. Le premier tableau présente les valeurs liées aux variables d'entrée, alors que le second représente celles des variables de sortie, établissant ainsi les critères de qualité de l'eau dans un langage flou. Ces catégorisations facilitent une évaluation plus subtile et flexible face aux incertitudes inhérentes aux actions environnementales. L'élaboration de ces tableaux s'est faite en prenant en compte les normes de rejet des eaux usées en Algérie, assurant ainsi leur conformité avec la législation actuelle et une meilleure intégration des critères environnementaux.

Tableau 17 : Récapitulatif des paramètres a, b et c des fonctions d'appartenance triangulaires pour les variables d'entrée.

| Variable | Unité | Terme Linguistique | a | b | c |
|------------------------------------|-------|--------------------|-----|-----|-----|
| DBO₅ | mg/L | Bonne | 0 | 10 | 20 |
| | | Moyenne | 15 | 30 | 45 |
| | | Mauvaise | 40 | 60 | 100 |
| DCO | mg/L | Bonne | 0 | 30 | 60 |
| | | Moyenne | 50 | 100 | 150 |
| | | Mauvaise | 130 | 200 | 300 |
| O₂ dissous | mg/L | Bonne | 5 | 7 | 9 |
| | | Moyenne | 3 | 5 | 7 |
| | | Mauvaise | 0 | 2 | 5 |
| pH | - | Acide | 6.5 | 6.8 | 7.5 |
| | | Neutre | 7.0 | 7.5 | 8.5 |
| | | Basique | 8.0 | 8.5 | 9.5 |
| NO₃⁻ | mg/L | Bonne | 0 | 5 | 10 |
| | | Moyenne | 8 | 15 | 25 |
| | | Mauvaise | 20 | 30 | 50 |
| PO₄³⁻ | mg/L | Bonne | 0 | 0.5 | 1 |
| | | Moyenne | 0.8 | 2 | 4 |
| | | Mauvaise | 3 | 5 | 10 |
| Température | °C | Bonne | 10 | 15 | 20 |
| | | Moyenne | 18 | 25 | 30 |
| | | Mauvaise | 28 | 35 | 40 |

Tableau 18 : Récapitulatif des paramètres a, b et c de la fonction d'appartenance triangulaire pour la variable de sortie.

| Variable | Unité | Terme Linguistique | a | b | c |
|-----------|-------|--------------------|----|----|-----|
| QE | % | Mauvaise | 0 | 30 | 50 |
| | | Moyenne | 40 | 60 | 80 |
| | | Bonne | 70 | 90 | 100 |

- a** : Point où l'appartenance commence à augmenter. Généralement, c'est la valeur minimale de l'univers de discours ou une valeur critique.
- b** : Point où l'appartenance atteint son maximum . C'est souvent la valeur optimale ou la limite de la norme.
- c** : Point où l'appartenance revient à 0. C'est souvent la valeur maximale de l'univers de discours ou une valeur critique.

5.1 Fondement du modèle flou

Le modèle se fonde sur :

- **Variables d'entrée**

Sept paramètres essentiels (DBO5, DCO, O₂, pH, NO₃⁻, PO₄³⁻, Température) sont pris en compte selon leur impact sur l'évaluation de la qualité de l'eau. Afin de déterminer l'importance relative de chacun, un questionnaire a été élaboré et soumis à des experts en traitement de l'eau. Chaque expert a attribué un poids à chaque paramètre selon son importance perçue. Une fois les réponses recueillies, une analyse a été menée en examinant chaque paramètre individuellement pour observer les pondérations attribuées par les experts. Ensuite, les paramètres ont été classés selon leur importance dans l'évaluation de la qualité de l'eau. Le tableau suivant présente les poids attribués à chaque paramètre dans cette étude.

Tableau 19 : Pondération des paramètres pour l'évaluation de la qualité de l'eau

| Paramètre | Importance (pondération %) | Justification |
|---|---------------------------------------|--|
| DBO₅ (Demande Biochimique en Oxygène) | 25% | Indicateur clé de la pollution organique, montre la charge en matières biodégradables. |
| DCO (Demande Chimique en Oxygène) | 20% | Complète la DBO5 en mesurant la pollution organique et chimique totale. |
| O₂ (Oxygène dissous) | 15% | Essentiel pour la vie aquatique, reflète l'efficacité de l'aération et du traitement. |
| pH | 10% | Affecte les réactions chimiques et biologiques ; doit rester dans des limites acceptables (6,5 - 8,5). |
| NO₃⁻ (Nitrates) | 10% | Indicateur de pollution azotée, influence la croissance des algues et l'eutrophisation. |
| PO₄³⁻ (Phosphates) | 10% | Facteur clé de l'eutrophisation, indicateur des rejets de détergents et fertilisants. |
| Température | 10% | Influence la solubilité de l'oxygène et les réactions biochimiques. |

- **Variable de sortie**

L'Indice Flou de Qualité de l'Eau (IFQE) est un indicateur graduel qui surpasse les indices traditionnels par sa capacité à intégrer les transitions progressives entre les états de qualité (Lermontov et al., 2009). S'étendant sur une échelle intuitive de 0 (qualité mauvaise) à 100 (qualité exceptionnelle), cet outil a démontré sa robustesse pour traiter les incertitudes inhérentes aux données environnementales (Sadiq & Rodriguez, 2004).

• **Utilisation de fonctions d'appartenance triangulaires**

Les fonctions d'appartenance triangulaires offrent une représentation optimale des seuils réglementaires en permettant des transitions progressives entre les classes de qualité (Bonne, Moyenne, Mauvaise). Caractérisées par trois paramètres clés : valeur minimale (a), valeur centrale (b) et valeur maximale (c). Ces fonctions triangulaires évitent les changements brutaux entre les classes de qualité, permettant une évaluation plus réaliste (Zadeh, 1965).

Les données représentées dans les tableaux 16 et 17 sont utilisées selon l'équation suivante pour tracer les fonctions d'appartenances des 7 paramètres choisis :

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{si } x < a \text{ ou } x > c \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{si } a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & \text{si } b \leq x \leq c \end{cases} \dots\dots \text{Équation (8)}$$

Où :

- a, b, c = Seuils des catégories ;
- $\mu(x)$ = Degré d'appartenance à une catégorie (0 à 1).

Évaluation de la qualité des eaux usées épurées par la logique floue

La figure ci-dessous illustre les fonctions d'appartenance triangulaire des entrées et de la sortie. Elle permet de visualiser la distribution des valeurs et leur degré d'appartenance dans le système étudié.

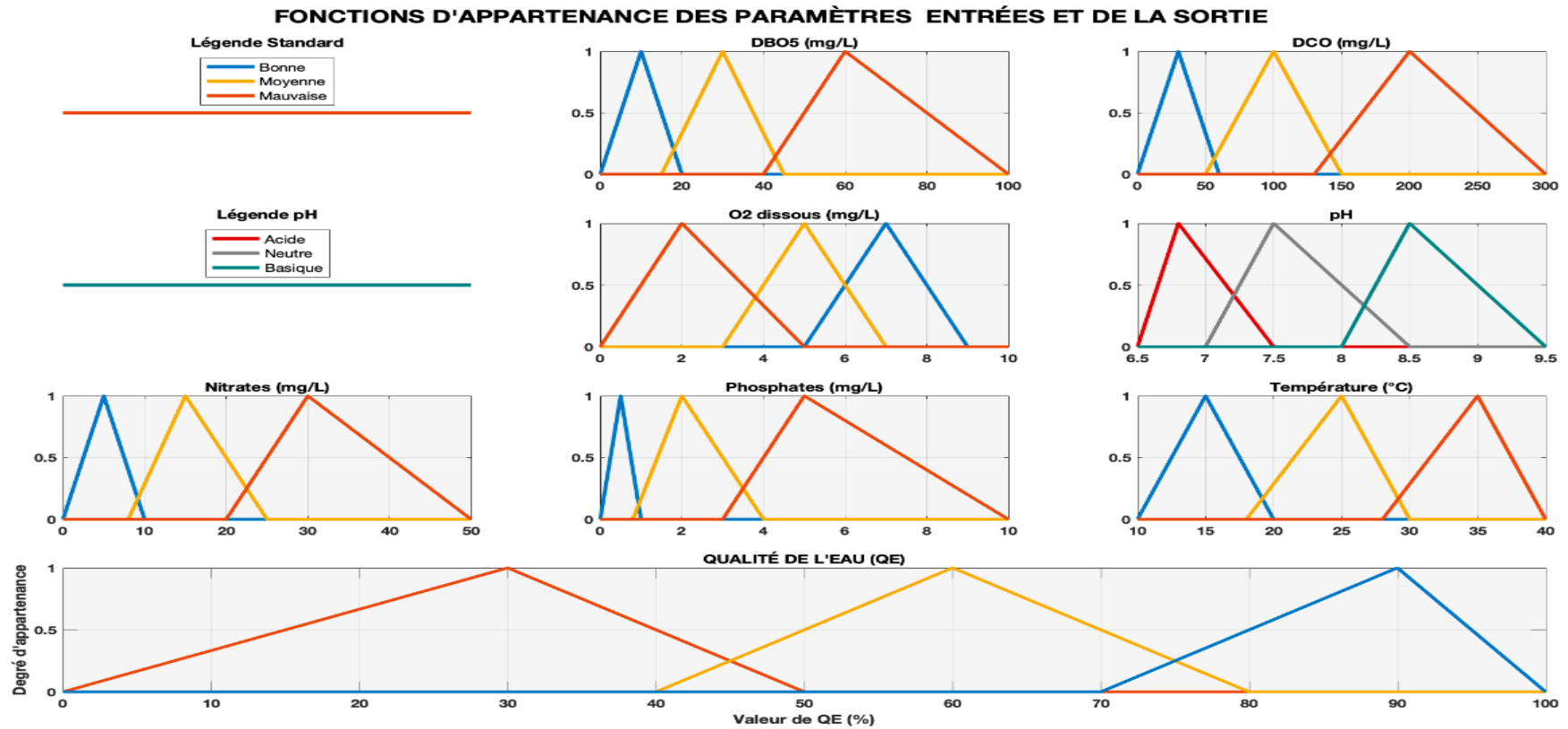


Figure 13: Fonctions d'appartenance des paramètres d'entrées et de la sortie

6. Structure du Système Flou

Étape 1 : Fuzzification

La fuzzification est le processus qui permet de transformer les valeurs de chaque paramètre en niveaux d'appartenance aux diverses catégories préétablies (Bonne, Moyenne, Mauvaise). Cette conversion s'effectue grâce aux fonctions d'appartenance triangulaires mentionnées précédemment. Ainsi, chaque valeur est convertie en une représentation floue, favorisant une interprétation plus flexible des données et tenant compte des incertitudes associées aux variations des paramètres environnementaux.

Méthodologie Appliquée

Pour chaque paramètre (DBO_5 , DCO, O_2 , pH, NO_3^- , PO_4^{3-} , Température), les fonctions d'appartenance triangulaires sont définies par trois points [a b c], où :

- a et c délimitent les bornes de la catégorie ($\mu = 0$) ;
- b correspond au sommet où l'appartenance est maximale ($\mu = 1$).

Le degré d'appartenance (μ) d'une valeur x à une catégorie est calculé comme suit :

Si $x \in [a, b]$ (branche croissante) :

$$\mu = \frac{x - a}{b - a} \dots \text{Équation (9)}$$

Si $x \in [b, c]$ (branche décroissante) :

$$\mu = \frac{c - x}{c - b} \dots \text{Équation (10)}$$

Si $x \notin [a, c]$: $\mu = 0$

- **Étape 2 : Règles floues**

Cette recherche applique l'inférence floue de Mamdani (Mamdani & Assilian, 1975) pour faciliter la prise de décision à l'aide de règles conditionnelles « Si-Alors ». Cette approche repose sur l'intersection de plusieurs ensembles flous permettant une évaluation plus précise de la qualité de l'eau en intégrant divers paramètres (Lermontov *et al.*, 2009). L'opérateur minimum introduit par Zadeh (1965) est couramment utilisé pour représenter cette intersection. Comme le démontrent Mamdani et Assilian (1975), lorsque plusieurs conditions sont combinées dans une règle floue, le degré d'appartenance du résultat est fixé par la valeur la plus basse parmi les conditions concernées. Par exemple, dans une règle « Si A ET B, alors C », l'appartenance de C sera égale à $\min(\mu_A, \mu_B)$, où μ_A et μ_B sont les degrés d'appartenance des ensembles flous A et B (Klir & Yuan, 1995).

Cette étude s'appuie sur l'expertise d'évaluateurs spécialisés pour définir les règles floues utilisées dans l'analyse de la qualité de l'eau. Grâce à leurs analyses, ils ont identifié les combinaisons de paramètres les plus pertinentes, permettant d'adapter les seuils de qualité et d'affiner l'évaluation de l'état de l'eau.

Voici les règles floues utilisées dans cette approche :

Règle 1 – Danger Sanitaire (Pollution Organique Critique)

- Si DBO₅ est Mauvaise ET DCO est Mauvaise
- Alors QE est Mauvaise

Règle 2 – Bon Fonctionnement de la Station

- Si DBO₅ est Bonne ET DCO est Bonne ET O₂ est Bon ET NO₃ est Bon
- Alors QE est Bonne

Règle 3 – Problème d'Oxygénation

- Si O₂ est Très Faible (Mauvaise)
- Alors QE est Mauvaise

Règle 4 – Situation Intermédiaire

- Si Tous les paramètres sont Moyens
- Alors QE est Moyenne

Règle 5 – Charge Organique Bonne mais Oxygénation Moyenne

- Si DBO₅ et DCO sont Bonnes ET O₂ est Moyen
- Alors QE est Moyenne

Règle 6 – Charge Organique Moyenne mais Bon Oxygène et Nitrates

- Si DBO₅ et DCO sont Moyennes ET O₂ et NO₃ sont Bons
- Alors QE est Moyenne

Règle 7 – Bonnes Conditions de Base (autres paramètres ignorés)

- Si DBO₅, DCO, O₂ ET NO₃ sont Bons
- Alors QE est Bonne (même si PH, PO₄ ou Température sont mauvaise).

- **Étape 3 : Défuzzification**

La défuzzification, la dernière phase du processus d'inférence floue sert à transformer un résultat flou en une valeur utile (Mamdani & Assilian, 1975). Dans notre système, suite à l'analyse des règles floues, les niveaux d'appartenance sont synthétisés en un Indice Flou de Qualité de l'Eau (IFQE) au moyen de la technique du centre de gravité réputée pour sa fiabilité dans les usages environnementaux (Lermontov *et al.*, 2009). Cette méthode, basée sur la théorie de Zadeh (1965), assure une interprétation précise des évaluations floues en scores concrets, comme l'ont prouvé des recherches comparables sur les écosystèmes aquatiques (Ocampo-Duque *et al.*, 2006).

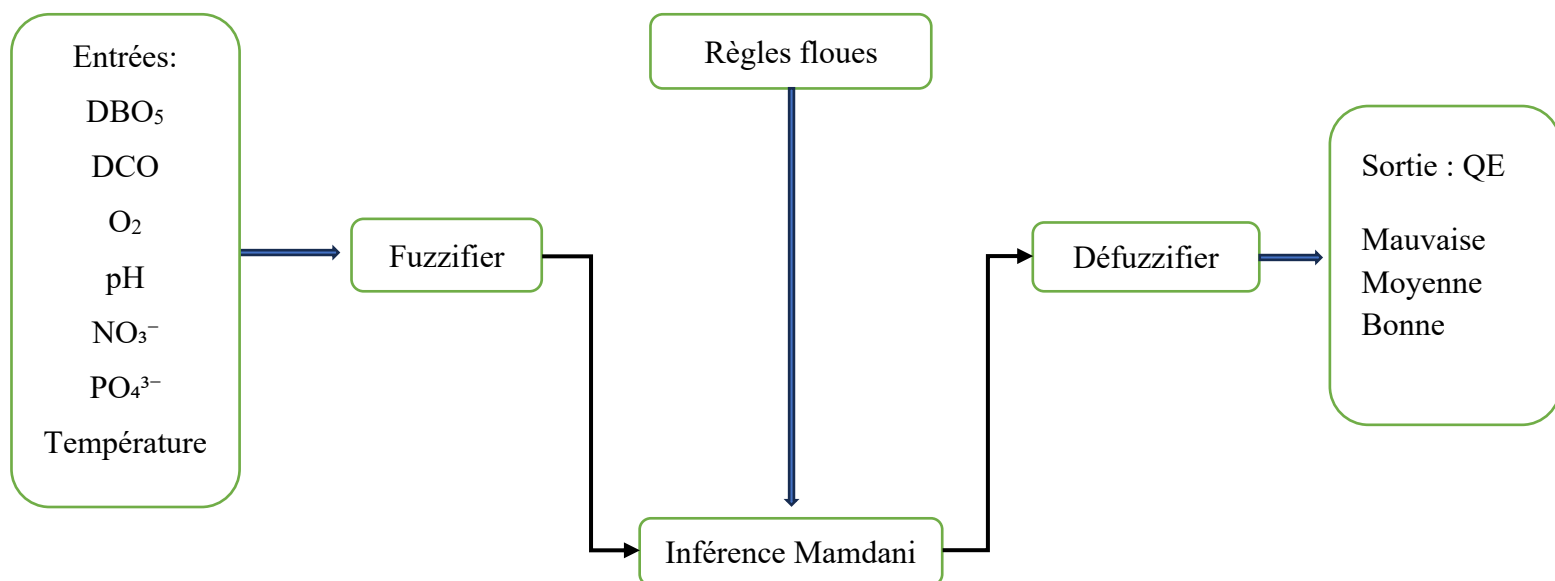
Dans ce travail de recherche, nous avons recours à la méthode du centre de gravité en tant que technique de défuzzification. Cette méthode implique le calcul du centre de gravité de la fonction de sortie floue, ce qui procure une valeur indicative en considérant tous les niveaux d'appartenance des diverses catégories (Hellendoorn & Thomas, 1993). Elle propose une évaluation équilibrée et logique, garantissant un passage optimal des valeurs linguistiques à leur représentation numérique.

Voici l'application mathématique de cette méthode :

$$QE = \frac{\sum_{i=1}^n yi \cdot \mu(yi)}{\sum_{i=1}^n \mu(yi)} \dots \text{Équation (7)}$$

7. Algorithme de la logique floue

L'algorithme développé évalue la qualité de l'eau (QE) à partir de paramètres physico-chimiques (DBO₅, DCO, pH, etc.) en combinant logique floue et expertise métier. Voici son fonctionnement simplifié.





**TROISIÈME PARTIE : RÉSULTATS
ET INTERPRÉTATION**

TROISIÈME PARTIE : RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

Afin d'obtenir une appréciation approfondie et détaillée de la qualité de l'eau à la station d'épuration (STEP) d'Aïn El Houtz, nous avons opté pour des analyses à trois intervalles de temps : annuel, saisonnier et mensuel. Cette méthode favorise une compréhension approfondie des fluctuations et des tendances de la qualité de l'eau à partir des éléments environnementaux et opérationnels.

L'évaluation annuelle fournit une perspective complète des performances de la STEP sur une durée prolongée, soulignant les changements ainsi que les potentielles détériorations ou améliorations de la qualité de l'eau. L'évaluation saisonnière aide à comprendre comment les changements climatiques (températures, précipitations, etc.) influencent les paramètres de qualité de l'eau, en repérant notamment les périodes de vulnérabilité ou de meilleure efficacité du traitement. Pour finir, l'évaluation mensuelle fournit un niveau de détail plus précis, crucial pour identifier des variations à court terme qui pourraient être associées à des incidents spécifiques tels que des pollutions accidentelles, des changements de débit ou des pannes du système.

1. Évolution annuelle de la qualité de l'eau de la station d'épuration d'Ain El Houtz (2020-2022)

1.1 Analyse des résultats annuelles

Les résultats obtenus grâce à la logique floue montrent une variation significative de l'indice de qualité de l'eau (QE) des eaux épurées par ladite station d'épuration :

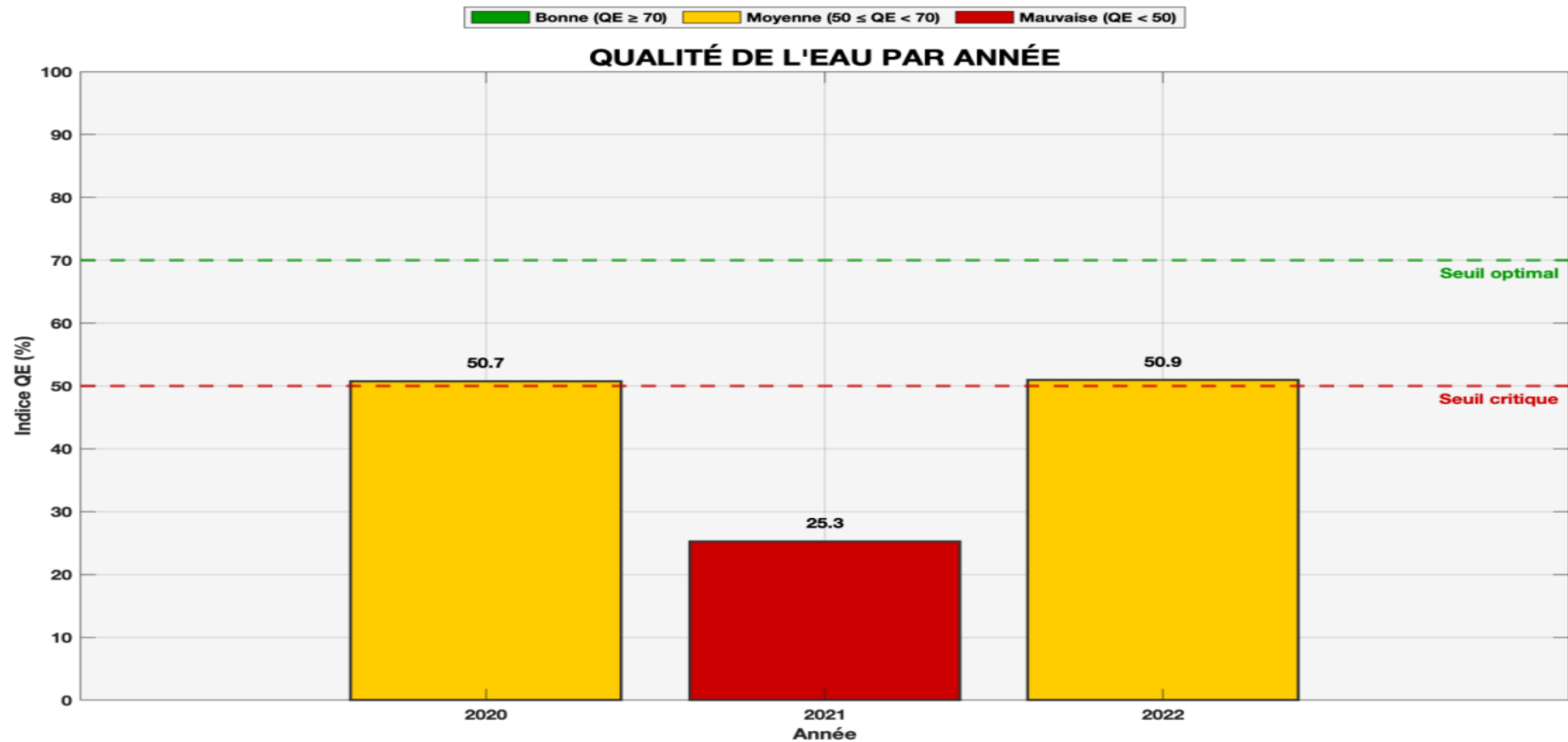


Figure 14 : Évaluation annuelle de la qualité de l'eau

Ces résultats reflètent une détérioration de la qualité en 2021, suivie d'une reprise en 2022, atteignant un niveau semblable à celui de 2020. L'évaluation de l'efficacité du traitement appliqué nécessite une analyse détaillée des causes et des facteurs qui influencent cette variation.

1.2 Interprétation des résultats et facteurs influents

L'année 2020 et 2022 : qualité moyenne

Même si l'eau traitée a atteint un niveau « moyen » avec un QE juste au-dessus de 50, cela témoigne que le processus d'épuration n'a pas réussi à produire une eau de qualité supérieure.

Parmi les explications envisageables :

- une forte pollution des eaux usées peut impacter sur l'efficacité du traitement ;
- l'efficacité des méthodes employées, qui pourraient nécessiter une éventuelle réhabilitation de la STEP, du moment que cette dernière est en fonction depuis 20 ans ;
- des éléments environnementaux comme les fluctuations de température ou la saisonnalité des décharges affectent la qualité de l'eau non traitée avant son traitement.

L'année 2021 : qualité mauvaise

L'année 2021 montre une baisse significative de la qualité, affichant un QE de seulement 25.3.

Cette détérioration peut s'expliquer par diverses causes :

- un problème ou une surcharge des équipements de la station ;
- une hausse des contaminants dans les eaux usées qui pénètrent la station ;
- des éléments externes tels que des conditions climatiques défavorables (des pluies diluant les eaux usées, ce qui entraîne une charge polluante plus complexe à traiter).

1.3 Évaluation de l'efficacité du traitement

L'évolution des QE indique que l'efficacité du traitement varie d'une année à l'autre. L'examen des performances des unités de traitement (comme la décantation, la filtration et les traitements biologiques) pourrait permettre de déterminer les phases qui sont les plus sensibles aux fluctuations de la contamination.

L'amélioration observée en 2022 indique que des modifications ont été apportées au processus de traitement, ou bien que la qualité de l'eau brute alimentant la station s'est améliorée.

2. Évaluation saisonnière de la qualité de l'eau (2020-2022)

2.1 Analyse des variations saisonnières

L'analyse saisonnière de la qualité de l'eau à la station d'épuration d'Ain El Houtz, révèle des variations considérables d'une année à l'autre et selon les saisons. Plusieurs éléments, dont les conditions météorologiques, l'efficacité du traitement et les contributions de pollution, ont un impact sur ces fluctuations. L'analyse ci-après explore les tendances observées et suggère des explications possibles.

La figure représente les fluctuations des indices de qualité de l'eau (QE) notées entre 2020 et 2022, ce qui offre une représentation précise des variations saisonnières et des tendances annuelles.

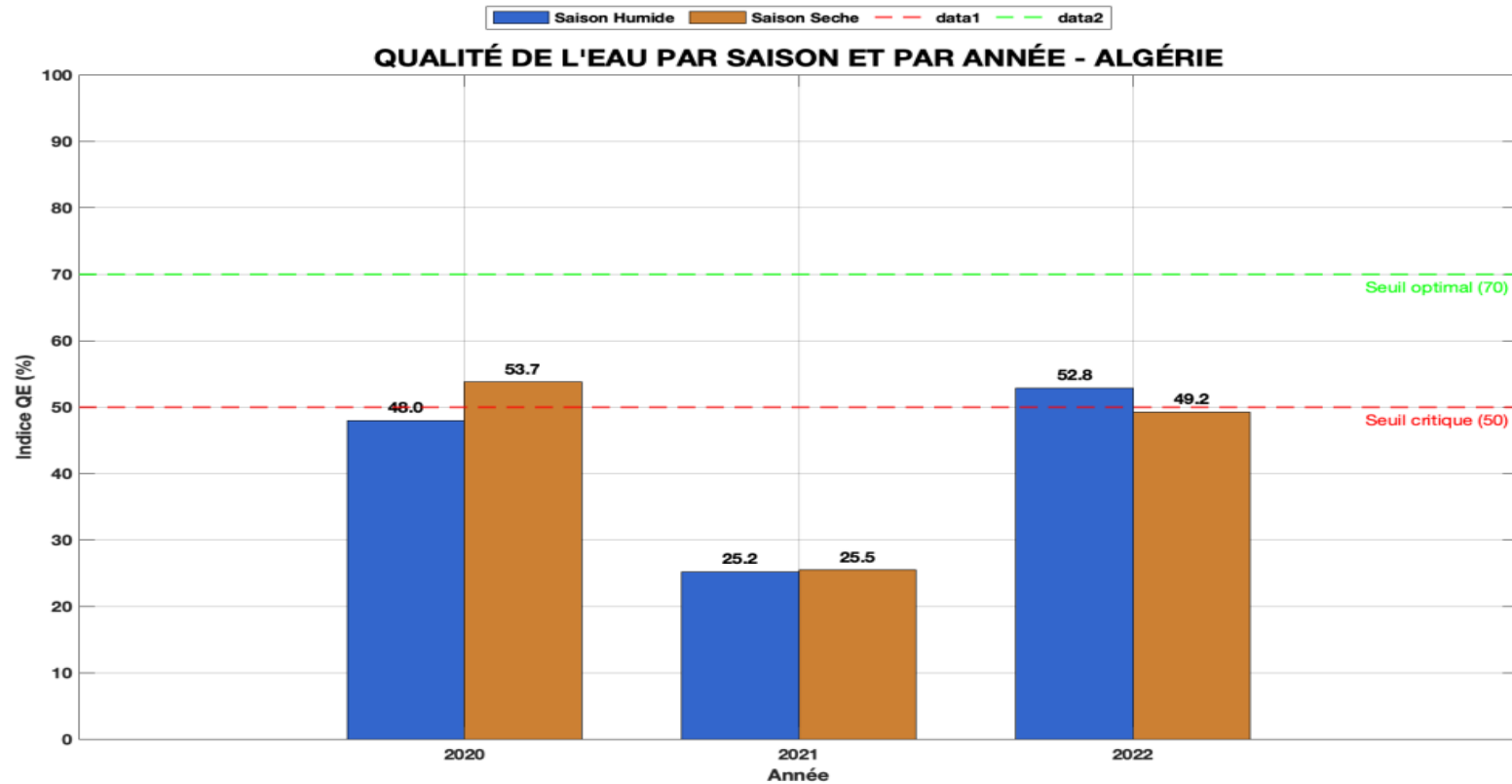


Figure 15 : Évaluation saisonnière de la qualité de l'eau

L'évolution de la qualité de l'eau de la station d'épuration entre 2020 et 2022 montre des variations saisonnières et interannuelles notables :

- **Année 2020** : La qualité de l'eau était mauvaise en saison humide (QE=48.0) et moyenne en saison sèche (QE=53.7).
- **Année 2021** : Forte détérioration, avec des valeurs très faibles en saison humide (QE=25.2) et en saison sèche (QE=25.5), indiquant une qualité mauvaise toute l'année.
- **Année 2022** : Une amélioration en saison humide (QE=52.8, qualité moyenne), mais une qualité encore mauvaise en saison sèche (QE=49.2).

2.2 Interprétation des résultats par saison et par année

L'année 2020 : Influence saisonnière légère.

En 2020, les performances du système de traitement varient légèrement selon les saisons. Durant la saison des pluies, la qualité observée est mauvaise (QE = 48,0), inférieure au seuil critique de 50. Cette dégradation pourrait être liée à une augmentation du flux d'eau induite par les précipitations, compliquant la régulation hydraulique et perturbant l'équilibre des procédés de traitement.

En revanche, en saison sèche, la qualité s'améliore sensiblement (QE = 53,7, correspondant à une qualité moyenne). L'absence de pluies importantes limite les perturbations hydrauliques et réduit l'apport de polluants issus du ruissellement, ce qui favorise un fonctionnement plus stable et performant du système d'épuration.

L'année 2021 : Qualité constamment mauvaise

En 2021, la qualité se dégrade indépendamment de la saison :

Les performances de la station d'épuration se révèlent constamment insuffisantes, indépendamment de la saison. Durant la période humide, une qualité très faible (QE = 25,2) met en évidence une incapacité du système à faire face aux apports hydrauliques importants. Cette surcharge, induite par les précipitations, réduit significativement le temps de séjour des effluents dans les unités de traitement, limitant ainsi l'efficacité des étapes épuratoires.

Parallèlement, la baisse des concentrations en polluants impacte les traitements biologiques, qui nécessitent une charge organique minimale pour maintenir l'activité de la biomasse. En cas de sous-alimentation, les micro-organismes se retrouvent en situation de stress ou d'inactivité, entraînant une réduction drastique de la dépollution. Les procédés physico-chimiques peuvent également être affectés, leur rendement étant tributaire d'une concentration suffisante en composés cibles pour assurer la précipitation, la coagulation ou l'adsorption.

Durant la saison sèche, la qualité ne s'améliore pas (QE = 25,5), révélant un dysfonctionnement structurel du système. Contrairement aux tendances habituelles où les faibles débits favorisent le traitement, les résultats suggèrent un défaut persistant d'exploitation. Cette situation pourrait résulter de facteurs tels qu'une accumulation de matières dans les ouvrages, une défaillance technique (panne, colmatage, usure des équipements), ou une augmentation inhabituelle de la charge polluante à l'entrée. Dans l'ensemble, ces données traduisent un déficit global de performance nécessitant une réévaluation technique du dispositif de traitement

L'année 2022 : Amélioration en saison humide, mais difficulté en saison sèche

Durant la saison humide, une qualité de l'eau intermédiaire de 52,8 indique une amélioration tangible des performances épuratoires par rapport aux campagnes antérieures, où les valeurs observées étaient sensiblement plus faibles. Cette progression pourrait témoigner d'une dynamique d'optimisation du fonctionnement de la station, pouvant inclure des ajustements techniques tels qu'un meilleur contrôle du débit d'entrée, une régulation affinée du temps de séjour, ou l'amélioration des étapes de prétraitement. Il est également possible que des facteurs externes, tels qu'une évolution des caractéristiques physico-chimiques des eaux brutes ou une meilleure gestion des rejets à la source, aient contribué à cette performance accrue. Cette tendance suggère que des efforts en matière de gestion opérationnelle ont commencé à porter leurs fruits, mais que des marges de progression subsistent pour atteindre un niveau de rendement satisfaisant, en particulier face aux contraintes hydrauliques saisonnières.

Contrairement aux observations enregistrées en 2020, où la période sèche s'était traduite par une amélioration des performances de traitement, la saison sèche actuelle présente une qualité de l'eau (QE) de 49,2, positionné légèrement en dessous du seuil critique. Cette dégradation relative de la qualité suggère une régression des performances épuratoires dans un contexte de faible débit, généralement favorable au traitement.

Cette situation peut traduire un dysfonctionnement structurel du système ou une perte d'efficacité dans la gestion opérationnelle, notamment en l'absence de régulation fine adaptée à des charges hydrauliques plus basses. Il est également possible que des facteurs comme le colmatage des unités de filtration, le vieillissement des équipements, ou une réduction de la biomasse active soient en jeu, compromettant ainsi l'efficacité globale du traitement pendant les périodes de sécheresse.

3. Évaluation mensuelle de la qualité de l'eau

3.1 Analyses des résultats

L'évaluation mensuelle de la qualité des eaux épurées à la station d'Aïn El Houtz a été effectuée sur une période de plusieurs années (2020, 2021 et 2022) en utilisant la logique floue. Cette méthode rend possible l'évaluation mensuelle des performances de l'épuration des eaux usées à travers un indice de qualité QE. Les résultats ci-dessous (figure 16) indiquent une variation notable de la qualité des rejets, mettant en évidence des phases de performance insatisfaisante et des progrès graduels au cours des années.

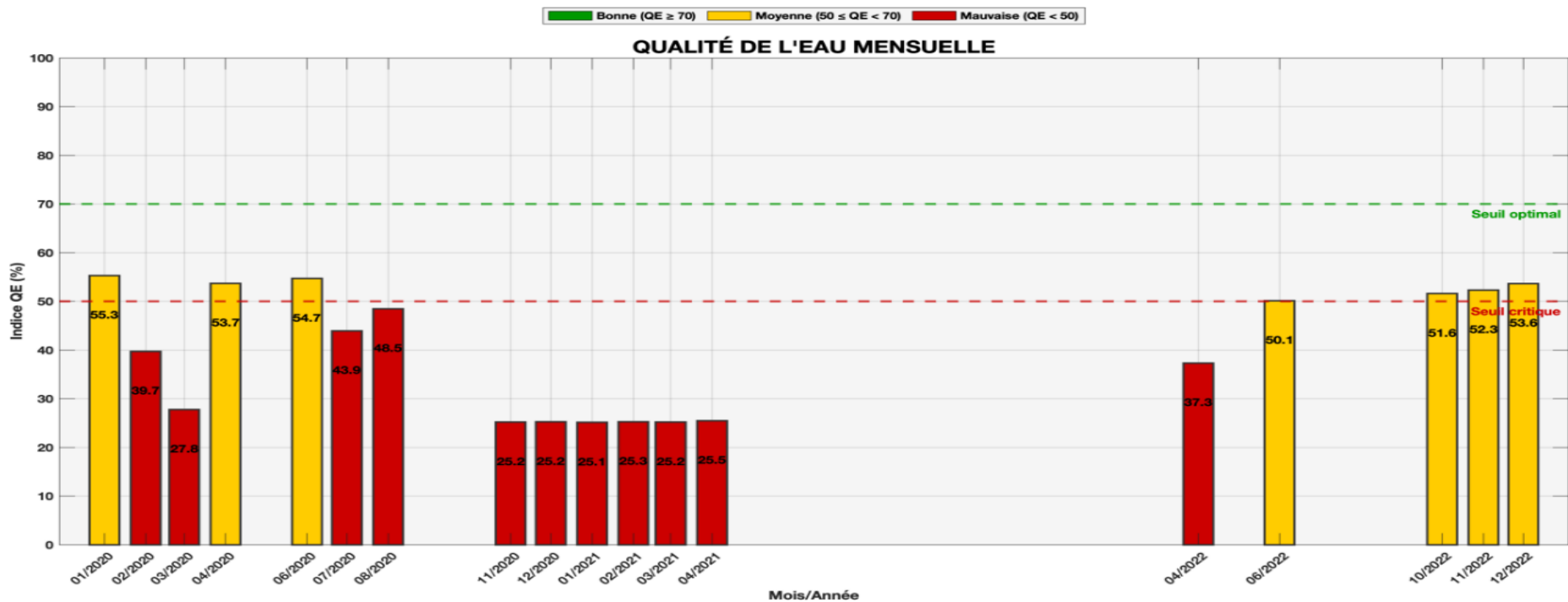


Figure 16: Évaluation mensuelle de la qualité de l'eau

- **Année 2020** : La qualité de l'eau fluctue fortement, avec des périodes de qualité mauvaise prédominantes (février, mars, juillet, août, novembre, décembre). Seuls janvier, avril, juin présentent une qualité moyenne. Cela pourrait indiquer une instabilité du système de traitement.
- **Année 2021** : La qualité reste constamment mauvaise sur tous les mois observés, ce qui pourrait signifier un problème persistant dans le processus de traitement de l'eau ou une pollution accrue des eaux usées entrantes.
- **Année 2022** : L'amélioration progressive de la qualité est notable à partir de juin, avec des valeurs atteignant le seuil de la qualité moyenne en plusieurs mois (juin, octobre, novembre, décembre). Ce phénomène peut être attribué à une amélioration des processus de traitement ou à des changements dans les sources de pollution.

3.2 Interprétation des résultats mensuelle

Année 2020 : Forte variabilité et qualité globalement mauvaise

- La qualité de l'eau montre de fortes fluctuations avec une alternance entre des mois mauvais (février, mars, juillet, août, novembre, décembre) et moyens (janvier, avril, juin).
- Cette instabilité pourrait être due à des variations saisonnières, à une charge polluante irrégulière, ou à des problèmes de performance du traitement.
- L'efficacité de la station semble insuffisante pour assurer une qualité d'eau stable sur l'année.

Année 2021 : Dégradation persistante

- La qualité de l'eau est restée mauvaise toute l'année, sans aucune amélioration notable.
- Ce résultat soulève des questions sur la capacité réelle du traitement à gérer les charges polluantes, suggérant une éventuelle saturation du système ou un manque d'entretien des équipements.
- Une évaluation approfondie des paramètres physico-chimiques et des conditions d'exploitation est essentielle pour identifier les causes de cette dégradation constante.

Année 2022 : Légère amélioration

- À partir de juin 2022, on observe une amélioration progressive avec une qualité moyenne qui se maintient jusqu'en décembre.
- Cette tendance pourrait s'expliquer par une optimisation du processus de traitement, une réduction des charges polluantes, ou une meilleure gestion des rejets industriels et domestiques.
- L'analyse des variations des paramètres physico-chimiques en parallèle pourrait aider à mieux comprendre cette évolution positive.

4. Validation des résultats

Tableau 20 : Données d'entrée (moyennes janvier)

| Paramètre | Valeur | Plage |
|------------------|---------------|--------------|
| DBO ₅ | 8.25 | [0, 100] |
| DCO | 25.0 | [0, 300] |
| O ₂ | 4.80 | [0, 10] |
| pH | 7.505 | [6.5, 9.5] |
| NO ₃ | 0.95 | [0, 50] |
| PO ₄ | 2.95 | [0, 10] |
| Température | 10.56 | [10, 40] |

Fuzzification des données d'Entrée (moyennes janvier)

Voici les formules utilisées :

Si $x \in [a, b]$ (branche croissante) :

$$\mu = \frac{x - a}{b - a} \dots \text{Équation (9)}$$

Si $x \in [b, c]$ (branche décroissante) :

$$\mu = \frac{c - x}{c - b} \dots \text{Équation (10)}$$

Si $x \notin [a, c]$: $\mu = 0$.

Pour DBO5 = 8.25 mg/L

Fonction "Bonne" [0 10 20]

8.25 mg/L ∈ Branche croissante (0→10)

$$\mu = \frac{8.25 - 0}{10 - 0} = 0.825$$

- Autres catégories : 0

Pour O2 = 4.80 mg/L

Fonction "Moyenne" : [3 5 7]

4.80 mg/L ∈ Branche croissante (3→5) :

- $\mu = \frac{4.80 - 3}{5 - 3} = 0.9$

Fonction "Mauvaise" : [0 2 5]

- 4.80 mg/L ∈ Branche décroissante (2→5) :

- $\mu = \frac{5 - 4.80}{5 - 2} = 0.067$

Pour la DCO = 25.0 mg/L

Fonction "Bonne" : [0 30 60]

25.0 mg/L ∈ [0, 30] → Branche croissante

$$\mu = \frac{25.0 - 0}{30 - 0} = 0.833$$

pH = 7.505

Fonction "Neutre" : [7.0 7.5 8.5]

7.505 ∈ Branche décroissante (7.5→8.5)

$$\mu = \frac{8.5 - 7.505}{8.5 - 7.5} = 0.995$$

NO₃ = 0.95 mg/L

Fonction "Bonne" : [0 5 10]

0.95 mg/L ∈ Branche croissante (0→5)

$$\mu = \frac{0.95 - 0}{5 - 0} = 0.19$$

PO₄ = 2.95 mg/L

Fonction "Moyenne" : [0.8 2 4]

2.95 mg/L ∈ Branche décroissante (2→4)

$$\mu = \frac{4 - 2.95}{4 - 2} = 0.525$$

Température = 10.56°C

Fonction "Bonne" : [10 15 20]

10.56°C ∈ Branche croissante (10→15)

$$\mu = \frac{10.56 - 10}{15 - 10} = 0.112$$

Tableau 21 : Résultats après fuzzification de tous les paramètres

| Paramètre | Bonne (μ) | Moyenne (μ) | Mauvaise (μ) |
|-------------------------------|-----------------|-------------------|--------------------|
| DBO ₅ | 0.825 | 0 | 0 |
| DCO | 0.833 | 0 | 0 |
| O ₂ | 0 | 0.9 | 0.067 |
| NO ₃ ⁻ | 0.19 | 0 | 0 |
| PO ₄ ³⁻ | 0 | 0.525 | 0 |
| pH | 0 | 0.995 | 0 |
| Température | 0.112 | 0 | 0 |

- **Application des règles**

Règle 1 : Danger Sanitaire (Pollution Organique Critique)

- Si DBO₅ est Mauvaise ET DCO est Mauvaise Alors QE est Mauvaise
 - DBO₅ Mauvaise : $\mu = 0$
 - DCO Mauvaise : $\mu = 0$

$\min(0, 0) = 0 \rightarrow$ Non activée (les deux paramètres sont bons)

Règle 2 : "Si DBO₅ ET DCO ET O₂ ET NO₃ sont Bons \rightarrow QE Bonne "

- $\mu = \min(0.825, 0.833, 0, 0.19) = 0$ (non activée, car O₂ n'est pas Bon).

Règle 3 : "Si O₂ Mauvaise \rightarrow QE Mauvaise "

- $\mu = 0.067$
- Contribution : QE = (Mauvaise) avec poids 0.067.

Règle 4 : "Si Tous Moyens \rightarrow QE Moyenne "

- $\mu = \min(0, 0, 0.9, 0, 0.525, 1.0, 0) = 0$ (non activée).

Règle 5 : "Si DBO₅ ET DCO sont Bons ET O₂ Moyen \rightarrow QE Moyenne "

- $\mu = \min(0.825, 0.833, 0.9) = 0.825$
- Contribution : QE = (Moyenne) avec poids 0.825.

Règle 6 : "Si DBO₅ ET DCO sont Moyens ET O₂ ET NO₃ Bons \rightarrow QE Moyenne "

- $\mu = \min(0, 0, 0.9, 0.19) = 0$ (non activée, DBO₅/DCO pas Moyens).

Règle 7 : Bonnes Conditions de Base (autres paramètres ignorés)

- Si DBO5, DCO, O2 et NO3 sont Bons
- Alors QE est Bonne (même si PH, PO4 ou Température sont médiocres)

Identique à Règle 2 → $\min(0.825, 0.833, 0, 0.19) = 0$ Non activée

✓ **Identifions les Points d'Activation**

Avec notre fonction de sortie pour QE :

- **Mauvaise** : [0, 30, 50] → Centre = 30, $\mu(30) = 0.067$ (de la Règle 3)
- **Moyenne** : [40, 60, 80] → Centre = 60, $\mu(60) = 0.825$ (de la Règle 5)
- **Bonne** : [70, 90, 100] → Non activée ($\mu = 0$)

Défuzzification : Appliquons la Formule du centre de gravité :

$$QE = \frac{\sum_{i=1}^n yi \cdot \mu(yi)}{\sum_{i=1}^n \mu(yi)}$$

Numérateur :

$$\sum (yi \cdot \mu(yi)) = (30 \times 0.067) + (60 \times 0.825) + (90 \times 0) = 2.01 + 49.5 + 0 = 51.51$$

Dénominateur :

$$\sum \mu(yi) = 0.067 + 0.825 + 0 = 0.892$$

Calcul Final :

$$QE = \frac{51.51}{0.892} = 57.7$$

Les résultats obtenus indiquent une qualité moyenne de l'eau avec un indice QE de 57.7 et une validation confirmée par MATLAB (QE = 55.3 qualité moyenne). Cette cohérence renforce la fiabilité de l'analyse et valide la méthodologie employée.



**CONCLUSION ET
RECOMMANDATIONS**

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'évaluation de la qualité des eaux traitées par la STEP d'Ain El Houtz a permis d'analyser l'évolution des paramètres clés tels que la DBO₅, la DCO, l'O₂, le pH, les nitrates (NO₃⁻), les phosphates (PO₄³⁻) et la température sur différentes périodes : mensuelle, annuelle et saisonnière. Les résultats obtenus ont révélé des fluctuations significatives en fonction des saisons, mettant en évidence l'impact des variations de température et des charges polluantes sur l'efficacité du traitement. L'application de la logique floue a offert une approche plus souple et précise pour interpréter les variations des paramètres de qualité de l'eau, facilitant ainsi l'identification des tendances et des seuils critiques. Cette méthodologie a permis de mieux cerner les insuffisances du traitement et d'apporter des pistes d'amélioration pour optimiser la performance de la STEP.

Ainsi, cette étude contribue à une meilleure compréhension des dynamiques de la qualité de l'eau épurée et propose des outils d'analyse avancés pour renforcer la gestion des infrastructures de dépollution. L'optimisation de ces stations constitue un enjeu majeur dans le contexte algérien où les ressources hydriques sont limitées et soumises à des pressions environnementales croissantes. Afin d'améliorer la gestion et l'efficacité de la STEP d'Ain El Houtz, plusieurs recommandations peuvent être formulées.

Tout d'abord, il est essentiel d'optimiser les paramètres de traitement en ajustant les cycles d'aération et de décantation en fonction des variations saisonnières des polluants, ce qui permettrait d'améliorer l'efficacité du processus de purification. Un suivi en temps réel des indicateurs clés doit être mis en place afin d'adapter les interventions aux fluctuations des charges polluantes. Une révision de la gestion des boues est également nécessaire pour limiter l'accumulation de matières organiques et optimiser l'efficacité du traitement biologique. Par ailleurs, la formation du personnel à l'utilisation des outils d'analyse avancée contribuerait à une meilleure gestion des opérations de traitement.

Ensuite, une application approfondie de la logique floue permettrait de perfectionner le suivi et l'interprétation des données. Il serait bénéfique de développer un modèle prédictif basé sur la logique floue afin d'anticiper les variations de la qualité de l'eau en fonction des saisons. L'intégration de paramètres supplémentaires, tels que la turbidité et la conductivité, enrichirait

l'évaluation de la performance du traitement et apporterait une vision plus globale de la qualité des eaux épurées.

Enfin, le renforcement de la surveillance et des réglementations est indispensable pour garantir une gestion efficace des ressources hydriques. Il serait opportun d'harmoniser les normes de qualité de l'eau avec les recommandations internationales afin de garantir une conformité accrue aux exigences environnementales. De plus, une sensibilisation des parties prenantes, notamment les gestionnaires de STEP et les autorités locales, à l'importance des analyses avancées et des outils innovants pour la gestion des eaux usées favoriserait une approche plus rigoureuse et efficace.

L'application de ces recommandations permettra d'améliorer la gestion et la performance des stations d'épuration en Algérie, tout en favorisant une approche plus précise et flexible grâce à la logique floue. À travers cette étude, une avancée significative est réalisée dans l'optimisation du traitement des eaux usées, contribuant ainsi à une gestion durable des ressources hydriques et à la préservation de l'environnement.



RÉFÉRENCES

RÉFÉRENCES

- **Abdelmoumene, H., 2025.** *Estimation du degré de performance d'une station d'épuration par le processus d'analyse.* Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, Algérie.
- **Adriaenssens, V., De Baets, B., Goethals, P.L.M. & De Pauw, N., 2004.** Fuzzy rule-based models for decision support in ecosystem management. *Science of the Total Environment.*
- **AFNOR, 2004.** Norme NF T90-350 : Qualité de l'eau – Détermination de l'indice biologique global normalisé (IBGN).
- **Agendia, P.L., Fonkou, T., Sonwa, D., Mefenya, R., Kengne, N.I. & Zambo, A.J.M., 2000.** Collecte, épuration et évacuation d'eaux usées dans les lotissements SIC And Economic Appraisal. In: *Amley Inter Sciences, ELBS*, pp. 241-263.
- **Arnold, J.G., et al., 2012.** SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), pp. 1491-1508.
- **Attab, S., 2011.** *Amélioration de la qualité microbiologique des eaux épurées par boues activées de la station d'épuration Haoud Berkaoui par l'utilisation d'un filtre à sable.* Mémoire de Magister, Université Kasdi Merbah-Ouargla.
- **Banque mondiale, 2019.** *Quality Unknown: The Invisible Water Crisis.* Washington, DC : Banque mondiale.
- **Baumont et al., 2004.** Caractéristique des eaux usées et qualité microbiologique.
- **Bekkouche, S., et al., 2017.** Assessment of water quality in the Oued El Harrach river (Algeria) using physicochemical and biological parameters. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(9), p. 449.
- **Belhadj, M.Z., Boudoukha, A. & Mezedjri, L., 2011.** Qualité des eaux de surface et leur impact sur l'environnement dans la wilaya de Skikda (Nord-Est de l'Algérie). *Revue Européenne de Recherche Scientifique*, 56(2), pp. 204-211.
- **Belkhiri, L. et al., 2010.** Hydrochemical Analysis and Evaluation of Groundwater Quality in El Eulma Area, Algeria. *Asian Journal of Chemistry.*
- **Benslimane, A., 2001.** Impact des activités agricoles sur la qualité des eaux. *Revue des Sciences de l'Eau*, 14(2), pp. 123-135.
- **Bhargava, D.S., 1983.** Use of a water quality index for river classification and zoning of Ganga River. *Environmental Pollution Series B, Chemical and Physical.*

- **Bilotta, G.S. & Brazier, R.E., 2008.** Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota. *Water Research*, 42(12), pp. 2849-2861.
- **Boutin Catherine et al., 2009.** *Technologies d'épuration en vue d'une réutilisation des eaux usées traitées (REUT)*. Rapport final, Novembre.
- **Boutoux, J., 1983.** *Traitement des eaux usées urbaines*. Paris : Éditions Eyrolles.
- **Bouزيد, M., et al., 2018.** Évaluation de la qualité microbiologique des eaux de surface dans la région de Tizi Ouzou. *Revue des Sciences de l'Eau*, 31(2), pp. 145-156.
- **Brett, M.T., 2017.** The Impact of Temperature on Aquatic Ecosystems. *Environmental Reviews*, 25(2), pp. 115-123.
- **Brown, R.M., McClelland, N.I., Deininger, R.A. & Tozer, R.G., 1970.** A water quality index: Do we dare? *Water & Sewage Works*, 117(10), pp. 339-343.
- **Camargo, J.A. & Alonso, Á., 2006.** Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: A global assessment. *Environment International*, 32(6), pp. 831-849.
- **Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME), 2001.** *Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life*.
- **CCME, 2004.** *Canadian Water Quality Guidelines*. Winnipeg, Canada.
- **Capizzi & Schwartzbrod, 1998.** Helminth egg concentration in wastewater: influence of rainwater. *Water Science & Technology*, 38(12), pp. 77–82.
- **Chapman, D., 1996.** *Water Quality Assessments: A Guide to the Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring*. 2nd Edition, UNESCO/WHO/UNEP.
- **Crites, R. & Tchobanoglous, G., 1998.** *Small and Decentralized Wastewater Management Systems*. McGraw-Hill, New York.
- **Cuthbert, R.W., et al., 1993.** The role of humic substances in the coloration of natural waters. *Environmental Science & Technology*, 27(2), pp. 342-349.
- **Davies-Colley, R.J. & Smith, D.G., 2001.** Turbidity, suspended sediment, and water clarity: A review. *Journal of the American Water Resources Association*, 37(5), pp. 1085-1101.
- **Derjaguin, B. & Landau, L., 1941.** Theory of the stability of strongly charged lyophobic sols.

- **Fashagba, T.S., Bessedik, M., ElSayed, N.B., Abdelbaki, C. & Kumar, N., 2024.** Evaluating the Water Quality of the Keddara Dam (Algeria) Using Water Quality Indices. *Water*, 16(9), p. 1291. DOI : 10.3390/w16091291.
- **Gaid, A., 1984.** *Épuration biologique des eaux usées urbaines*. Tom 1, Édition OPU, Alger, pp. 261.
- **Garcia, L., et al., 2020.** IoT-based water quality monitoring systems: A review. *Sensors*, 20(22), pp. 1-25.
- **Gaye, M. & Niang, S., 2002.** *Épuration extensive des eaux usées pour leur réutilisation dans l'agriculture urbaine : des technologies appropriées en zone sahélienne pour la lutte contre la pauvreté*. Études et recherches, Dakar, p. 17.
- **Ghettas, A., 2009.** *Gestion des eaux usées et protection de l'environnement*. Éditions Universitaires Européennes.
- **Gomella, C. & Guerree, J., 1978.** *Traitement des eaux usées urbaines*. Éditions Eyrolles.
- **Haddouche, I., et al., 2021.** Challenges in monitoring emerging contaminants in Algeria. *Journal of Environmental Management*, 280, p. 111-120.
- **Hadji, R., et al., 2010.** Étude de la qualité des eaux de surface dans la région de l'Est algérien. *Revue des Sciences de l'Eau*, 23(3), pp. 245-256.
- **Hamed, Y., Redhaounia, B., Sâad, A., Hadji, R., Zahri, F. & Zighmi, K., 2017.** Hydrothermale eaux de l'aquifère karstique : étude de cas du bassin de Trozza (Tunisie centrale). *Journal of Téthys*, 5(1), pp. 33-44.
- **Hazen, R.M., 2013.** *The Story of Earth: The First 4.5 Billion Years*. Viking Press.
- **Hellendoorn, H. & Thomas, C., 1993.** Defuzzification in fuzzy controllers. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 1(2), pp. 109-123.
- **Hernández, V. A., 2023.** An overview of surface forces and the DLVO theory.
- **Hilsenhoff, W.L., 1987.** An improved biotic index of organic stream pollution. *The Great Lakes Entomologist*, 20(1), pp. 31-39.
- **Horton, R.K., 1965.** An index-number system for rating water quality. *Journal of Water Pollution Control Federation*, 37(3), pp. 300-306.
- **Howard, G. & Stephen, P., 2003.** Risk factors contributing to microbiological contamination of shallow groundwater in Kampala, Uganda. *Water Research*, 37, pp. 3421-3429.

- **Hua, S., et al., 2020.** Can groundwater be protected from the pressure of urban growth in China? *Environment International*, 143, p. 105911.
- **Hutton, G., Haller, L. & Bartram, J., 2007.** Economic and health effects of increasing coverage of low-cost household drinking-water supply and sanitation interventions. *World Health Organization*.
- **Icaga, Y., 2007.** Fuzzy evaluation of water quality classification. *Ecological Indicators*, 7(3), pp. 710-718.
- **Jang, J.-S.R. & Gulley, N., 1997.** *Fuzzy Logic Toolbox for Use with MATLAB: User's Guide Version 1*. The MathWorks.
- **Kengne, I.M., Amougou, A., Soh, E.K., Tsama, V., Ngoutane, M.M., Dodane, P.H. & Kone, D., 2008.** Effects of fecal sludge application on growth characteristics and chemical composition of *Echinochloa pyramidalis* (Lam). Hitch. and Chase and *Cyperus papyrus* L. *Ecological Engineering*, 34(3), pp. 233-242.
- **Kettab, A., et al., 2019.** Gestion des ressources en eau en Algérie : Défis et perspectives. *Journal of Water Resource and Protection*, 11(3), pp. 321-335.
- **Klir, G.J. & Yuan, B., 1995.** *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications*. Prentice Hall.
- **Ladjel, S., 2006.** *Étude de la qualité des eaux usées et des boues résiduaires dans les stations d'épuration*. Thèse de doctorat, Université de Tlemcen.
- **Lermontov, A., Yokoyama, L. & Lermontov, M., 2009.** River quality analysis using fuzzy water quality index : Ribeira do Iguape river watershed, Brazil. *Ecological Indicators*, 9(6), pp. 1188-1197.
- **Li, M., et al., 2013.** Application of fuzzy logic in water quality management: A case study of a river basin. *Journal of Hydrology*.
- **Li, P., Wu, J. & Qian, H., 2019.** Water quality assessment and apportionment of pollution sources using multivariate statistical techniques: A case study of the Laixi River, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(6), p. 365.
- **Lu, W., Wang, D. & Chen, Q., 2011.** Fuzzy logic-based air quality assessment. *Environmental Modelling & Software*.
- **Mamdani, E.H. & Assilian, S., 1975.** An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7(1), pp. 1-13.
- **Margot, J., et al., 2013.** Treatment of micropollutants in municipal wastewater: Ozone or powdered activated carbon? *Science of the Total Environment*.

- **Marsalek, J., Rochfort, Q., Brownlee, B., Mayer, T. & Servos, M., 1999.** An exploratory study of urban runoff toxicity. *Water Science and Technology*, 39(12), pp. 33-39.
- **Martin, G., 1979.** *Le problème de l'azote dans les eaux*. Éd. Technique et Documentation, Paris, pp. 279.
- **MathWorks, 2023.** *Fuzzy Logic Toolbox™ User's Guide*. Natick, MA: The MathWorks, Inc.
- **Mbog, M.S., 2013.** *Évaluation de la gestion des déchets liquides hospitaliers : cas des eaux usées du Centre Hospitalier Universitaire (CHU) de Yaoundé*. Mémoire de Master Professionnel en Sciences de l'Environnement, Université de Yaoundé I, pp. 41.
- **Mekkaoui, A. & Hamdi, M., 2006.** La pollution des eaux : sources, impacts et solutions. *Revue des Sciences de l'Eau*, 19(3), pp. 245-260.
- **Metcalf & Eddy, 2014.** *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. 5th Edition, McGraw-Hill Education.
- **Millennium Ecosystem Assessment (MEA), 2005.** *Ecosystems and Human Well-being: Wetlands and Water*. Synthesis. Washington, DC: World Resources Institute.
- **Ministère algérien des Ressources en Eau, 2020.** *Rapport de planification des ressources en eau*. Direction Générale des Barrages et des Ressources en Eau.
- **Nadir, M. & Boualem, R., 2016.** Étude de la pollution du barrage de Beni Haroun (Algérie). *Dessalinisation et Traitement de l'Eau*, 57(6), pp. 2766-2774.
- **Nasiri, F., et al., 2007.** Fuzzy logic-based approach for groundwater quality assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*.
- **Neama, M. A., Attia, M., Negm, A., & Nasr, M., 2020.** Overview of Water Resources, Quality, and Management in Algeria.
- **Negm, A. M., Bouderbala, A., Chenchouni, H., & Barceló, D., 2020.** *Water Resources in Algeria - Part I: Assessment of Surface and Groundwater Resources*.
- **Nichane, M. & Khelil, M.A., 2014.** Changements climatiques et ressources en eau en Algérie : vulnérabilité, impact et stratégie d'adaptation. *Revue des BioRessources*, 4(2), pp. 1-7.
- **Noble & Fuhrman, 1997.** Virus Decay and Its Causes in Coastal Waters. *Applied and Environmental Microbiology*, 63(1), pp. 77-83.

- **Novotny, V., 2003.** *Water Quality: Diffuse Pollution and Watershed Management.* John Wiley & Sons.
- **Nozari, V., & Ebrahimi, S., 2011.** Irrigation water quality evaluation using adaptive network-based fuzzy inference system. *Environmental Monitoring and Assessment*, 175(1-4), pp. 1-16.
- **Ocampo-Duque, W., et al., 2006.** Assessing water quality in rivers with fuzzy inference systems: A case study. *Environment International*.
- **OECD, 2020.** *Water Quality and Agriculture: Improving Policy Coherence.* Paris: OECD Publishing.
- **OMS, 1989.** *L'utilisation des eaux usées en agriculture et en aquaculture : recommandations sanitaires.* Organisation Mondiale de la Santé, Genève, pp. 17-60.
- **OMS, 2012.** *Lignes directrices pour la qualité de l'eau potable.* 4ème éd., ISBN 978-92-4-154815-1.
- **OMS, 2019.** *Guidelines for Drinking-water Quality (4th ed.).* Genève : World Health Organization.
- **ONA, 2013.** *Fiche technique de la STEP d'Ain El Houtz.*
- **ONA, 2006,** Office nationale de l'assainissement de Tlemcen.
- **Organisation Mondiale de la Santé (OMS), 2017.** *Guidelines for Drinking-water Quality.*
- **Pasteur, L., 1864.** *Études sur le vin, ses maladies, causes qui les provoquent.* Imprimerie impériale.
- **Pimentel, D., Acquay, H., Biltonen, M., Rice, P., Silva, M., Nelson, J., & D'Amore, M., 1992.** Environmental and economic costs of pesticide use. *BioScience*, 42(10), pp. 750-760.
- **Rejsek, F., 2002.** *Analyse des eaux : Aspects réglementaires et techniques.* Scéren (CRDP AQUITAINE), Coll. Biologie technique, pp. 360.
- **Rodier, J., 1996.** *L'Analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer.* 8e édition, Dunod.
- **Rodier, J., Bazin, C., Broutin, J.P., Chambon, P., Champsaur, H. & Rodi, L., 2005.** *L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer.* Éditions Dunod, Paris.
- **Rodier, J., Legube, B. & Merlet, N., 2005.** *L'analyse de l'eau.* Éditions Dunod, Paris.
- **Rodier, J., et al., 2009.** *L'analyse de l'eau (9e éd.).* Éditions Dunod, Paris.

- **Rosenberg, D.M. & Resh, V.H., 1993.** *Freshwater Biomonitoring and Benthic Macroinvertebrates*. Chapman & Hall, New York.
- **Ross, T.J., 2010.** *Fuzzy Logic with Engineering Applications* (3rd ed.). Wiley.
- **Saadi, S., et al., 2020.** Pollution des eaux de surface par les métaux lourds dans la région de Constantine. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(4), pp. 1-12.
- **Sadiq, R. & Rodriguez, M.J., 2004.** Fuzzy synthetic evaluation of disinfection by-products: A risk-based indexing system. *Journal of Environmental Management*, 73(1), pp. 1-13.
- **Sahnoun, A.Y., 2010.** *Caractérisation et valorisation des boues des stations d'épuration des eaux usées*. USTO-MB, Oran, pp. 159.
- **Salcedo-Sánchez, E.R., Garrido Hoyos, S.E., Esteller Alberich, M. & Martínez Morales, M., 2016.** Application de l'indice de qualité de l'eau pour évaluer la qualité des eaux souterraines d'un aquifère intensément exploité (vallée de Puebla, Mexique). *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(10), pp. 1-20.
- **Schwarzenbach, R.P., Egli, T., Hofstetter, T.B., von Gunten, U. & Wehrli, B., 2006.** Global water pollution and human health. *Annual Review of Environment and Resources*, 31, pp. 109-136.
- **Shannon, C.E. & Weaver, W., 2010.** *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press.
- **Smith, V.H., et al., 2018.** Eutrophication of freshwater and coastal ecosystems. *Environmental Science & Technology*, 52(18), pp. 102-110.
- **Stokes, G.G., 1851.** On the effect of international friction of fluids on motion.
- **Suffet, I.H., et al., 1999.** *Advances in Taste-and-Odor Treatment and Control*. American Water Works Association.
- **Taylor, R., Aidan, C., et al., 2004.** The implications of groundwater velocity variations on microbial transport and wellhead protection. *FEMS Microbiology Ecology*, 49, pp. 17-26.
- **Tchobanoglous, G., Burton, F. L. et Stensel, H. D. (2014).** *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. McGraw-Hill Education
- **Thomas, O., 1995.** *Métrologie des eaux résiduaires*. Lavoisier Tec & Doc.
- **Trefalt, G., & Borkovec, M., 2014.** Overview of DLVO Theory.
- **UNESCO, 2021.** *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau*. Paris : UNESCO.

- **United Nations, 2020.** *World Water Development Report 2020: Water and Climate Change*. Paris : UNESCO.
- **United Nations Environment Programme (UNEP), 2016.** *A Snapshot of the World's Water Quality: Towards a Global Assessment*.
- **United Nations Environment Programme (UNEP), 2021.** *GEMS/Water Programme: Monitoring Water Quality*.
- **Vandermeersch Sophie, 2005-2006.** *Étude comparative de l'efficacité des traitements d'épuration des eaux usées pour l'élimination des micro-organismes*. Université Libre de Bruxelles.
- **Young, W.F., et al., 1996.** The identification of odorous compounds in water. *Water Science and Technology*, 34(3-4), pp. 33-40.
- **Zadeh, L.A., 1965.** Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), pp. 338-353.
- **Zgheib, S., Moilleron, R. & Chebbo, G., 2012.** Priority pollutants in urban stormwater: Part 1 – Case of separate storm sewers. *Water Research*, 46(20), pp. 6683-6692.
- **Zhang, Y., et al., 2021.** Detection of pharmaceutical residues in wastewater using LC-MS. *Journal of Chromatography A*, 1638, pp. 1-10.



ANNEXES

ANNEXES 1 : Les données de la STEP d'Ain EL Houtz

| Date | Température | DCO | DBO5 | O2 | PH | NO3 | PO4 |
|----------|-------------|-------|-------|------|------|-------|------|
| 1/6/20 | 11.50 | 34.00 | 7.50 | 4.80 | 7.55 | 0.40 | 4 |
| 1/13/20 | 9.62 | 16.00 | 9.00 | 4.80 | 7.46 | 1.50 | 1.9 |
| 2/4/20 | 17.13 | 48.00 | 15.30 | 4.80 | 7.52 | 0.42 | 7.1 |
| 2/11/20 | 16.37 | 68.00 | 17.00 | 4.78 | 7.42 | 0.29 | 9.6 |
| 3/2/20 | 13.88 | 55.00 | 18.00 | 4.77 | 7.42 | 2.40 | 3.9 |
| 3/16/20 | 13.25 | 64.00 | 15.00 | 4.21 | 7.62 | 0.90 | 2.4 |
| 4/3/20 | 22.85 | 23.00 | 8.00 | 4.72 | 7.58 | 1.80 | 4.5 |
| 4/10/20 | 20.75 | 24.00 | 12.00 | 4.72 | 7.41 | 2.70 | 4.7 |
| 6/23/20 | 25.75 | 28.00 | 14.00 | 4.80 | 7.46 | 2.40 | 8.2 |
| 7/12/20 | 20.00 | 57.00 | 16.00 | 4.80 | 7.49 | 1.50 | 3.5 |
| 8/24/20 | 25.00 | 47.00 | 17.00 | 4.67 | 7.63 | 1.80 | 8.6 |
| 11/2/20 | 18.00 | 64.00 | 24.00 | 4.78 | 7.52 | 1.50 | 5.2 |
| 11/9/20 | 16.18 | 32.00 | 18.00 | 4.78 | 7.49 | 1.80 | 9.8 |
| 11/16/20 | 18.93 | 43.00 | 17.00 | 4.72 | 7.46 | 13.80 | 6.2 |
| 11/23/20 | 11.25 | 37.00 | 23.50 | 4.72 | 7.56 | 3.60 | 6.3 |
| 12/7/20 | 12.38 | 40.00 | 15.00 | 4.72 | 7.45 | 1.50 | 3.6 |
| 12/21/20 | 13.23 | 34.00 | 26.00 | 4.71 | 7.51 | 2.60 | 10.3 |
| 12/28/20 | 9.75 | 35.00 | 24.00 | 4.72 | 7.61 | 2.40 | 4.6 |
| 1/3/21 | 10 | 41 | 20 | 4.87 | 7.5 | 2.2 | 4.2 |
| 1/4/21 | 13.12 | 42 | 20 | 4.78 | 7.52 | 2.4 | 4.36 |
| 1/10/21 | 9.75 | 41 | 23 | 4.67 | 7.42 | 2.8 | 6.7 |
| 1/18/21 | 18 | 50 | 26 | 4.89 | 7.59 | 3.6 | 3.11 |
| 1/25/21 | 16.32 | 63 | 35 | 4.75 | 7.45 | 2.1 | 5.6 |
| 2/1/21 | 15 | 65 | 30 | 4.81 | 7.53 | 2.4 | 2.4 |

Évaluation de la qualité des eaux usées épurées par la logique floue

| | | | | | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|------|------|-------|-----|
| 2/8/21 | 14 | 37 | 33 | 4.68 | 7.58 | 6.9 | 3.5 |
| 2/15/21 | 14.13 | 54 | 34 | 4.76 | 7.49 | 12.9 | 5.6 |
| 2/22/21 | 15.75 | 48 | 27 | 4.48 | 7.64 | 14.4 | 9 |
| 3/1/21 | 13.75 | 37 | 24 | 4.7 | 7.45 | 11.3 | 3 |
| 3/2/21 | 16.33 | 35 | 22 | 4.76 | 7.46 | 12.6 | 5 |
| 3/8/21 | 10 | 42 | 26 | 4.75 | 7.52 | 5.8 | 6.9 |
| 3/15/21 | 14.75 | 36 | 16 | 4.79 | 7.42 | 13.2 | 9.8 |
| 3/22/21 | 10 | 32 | 12 | 4.76 | 7.5 | 13.2 | 9 |
| 4/13/21 | 14.75 | 48 | 22 | 4.41 | 7.52 | 0.9 | 5.2 |
| 4/18/21 | 14.5 | 35 | 24 | 4.68 | 7.55 | 1.8 | 2.9 |
| 4/20/21 | 14 | 32 | 18 | 4.12 | 7.43 | 1.2 | 6.4 |
| 4/4/22 | 7.39 | 36 | 16 | 4.4 | 7.39 | 9.9 | 5.1 |
| 4/11/22 | 7.51 | 28 | 11 | 4.62 | 7.51 | 9.3 | 5.2 |
| 4/18/22 | 7.47 | 28 | 30 | 4.68 | 7.47 | 9.2 | 5.2 |
| 6/6/22 | 24.10 | 19.00 | 9.00 | 4.68 | 7.41 | 13.60 | 6 |
| 6/13/22 | 24.40 | 26.00 | 17.00 | 4.67 | 7.48 | 9.30 | 4.7 |
| 6/20/22 | 24.20 | 27.00 | 21.00 | 4.58 | 7.53 | 2.40 | 4.3 |
| 10/3/22 | 21.00 | 34.00 | 17.00 | 4.60 | 7.69 | 12.00 | 2.7 |
| 10/11/22 | 19.00 | 35.00 | 10.00 | 4.67 | 7.66 | 13.20 | 2.6 |
| 10/18/22 | 19.00 | 28.00 | 12.00 | 4.62 | 7.66 | 12.60 | 4.8 |
| 10/25/22 | 23.00 | 43.00 | 17.00 | 4.68 | 7.68 | 11.60 | 7.8 |
| 11/2/22 | 19.00 | 23.00 | 11.00 | 4.72 | 7.68 | 10.40 | 3.2 |
| 11/7/22 | 19.60 | 30.00 | 17.00 | 4.65 | 7.67 | 6.80 | 3.2 |
| 11/14/22 | 17.00 | 23.00 | 15.00 | 4.65 | 7.51 | 7.20 | 2.5 |
| 11/21/22 | 14.00 | 28.00 | 12.00 | 4.68 | 7.61 | 6.80 | 4.1 |
| 12/5/22 | 16.00 | 27.00 | 15.00 | 4.68 | 7.73 | 6.80 | 4.4 |
| 12/12/22 | 16.00 | 28.00 | 16.00 | 4.77 | 7.61 | 6.80 | 5.3 |
| 12/26/22 | 16.00 | 34.00 | 12.00 | 4.83 | 7.56 | 13.20 | 5.6 |

ANNEXES 2 : Le questionnaire pour la pondération

Questionnaire pour l'Évaluation de la Qualité de l'Eau

Introduction

Cher expert,

Dans le cadre de mon mémoire pour l'obtention d'un master en microbiologie et contrôle de qualité portant sur l'évaluation de la qualité des eaux usées épurées d'une station d'épuration à l'aide de la logique floue, je cherche à déterminer la pondération appropriée pour plusieurs paramètres clés. Votre expertise serait extrêmement précieuse pour attribuer un poids à chacun de ces paramètres. Je vous remercie de prendre quelques minutes pour remplir ce questionnaire.

Section 1 : Informations Personnelles

- Faculté :
- Département :
- Spécialité :
- Profession :
- Grade :
- Sexe : Masculin Féminin
- Domaine d'intérêt :

Section 2 : Pondération des paramètres

Pour chaque paramètre listé ci-dessous, veuillez attribuer un poids en pourcentage (%), en fonction de son importance dans l'évaluation de la qualité de l'eau. La somme totale des poids doit être égale à 100%.

1. pH :%
2. Température :%
3. Demande chimique en oxygène (DCO) :%
4. Demande biologique en oxygène (DBO₅) :%
5. Oxygène dissous (DO) :%
6. Conductivité électrique :%

7. MES :%
8. Nitrates (NO₃) :%
9. Phosphates (PO₄) :%
10. Azote total (NT) :%

Section 3 : Consentement

- J'accepte que mes réponses soient utilisées dans le cadre de cette étude académique.

Remerciements

Merci beaucoup pour votre temps et votre contribution à cette recherche. Vos insights sont cruciaux pour l'avancement de cette étude.

Répondant 1

Questionnaire pour l'Évaluation de la Qualité de l'Eau

Introduction

Cher expert,

Dans le cadre de mon mémoire pour l'obtention d'un master en microbiologie et contrôle de qualité portant sur l'évaluation de la qualité des eaux usées épurées d'une station d'épuration à l'aide de la logique floue, je cherche à déterminer la pondération appropriée pour plusieurs paramètres clés. Votre expertise serait extrêmement précieuse pour attribuer un poids à chacun de ces paramètres. Je vous remercie de prendre quelques minutes pour remplir ce questionnaire.

Section 1 : Informations Personnelles

- Faculté / Institut : Sciences et Technologie
- Département : Hydraulique
- Spécialité : Hydraulique
- Profession : Enseignante
- Grade : MCB
- Sexe : Masculin Féminin

- Domaine d'intérêt : Hydrologie- Modélisation.

Section 2 : Pondération des Paramètres

Pour chaque paramètre listé ci-dessous, veuillez attribuer un poids en pourcentage (%), en fonction de son importance dans l'évaluation de la qualité de l'eau. La somme totale des poids doit être égale à 100%.

1. pH : 10 %
2. Température : 5 %
3. Demande chimique en oxygène (DCO) : 15 %
4. Demande biologique en oxygène (DBO₅) : 15 %
5. Oxygène dissous (DO) : 15 %
6. Conductivité électrique : 8 %
7. MES : 12 %
8. Nitrates (NO₃) : 10 %
9. Phosphates (PO₄) : 10 %

Section 3 : Consentement

- J'accepte que mes réponses soient utilisées dans le cadre de cette étude académique.

Remerciements

Merci beaucoup pour votre temps et votre contribution à cette recherche. Vos insights sont cruciaux pour l'avancement de cette étude.

Répondant 2 :

Questionnaire pour l'Évaluation de la Qualité de l'Eau

Introduction

Cher expert,

Dans le cadre de mon mémoire pour l'obtention d'un master en microbiologie et contrôle de qualité portant sur l'évaluation de la qualité des eaux usées épurées d'une station d'épuration à

Évaluation de la qualité des eaux usées épurées par la logique floue

l'aide de la logique floue, je cherche à déterminer la pondération appropriée pour plusieurs paramètres clés. Votre expertise serait extrêmement précieuse pour attribuer un poids à chacun de ces paramètres. Je vous remercie de prendre quelques minutes pour remplir ce questionnaire.

Section 1 : Informations Personnelles

- Faculté : ...Technologie...
 - Département : ...Hydraulique....
 - Spécialité : ...Hydraulique...
 - Profession : ...Enseignant / Chercheur.
 - Grade : MCA
- Sexe : Masculin Féminin
- Domaine d'intérêt : Épuration de l'eau et qualité des eaux ...

Section 2 : Pondération des paramètres

Pour chaque paramètre listé ci-dessous, veuillez attribuer un poids en pourcentage (%), en fonction de son importance dans l'évaluation de la qualité de l'eau. La somme totale des poids doit être égale à 100%.

1. pH : 3 %
2. Température : 5 %
3. Demande chimique en oxygène (DCO) : 30%
4. Demande biologique en oxygène (DBO₅) : 25 %
5. Oxygène dissous (DO) : 15 %
6. Conductivité électrique : 5 %
7. MES : 10 %
8. Nitrates (NO₃) : 5 %
9. Phosphates (PO₄) : 2%

Section 3 : Consentement

- J'accepte que mes réponses soient utilisées dans le cadre de cette étude académique.
-

Remerciements

:

Merci beaucoup pour votre temps et votre contribution à cette recherche. Vos insights sont cruciaux pour l'avancement de cette étude.

Répondant 3

Questionnaire pour l'Évaluation de la Qualité de l'Eau

Introduction

Cher expert,

Dans le cadre de mon mémoire pour l'obtention d'un master en microbiologie et contrôle de qualité portant sur l'évaluation de la qualité des eaux usées épurées d'une station d'épuration à l'aide de la logique floue, je cherche à déterminer la pondération appropriée pour plusieurs paramètres clés. Votre expertise serait extrêmement précieuse pour attribuer un poids à chacun de ces paramètres. Je vous remercie de prendre quelques minutes pour remplir ce questionnaire.

Section 1 : Informations Personnelles

- Faculté : Technologie
- Département : Hydraulique
- Spécialité : Hydraulique
- Profession : Enseignant.
- Grade : MCA
- Sexe : x Masculin Féminin
- Domaine d'intérêt : Sciences de l'eau et de l'environnement
-

Section 2 : Pondération des paramètres

Pour chaque paramètre listé ci-dessous, veuillez attribuer un poids en pourcentage (%), en fonction de son importance dans l'évaluation de la qualité de l'eau. La somme totale des poids doit être égale à 100%.

1. pH : 05 %
2. Température : 04 %
3. Demande chimique en oxygène (DCO) : 18 %
4. Demande biologique en oxygène (DBO₅) : 35 %
5. Oxygène dissous (DO) : 03 %
6. Conductivité électrique : 0 %
7. MES : 15 %
8. Nitrates (NO₃) : 13 %
9. Phosphates (PO₄) : 07 %

Section 3 : Consentement

- J'accepte que mes réponses soient utilisées dans le cadre de cette étude académique.

Remerciements

Merci beaucoup pour votre temps et votre contribution à cette recherche. Vos insights sont cruciaux pour l'avancement de cette étude.

Répondant 4

Questionnaire pour l'Évaluation de la Qualité de l'Eau

Introduction

Cher expert,

Dans le cadre de mon mémoire pour l'obtention d'un master en microbiologie et contrôle de qualité portant sur l'évaluation de la qualité des eaux usées épurées d'une station d'épuration à l'aide de la logique floue, je cherche à déterminer la pondération appropriée pour plusieurs paramètres clés. Votre expertise serait extrêmement précieuse pour attribuer un poids à chacun de ces paramètres. Je vous remercie de prendre quelques minutes pour remplir ce questionnaire.

Section 1 : Informations Personnelles

- Faculté / Institut : Sciences et Technologie
 - Département : Hydraulique
-

- Spécialité : Hydraulique
- Profession : Enseignante
- Grade : MCB
- Sexe : Masculin Féminin
- Domaine d'intérêt : Hydrologie- Modélisation.

Section 2 : Pondération des Paramètres

Pour chaque paramètre listé ci-dessous, veuillez attribuer un poids en pourcentage (%), en fonction de son importance dans l'évaluation de la qualité de l'eau. La somme totale des poids doit être égale à 100%.

1. pH : 10 %
2. Température : 5 %
3. Demande chimique en oxygène (DCO) : 20 %
4. Demande biologique en oxygène (DBO₅) : 15 %
5. Oxygène dissous (DO) : 10 %
6. Conductivité électrique : 8 %
7. MES : 12 %
8. Nitrates (NO₃) : 10 %
9. Phosphates (PO₄) : 10 %

Section 3 : Consentement

- J'accepte que mes réponses soient utilisées dans le cadre de cette étude académique.

Remerciements

Merci beaucoup pour votre temps et votre contribution à cette recherche. Vos insights sont cruciaux pour l'avancement de cette étude.

Répondant 5 :

Questionnaire pour l'Évaluation de la Qualité de l'Eau

Introduction

Cher expert,

Dans le cadre de mon mémoire pour l'obtention d'un master en microbiologie et contrôle de qualité portant sur l'évaluation de la qualité des eaux usées épurées d'une station d'épuration à l'aide de la logique floue, je cherche à déterminer la pondération appropriée pour plusieurs paramètres clés. Votre expertise serait extrêmement précieuse pour attribuer un poids à chacun de ces paramètres. Je vous remercie de prendre quelques minutes pour remplir ce questionnaire.

Section 1 : Informations Personnelles

- Faculté : Technologie
- Département : Hydraulique
- Spécialité : Hydraulique
- Profession : Enseignant chercheur
- Grade : Professeur
- Sexe : Masculin Féminin
- Domaine d'intérêt : Hydraulique urbaine

Section 2 : Pondération des paramètres

Pour chaque paramètre listé ci-dessous, veuillez attribuer un poids en pourcentage (%), en fonction de son importance dans l'évaluation de la qualité de l'eau. La somme totale des poids doit être égale à 100%.

1. pH : 10%
2. Température : 5%
3. Demande chimique en oxygène (DCO) : 20%
4. Demande biologique en oxygène (DBO₅) : 15%
5. Oxygène dissous (DO) : 10%

6. Conductivité électrique : 7%
7. MES : 12%
8. Nitrates (NO₃) : 8%
9. Phosphates (PO₄) : 8%

Section 3 : Consentement

- J'accepte que mes réponses soient utilisées dans le cadre de cette étude académique.

Remerciements

Merci beaucoup pour votre temps et votre contribution à cette recherche. Vos insights sont cruciaux pour l'avancement de cette étude.