

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة 20 أوت 1955 - سكيكدة -

UNIVERSITÉ 20 AOÛT 1955- SKIKDA -



FACULTÉ DES SCIENCES
FILIÈRE DES SCIENCES AGRONOMIQUES
DÉPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES

كلية العلوم
شعبة العلوم الفلاحية
قسم العلوم الفلاحية

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDE

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Sciences Agronomiques

SPÉCIALITÉ : AMÉNAGEMENT HYDRO-AGRICOLE

THÈME

Valorisation des eaux usées traitées de la nouvelle station
d'épuration de la commune de Filfila (wilaya de Skikda).

Présenté par :

Mlle. BENDJAMA Sarra

Mlle. BOURBIA Rayane

Mlle. BOULESNANE Kaoutar

Mlle. KHOUALED Asma

Devant le jury :

Mme. BOUCENNA N

[M.A.A., Univ. 20 Août 1955- SKIKDA]

Présidente

Mme. MELLAL N

[M.C.B., Univ. 20 Août 1955- SKIKDA]

Promotrice

Mme. HAMRAKROUHA S

[M.A.A., Univ. 20 Août 1955- SKIKDA]

Examinatrice

Année universitaire 2024/2025

Remerciements

Louange à **Allah**, le Tout-Puissant, qui nous a accordé la foi, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail. C'est avec une profonde reconnaissance que nous rendons grâce pour sa guidance tout au long de ce parcours.

Nous tenons à exprimer nos plus sincères remerciements à Madame **MELLAL Nour El Houda**, notre encadrante, pour la confiance qu'elle nous a accordée en acceptant de superviser ce projet de fin d'étude. Sa disponibilité, la clarté de ses orientations, ainsi que ses conseils judicieux et ses remarques constructives ont été d'un apport inestimable à la qualité de ce travail. Qu'elle trouve ici l'expression de toute notre gratitude et de notre respect.

Nous remercions également Madame **BOUCENNA Nawel**, qui nous a fait l'honneur de présider le jury de soutenance, ainsi que Madame **HAMRAKROUHA Saïda** pour avoir accepté d'examiner ce mémoire avec bienveillance.

Notre reconnaissance va aussi au personnel de la station d'épuration des eaux usées de la commune de Filfila, wilaya de Skikda, pour leur accueil chaleureux, leur disponibilité et leur précieuse collaboration durant notre stage.

Enfin, nous adressons nos remerciements à toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire, par leur aide technique, administrative, ou leur simple présence encourageante. À toutes et à tous, merci du fond du cœur.

Dédicaces

Louange à Dieu, source de toute sagesse, de toute patience et de toute réussite.

Je dédie ce travail, humble fruit de mes efforts et de mon parcours, à ceux qui ont été les piliers de ma vie.

À ma chère mère Bezzi Souraya,
Lumière de mon cœur, source inépuisable d'amour et de prières silencieuses que chaque mot de ce travail soit une réponse à ton dévouement.

À mon père Bourbia Ilyes,
Pour ta force tranquille, ta présence rassurante et ton soutien constant, même dans les silences.

À mes frères Adel, Ahmed et Mohamed,
Merci d'être ma base, ma force et mon repère à chaque étape de ma vie.

Je tiens aussi à exprimer ma gratitude à mes compagnes de route dans cette aventure universitaire, Sara, Kaoutar et Asma,
Pour votre présence, vos partages, vos encouragements et votre bienveillance.

Et tout particulièrement, à Asma et Nechoua,
Mes précieuses amies, mes confidentes, mes sœurs de cœur, avec qui j'ai partagé les doutes et les joies, les larmes et les rires : ce travail est aussi le vôtre.

À tous ceux qui, de près ou de loin, ont cru en moi,
Recevez ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

RAYANE

Dédicaces

وَقُلْ أَعْمَلُوا فَسَيَرَى اللَّهُ عَمَلَكُمْ وَرَسُولُهُ وَالْمُؤْمِنُونَ” (سورة التوبة، الآية 105)

Louange à Dieu, par Sa grâce les œuvres s’accomplissent, les chemins s’éclairent, et les espérances prennent sens.

Ce travail est le fruit d’un parcours semé de patience, de foi et d’amour sincère.

À celle qui fut la première école de ma vie, à celle dont le silence fut ma sagesse, et dont le regard fut ma force...

À celle qui m’a portée dans son cœur avant même de me porter dans ses bras, à celle qui m’a appris que la patience est lumière, et que l’amour est un acte de foi...

Ma chère mère : Meknaci Fatima, je te dédie chaque mot, chaque ligne, chaque victoire dans ce travail.

À celui dont la présence silencieuse fut mon pilier, à celui dont les sacrifices discrets ont tracé mon chemin,
Mon père : Abd Elrahman, que ce travail soit le reflet de ta confiance en moi.

À mes frères Haitam et Khalil,

Vous êtes la base et le soutien dans toutes les étapes. Merci pour votre force, votre esprit joyeux, et vos oreilles toujours à l’écoute.

À ma sœur — compagne de mon enfance, miroir et confidente — Boutaina Lamis,
Que notre chemin reste toujours lié par l’amour et les rires sans fin.

À mes compagnons de route universitaire, avec qui j’ai partagé les doutes, les espoirs et les cafés tardifs...
Rayane, Sarra, Asma, merci d’avoir illuminé mes jours dans les moments de fatigue et d’inquiétude.

Et à mes amies les plus proches, celles qui ont partagé mes rires, ma fatigue, et m’ont soutenue en toutes circonstances :
Yousra, Sana, Dounia...

À mon âme sœur, à... à ma belle chance dans ce monde, à celle avec qui mon âme guérit, à celle avec qui les rires s’élèvent :
Ma cousine Chaima.

À tous ceux qui ont cru en moi, de près ou de loin...
À ceux qui demeurent dans mes prières, même dans le silence...
Je vous dédie ce travail, le modeste fruit de mes efforts

KAOUTAR

Dédicaces

À celle qui a veillé sur moi, sacrifié son temps et sa santé pour mon bien. À ma mère Hadda. Aucune parole ne saurait exprimer toute ma gratitude. Je te dédie cet accomplissement avec tout mon amour.

À celui qui m'a appris la patience, le don de soi et la confiance. À mon père Ahmed. Mon modèle, ma force et mon premier soutien. Merci d'avoir toujours cru en moi.

À mes chers frères et sœurs Amina, Asma, Hassan, Omar, Imed. Compagnons de route et battements de cœur. Merci pour votre soutien et vos prières qui ont illuminé mon chemin.

À mes précieuses amies. Celles qui ont été présentes à chaque instant, dans la joie comme dans la difficulté, dans la fatigue comme dans la réussite. Merci du fond du cœur pour votre soutien, votre tendresse et votre amitié sincère.

À tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à ce succès. Je vous dédie cette réussite.

SARRA

Dédicaces

Je commence d'abord par dire :

Alhamdouli Allah.

Je dédie ce mémoire à mes chers parents ;

Mon papa Nour Eddine et ma chère mère Djamila,

Pour leur amour inconditionnel, leur soutien indéfectible et leurs sacrifices qui m'ont permis
de poursuivre mes études.

À mon frère Fayçal et à ma sœur, ma moitié Samah,

Pour leur présence, leurs encouragements et leur amitié.

Que ce travail soit le reflet de votre influence positive dans ma vie.

À ma meilleure amie Dounia

Et à mes compagnons Rayane, Sarah, Kaoutar.

Je voulais vous remercier énormément pour vos efforts.

ASMA

Liste de figures

Chapitre : I

Figure I.1 :Le fonctionnement d'une station d'épuration des eaux usées	7
Figure I.2 : Schéma du réseau unitaire	8
Figure I.3 : Schéma du réseau séparatif	9

Chapitre : II

Figure.II.1 : Carte géographique de la wilaya de Skikda	23
Figure.II.2 : Diagramme ombrothermique de Gaussen de Skikda (ONM, 2022)	24
Figure.II.3 : Situation de la STEP de Filfila (Source : Google maps, 2024)	25
Figure.II.4 : Vue générale de la station d'épuration de Filfila	26
Figure.II.5 : Vue d'ensemble du système de traitement des eaux usées – STEP de Filfila	27
Figure.II.6 : Prétraitement	28
Figure.II.7 : Bassin biologique	30
Figure.II.8 : Bassin de clarification	30
Figure.II.9 : Benne des boues	

Chapitre : III

Figure.III.1. pH Mètre	36
Figure III.2. Étuve	39
Figure.III.3. : spectrophotomètre	46
Figure.III.4. : Résultat de teste coliformes totaux	47
Figure.III.5 : Résulta de teste coliformes fécaux	48
Figure.III.6 : Résulta de confirmation du teste coliformes fécaux et Escherichia coli	48
Figure.IV.7: Résulta de teste les streptocoques fécaux .	49

Chapitre : IV

Figure IV.1 : Variations spatiotemporelles du potentiel d'hydrogène (pH) de l'eau épurée	55
Figure IV.2 :Variations spatiotemporelles de la conductivité électrique (CE) de l'eau épurée	56
Figure IV.3 :Variations spatiotemporelles de la température (T) de l'eau épurée	57
Figure.IV.4 : Variations spatiotemporelles des matières en suspension (MES) de l'eau épurée	57
Figure IV.5 : Variations spatiotemporelles de la demande chimique en oxygène (DCO) de l'eau épurée	58
Figure IV.6 : Variations spatiotemporelles de la demande biochimique en oxygène (DBO ₅) de l'eau épurée	59
Figure IV.7 :Variations spatiotemporelles des orthophosphates (PO ₄) de l'eau épurée.	59
Figure IV.8 : Variations spatiotemporelles des nitrites (NO ₂) de l'eau épurée	60
Figure IV.9 :Variations spatiotemporelles des nitrates (NO ₃ ⁻) de l'eau épurée	61

Figure IV.10 : Variations spatiotemporelles de l'ammonium (NH_4) de l'eau épurée	61
Figure IV.11 : Variations spatiotemporelles des bicarbonates (HCO_3) de l'eau épurée	62
Figure IV.12 : Variations spatiotemporelles des chlorures (Cl) de l'eau épurée	62
Figure IV.13 :6 Variations spatiotemporelles de calcium (Ca) de l'eau épurée	63
Figure IV.14. Variations spatiotemporelles de magnésium (Mg) de l'eau épurée	63
Figure IV.15. Variations spatiotemporelles de sodium (Na) de l'eau traitée	64
Figure IV.16. Variations spatiotemporelles de potassium (K^+) de l'eau épurée	64
Figure IV.17. Faciès chimique de l'eau épurée de la nouvelle station d'épuration des eaux usées de Filfila, wilaya de Skikda.	67
Figure IV.18. Variations temporelles de l'indice de qualité de l'eau (WQI) de l'eau traitée par la STEP de Filfila	69

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau.I.1 : Directives pour l'interprétation de la qualité de l'eau pour l'irrigation	20
---	----

Chapitre II

Tableau.II.1. : Charges théoriques de la station d'épuration de Filfila (ONA, 2024)	25
---	----

Tableau II.2. : Unités de la station d'épuration de Filfila (ONA, 2024).	26
--	----

Chapitre III

Tableau.III.1.Volume et dosage de l'échantillon pour la DBO ₅	35
--	----

Tableau III.2 : Classification de l'indice de qualité des eaux d'irrigation (Meireles et al., 2010)	52
---	----

Chapitre IV

Tableau IV.1. Résultats des statistiques descriptives	53
---	----

Tableau IV.2. Résultats du suivi bactériologique de l'eau épurée au niveau de la STEP de Skikda.	65
--	----

Liste des abréviations

CE : Conductivité Electrique ($\mu\text{s/cm}$).

DBO₅ : la demande biologique en oxygène sur 5 jours .

DCO : la demande chimique en oxygène.

NO₂⁻ : Nitrite.

NO₃⁻ : Nitrate.

NH₄⁺ : Ammonium.

PO₄⁺ : phosphate

NTK : l'azote total Kjeldal

T° : Température.

MES : Matières En Suspension.

PH : Potentiel d'Hydrogène.

STEP : Station d'épuration.

ONA : Office National d'Assainissement.

OMS : Organisation mondiale de la santé.

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.

JORA : Journal officiel de la République Algérienne.

WQI : Water Quality Index (L'indice de qualité de l'eau)

Remerciements	
Dédicaces	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des symboles	

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Réutilisation des eaux usées en agriculture	
Introduction	4
I.1. Définition des eaux usées	4
I.2. Eaux usées (origine et quantité)	4
I.3. Types des eaux usées	4
I.3.1. Eaux usées domestiques	4
I.3.2. Eaux usées industrielles	5
I.3.3. Eaux pluviales	5
I.3.4. Eaux usées urbaines	5
I.3.5. Eaux usées de ruissellement	6
I.3.6. Eaux usées agricoles	6
I.4. Les stations d'épuration	7
I.4.1. Définition des stations d'épuration	7
I.4.2. Types des stations d'épuration	7
I.4.2.1. Boues activées	7
I.4.2.2. Lagunage	7
I.4.2.3. Lit bactérien	8
I.5. Systèmes d'assainissement	8
I.5.1. Système unitaire	8
I.5.2. Système séparatif	9
I.6. Réutilisation des eaux usées en Algérie	9
I.7. Critères de qualité des eaux usées pour l'irrigation	10
I.7.1. Salinité	10
I.7.2. Alcalinité	11
I.7.3. Sodicit�	11
I.7.4. Les métaux lourds	12
I.7.5. Potentiel d'hydrogène (pH)	12

I.7.6. Conductivité électrique (CE)	12
I.7.7. Demande Chimique en Oxygène (DCO)	13
I.7.8. Matières en suspension (MES)	13
I.7.9. Nitrates (NO ₃ -)	14
I.7.10. Nitrites (NO ₂ -)	14
I.7.11. Ammonium (NH ₄ ⁺)	14
I.7.12. Les fertilisants dans les eaux usées traitées	14
I.7.13. Charge nutritive en NPK.	15
I.7.14. Autres nutriments	16
I.8. Risques liés à la réutilisation des eaux usées en agriculture	17
I.8.1. Risques microbiologiques	17
I.8.2. Risques chimiques	17
I.8.3. Risques environnementaux	17
I.8.3.1. Effets sur le sol	18
I.8.3.2. Effets sur les eaux souterraines	18
I.8.3.3. Effets sur les eaux superficielles	18
I.8.3.4. Avantages environnementaux de réutilisation des eaux usées	19
I.9. Les normes de qualité de l'eau d'irrigation	19
I.10. Lois de l'eau en Algérie	21
Conclusion	22

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

Introduction	23
II.1. Présentation de la région d'étude	23
II.2. Contexte climatique de la zone d'étude	24
II.3. Description de la station d'épuration des eaux usées de Filfila	24
II.4. Equipements de la STEP	26
II.5. Processus d'épuration des eaux usées de la STEP de Filfila	27
II.5.1. Prétraitement	27
II.5.1.1. Dégrillage grossier	28
II.5.1.2. Dégrillage fin	28
II.5.1.3. Dessablage - Déshuilage	28
II.5.2. Traitement secondaire (biologique)	28
II.5.2.1. Bassin d'aération (bassin oxygéné)	29
II.5.2.2. Décantation secondaire (bassin de clarification)	30

II.6. Traitement tertiaire	31
II.7. Traitement des boues	31
II.8. Les heures de pointe	32
II.8.1. Importance de la connaissance des heures de pointe	32
II.8.2. Influence des saisons dans une zone touristique sur une station d'épuration	32
II.8.3. Mesures d'adaptation aux variations saisonnières	33
Conclusion	33

Chapitre III : Matériel et méthodes

introduction

III.1. Protocoles expérimentaux des analyses physicochimiques	34
III.1.1. Détermination de la demande biochimique en oxygène (DBO ₅)	34
III.1.2. Détermination de la demande chimique en oxygène (DCO)	35
III.1.3. Détermination du potentiel hydrotimétrique pH	36
III.1.4. Détermination de la température (T)	37
III.1.5. La conductivité électrique (CE)	37
III.1.6. Détermination des matières en suspension (MES)	38
III.1.7. Détermination le dosage des phosphates (PO ₄)	40
III.1.8. Détermination de l'azote total (NTK)	40
III.1.9. Détermination dosage des nitrites (NO ₂ ⁻)	41
III.1.10. Détermination dosage des nitrates (NO ₃ ⁻)	42
III.1.11. Détermination de l'azote ammoniacal (NH ₄ ⁺)	42
III.1.12. Détermination de la dureté totale (THT)	43
III.1.13. Détermination de la dureté calcique (Ca ²⁺)	44
III.1.14. Détermination du TAC	44
III.1.15. Détermination de chlorure (Cl ⁻)	45
III.1.16. Dosage du potassium (k ⁺)	45
III.1.17. Dosage de sodium (Na ⁺)	46
III.2. Analyse bactériologique	47
III.2.1. Recherche et dénombrement des coliformes totaux et fécaux	47
III.2.2. Test présomptif : recherche des coliformes totaux	47
III.2.3. Test confirmatif : recherche des coliformes fécaux	47

III.2.4. Recherche des streptocoques fécaux (SF)	49
III.3. Faciès chimique de l'eau	49
III.4. Calcul de l'indice de qualité de l'eau (WQI)	50

Chapitre IV : Résultats et discussion

Introduction	53
IV.1. Evaluation des paramètres physico-chimiques	53
IV.1.1. Résultats des statistiques descriptives	53
IV.2. Variations spatiotemporelles des paramètres physicochimiques	55
IV.2.1. Variation du potentiel d'hydrogène (pH)	55
IV.2.2. Variations spatiotemporelles de la conductivité électrique (CE)	56
IV.2.3. Variations spatiotemporelles de la température (T)	57
IV.2.4. Variations spatiotemporelles des matières en suspension (MES)	57
IV.2.5. Variations spatiotemporelles de la demande chimique en oxygène (DCO)	58
IV.2.6. Variations spatiotemporelles de la demande biochimique en oxygène (DBO ₅)	59
IV.2.7. Variations spatiotemporelles des orthophosphates (PO ₄)	59
IV.2.8. Variations spatiotemporelles des nitrites (NO ₂)	60
IV.2.9. Variations spatiotemporelles des nitrates (NO ₃)	61
IV.2.10. Variations spatiotemporelles de l'ammonium (NH ₄)	61
IV.2.11. Variations spatiotemporelles des bicarbonates (HCO ₃)	62
IV.2.12. Variations spatiotemporelles des chlorures (Cl)	62
IV.2.13. Variations spatiotemporelles de calcium (Ca)	63
IV.2.14. Variations spatiotemporelles de magnésium (Mg)	63
IV.2.15. Variations spatiotemporelles de sodium (Na)	64
IV.2.16. Variations spatiotemporelles de potassium (K)	64
IV.3. Résultats des analyses bactériologiques	66
IV.4. Résultats du faciès chimique	68
IV.5. Résultats de l'indice de qualité (WQI)	70
Conclusion	71
Conclusion générale	72
Références bibliographiques	
Annexes	

Introduction générale

Introduction générale

Dans un contexte mondial marqué par la raréfaction croissante des ressources en eau, la gestion durable de cette ressource vitale constitue un enjeu majeur, notamment dans les régions semi-arides comme l'Algérie (FAO, 2020 ; ONU-Eau, 2021). Cette situation est aggravée par la croissance démographique, l'urbanisation accélérée, le développement agricole intensif et les effets du changement climatique, qui contribuent ensemble à une augmentation continue de la demande en eau (WWAP, 2019). Face à cette pression, l'adoption de solutions alternatives, à la fois économiquement viables et écologiquement durables, s'impose.

Parmi ces alternatives, la réutilisation des eaux usées traitées apparaît comme une stratégie prometteuse, de plus en plus valorisée à l'échelle internationale, notamment dans le secteur agricole (Toze, 2006 ; Pedrero et al., 2010). En effet, lorsque ces eaux sont correctement épurées, elles représentent une ressource précieuse, capable de contribuer à l'irrigation agricole tout en réduisant la pression sur les ressources en eau douce (WHO, 2006 ; Lazarova & Bahri, 2005).

Selon le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE, 2022), le volume des ressources en eau renouvelables en Algérie est estimé à environ 19 milliards de m³/an, alors que la demande a été multipliée par quatre en quarante ans, atteignant aujourd'hui plus de 11,5 milliards de m³/an, dont 8,6 milliards de m³ sont destinés à l'agriculture, représentant ainsi plus de 75 % du total. Parallèlement, le pays produit environ 927 millions de m³/an d'eaux usées, dont près de 600 millions de m³ sont rejetés dans le milieu naturel sans traitement adéquat (MEW, 2021 ; ONA, 2022).

Pour faire face à cette situation, l'Algérie a engagé des efforts considérables pour développer les infrastructures d'assainissement sur l'ensemble du territoire. En 2022, on dénombre entre 211 et 240 stations d'épuration (STEP), dont plus de 160 sont gérées par l'Office National de l'Assainissement (ONA). La capacité théorique de traitement de ces installations avoisine 1 milliard de m³/an, mais le volume effectivement traité reste inférieur à 480 millions de m³, soit un taux d'exploitation d'environ 47 % (ONA, 2022 ; GIZ, 2023).

Malgré ces investissements, la réutilisation effective des eaux traitées en agriculture demeure limitée. En 2020, seulement 18 millions de m³ ont été utilisés pour irriguer environ 11 494 hectares, ce qui représente à peine 31 % du volume potentiellement réutilisable (MEW, 2021). Toutefois, le programme national prévoit l'équipement de 29 STEP pour l'irrigation, dont plus de 20 sont déjà

opérationnelles, dans le but de renforcer la sécurité hydrique à travers la valorisation des ressources non conventionnelles (GIZ, 2023).

Parmi ces stations, celle de la commune de Filfila, située dans la wilaya de Skikda, constitue un exemple d'infrastructure moderne visant à traiter les eaux usées urbaines avant leur rejet dans le milieu naturel. Cependant, l'usage des eaux épurées à des fins agricoles requiert une évaluation rigoureuse de leur qualité, afin de prévenir tout risque potentiel pour les sols, les cultures ou la santé humaine (Bouwer, 2000 ; Qadir et al., 2007).

C'est dans cette perspective que s'inscrit la présente étude, dont l'objectif est de valoriser les ressources non conventionnelles issues de la STEP de Filfila, en contribuant à une gestion intégrée et rationnelle de l'eau, tout en appuyant la transition vers une agriculture résiliente et respectueuse de l'environnement. Cela passe par une analyse de la qualité des eaux épurées et l'évaluation de leur potentiel pour l'irrigation.

Pour ce faire, il est essentiel de s'appuyer sur des outils scientifiques fiables, capables d'offrir une lecture intégrée des caractéristiques de l'eau. Parmi ces outils, l'Indice de Qualité de l'Eau d'Irrigation (WQI – Water Quality Index) s'avère particulièrement pertinent. Cet indice, exprimé sous forme numérique sans unité, regroupe plusieurs paramètres physico-chimiques (tels que la conductivité électrique, le sodium, le SAR, les bicarbonates, les chlorures, etc.) et fournit une appréciation synthétique de l'aptitude de l'eau à l'irrigation (Meireles et al., 2010 ; Ayers & Westcot, 1985).

L'intérêt majeur de WQI réside dans sa capacité à simplifier l'interprétation de données analytiques complexes, facilitant ainsi la prise de décision concernant l'usage agricole des eaux traitées, en tenant compte des normes nationales et internationales, des risques environnementaux et des bonnes pratiques d'irrigation durable.

Cette situation soulève plusieurs interrogations centrales :

- Les eaux traitées à la STEP de Filfila sont-elles de qualité suffisante pour être utilisées en agriculture sans risques ?
- Quels sont les paramètres physico-chimiques critiques à surveiller pour garantir un usage sûr ?
- L'indice WQI permet-il de déterminer de façon fiable leur aptitude à l'irrigation ?

Ces questions orientent notre approche méthodologique, centrée sur l'analyse de la qualité de l'eau et l'évaluation des risques associés à sa réutilisation.

C'est dans cette optique que s'inscrit le présent mémoire de fin d'études, structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre constitue une synthèse approfondie de la littérature. Il commence par présenter les principes fondamentaux de la pollution de l'eau, en abordant les sources, les conséquences et les principaux contaminants. Ensuite, il expose les différentes technologies d'épuration, en mettant en avant les approches conventionnelles et innovantes de traitement des effluents. Les trois chapitres suivants sont consacrés à la démarche expérimentale. Ils comprennent :

1. La présentation de la zone d'étude, avec ses caractéristiques géographiques et environnementales.
2. La description des protocoles analytiques appliqués pour chaque paramètre étudié.
3. L'interprétation des résultats obtenus, afin d'évaluer la qualité de l'eau traitée et sa conformité avec les exigences de l'irrigation.

Enfin, une conclusion générale viendra résumer les résultats essentiels, mettre en évidence les implications pratiques de l'étude et proposer des pistes innovantes pour une gestion durable de la ressource en eau, en combinant savoirs théoriques et pratiques expérimentales.

Chapitre I :
Réutilisation des eaux usées en
agriculture

Introduction

Face à la raréfaction croissante des ressources en eau, la réutilisation des eaux usées traitées constitue une solution stratégique et durable. Elle permet non seulement de préserver les ressources naturelles, mais aussi de répondre aux besoins croissants du secteurs tels que l'agriculture. Cette étude vise à mettre en évidence l'importance de cette alternative, à travers une compréhension globale des sources des eaux usées, des méthodes de traitement, et des possibilités de leur exploitation de manière sûre et efficace dans le domaine agricole.

I.1.Définition des eaux usées

Les eaux usées regroupent l'ensemble des eaux qui s'écoulent dans les réseaux d'assainissement après avoir vu leurs caractéristiques naturelles altérées par des usages domestiques, industriels, agricoles ou autres. Elles incluent également les eaux de pluie qui se déversent dans ces mêmes canalisations (**Bliefert et al, 2001**). D'après **Baumont et al., (2004)** les eaux usées désignent les effluents provenant des collectivités et des activités industrielles, transportés par les égouts vers une station d'épuration où ils subissent un traitement. Une fois traitées, ces eaux prennent le nom d'eaux usées épurées.

I.2.Les eaux usées (origine et quantité)

Les eaux usées proviennent essentiellement des activités domestiques et industrielles ainsi que des eaux souterraines et des précipitations ; en Algérie les disponibilités en eau sont estimées à 17 milliard de m³ par an le volume annuel d'eau usée domestique rejetées est estimé à 800 millions m³, ce sont quantités importante et facilement localisable que le pays ne peut négliger. Les quantités et caractéristiques des eaux usées industrielles sont très variées, dépendent du type de l'industrie, de la gestion de sa consommation d'eau et du niveau de traitement subi par les eaux usées avant leur rejet (**Baumont et al., 2004**).

I.3.Types des eaux usées

Suivant l'origine et la qualité des substances polluantes, on distingue cinq catégories d'eaux usées:

I.3.1.Les eaux usées domestiques

Les eaux usées domestiques se divisent en deux catégories principales : les eaux ménagères, issues des activités quotidiennes comme la cuisine, la lessive et la toilette, et les eaux vannes, qui proviennent des toilettes (urines et matières fécales). Dans les systèmes d'assainissement de type

« tout-à-l'égout », ces deux types d'eaux sont évacués ensemble. Ces eaux contiennent à la fois des matières minérales (comme les chlorures, phosphates et sulfates) et des matières organiques. Les substances organiques sont principalement constituées de composés ternaires, tels que les sucres et les graisses, composés de carbone, d'oxygène et d'hydrogène, mais peuvent également contenir de l'azote, du soufre, du phosphore, du fer, et d'autres éléments (Vaillant, 1974).

I.3.2 Les eaux industrielles

Tous les effluents provenant de l'utilisation de l'eau à des fins non domestiques sont considérés comme des rejets industriels. Cela inclut non seulement les eaux des usines, mais aussi celles issues d'activités artisanales et commerciales telles que les blanchisseries, les restaurants, ou encore les laboratoires médicaux. Les rejets industriels peuvent être traités de différentes manières, en fonction de l'activité, et suivent trois principaux modes de gestion :

- Ils peuvent être rejetés directement dans le réseau de collecte des eaux usées domestiques, sans traitement préalable.
- Ils peuvent être soumis à un prétraitement avant d'être évacués dans ce même réseau.
- Enfin, ils peuvent être entièrement traités sur place, puis rejetés dans le milieu naturel. Lorsqu'ils sont rejetés dans le réseau domestique, avec ou sans traitement préalable, ces effluents peuvent modifier de manière significative la composition des eaux usées. Cette modification dépend étroitement du type d'activité industrielle concernée, et peut revêtir des formes très variées.

I.3.3 Les eaux pluviales

"L'eau résultant du ruissellement de surface qui est évacuée après les précipitations ou la fonte des neiges. La composition de l'eau de pluie varie considérablement d'une région géographique à l'autre, en raison de l'impact des émissions de gaz et de particules dans l'air sur sa composition."

I.3.4 Eaux usées urbaines

Les eaux usées urbaines se composent principalement des eaux domestiques et des eaux de ruissellement. Ces dernières proviennent des précipitations, de l'arrosage des voies publiques et du lavage des caniveaux, des marchés et des cours. Lorsque l'eau s'écoule sur les toits, les cours, les jardins, les espaces verts, les routes et les marchés, elle entraîne avec elle divers types de polluants, tant minéraux qu'organiques : terre, limon, boues, sables, ainsi que des déchets végétaux comme les herbes, les pailles, les feuilles et les graines. Elle peut également contenir de nombreux

micropolluants, tels que les hydrocarbures, les pesticides utilisés dans les jardins, les détergents servant au nettoyage des espaces extérieurs et des véhicules, ainsi que des particules fines de caoutchouc issues de l'usure des pneus. Le plomb, quant à lui, provient principalement du plomb tétraéthyle contenu dans l'essence, ainsi que des retombées atmosphériques dues aux émissions des cheminées domestiques et industrielles (**Des Jardins ,1997**).

I.3.5. Les eaux usées de ruissellement

Ces eaux incluent les eaux de pluie, les eaux de lavage ainsi que les eaux de drainage. Elles sont généralement polluées par les substances qu'elles entraînent en ruisselant sur les trottoirs et les chaussées, telles que les huiles, les mazouts, les graisses, les Sables, etc. On y retrouve également des traces de métaux comme le zinc, le plomb et le cuivre .Les eaux de drainage, quant à elles, peuvent résulter de la remontée d'une nappe phréatique à travers le sol. Elles sont en général faiblement polluées (**Boutoux , 1983**).

I.3.6. Les eaux usées agricoles

L'agriculture constitue une source importante de pollution de l'eau en raison de l'utilisation intensive des engrais et des pesticides. Elle est l'une des principales causes de la pollution diffuse, où il est difficile de localiser précisément la source de la contamination. Lorsque les pluies ou l'irrigation des terres agricoles entraînent un ruissellement, les eaux peuvent transporter de grandes quantités d'engrais azotés et phosphatés, sous forme ionique ou en quantités supérieures à la capacité du sol à les retenir et à les assimiler. Ce ruissellement conduit à un enrichissement des nappes phréatiques superficielles ainsi que des eaux de surface (rivières, lacs) en matières azotées et phosphatées, favorisant ainsi le phénomène d'eutrophisation, qui est l'un des principaux impacts environnementaux liés à l'agriculture (**Methari , 2012**).

I.4. Les stations d'épuration

I.4.1. Définition des Station d'épuration

C'est une installation destinée à épurer les eaux usées domestiques ou industrielles et les eaux pluviales avant le rejet dans le milieu naturel. Le but du traitement est de séparer l'eau des substances indésirables pour le milieu récepteur.

La première tentative d'épuration des eaux usées a été inventée en 1914 par des scientifiques anglais.



Figure I.1 :Le fonctionnement d'une station d'épuration des eaux usées

I.4.2. Les types des stations d'épuration

I.4.2.1. Boues activées

Découvert à Manchester en 1914, le procédé des boues activées repose sur le principe que l'aération des eaux usées favorise le développement rapide d'une flore bactérienne apte à décomposer les matières organiques polluantes. Sous des conditions optimales d'aération, les micro-organismes présents dans les eaux usées se multiplient et forment des floccs. Lorsqu'ils sont laissés au repos, ces floccs se séparent aisément de l'eau par décantation. Le cœur du procédé consiste donc à encourager la formation de ces floccs bactériens dans un bassin d'aération alimenté en eaux usées. Pour éviter leur sédimentation prématurée, une agitation constante est indispensable. De plus, une oxygénation suffisante est requise pour assurer la croissance des micro-organismes (**Dhaouadi, 2013**).

I.4.2.2. Lagunage

a- Lagunage naturel

Le lagunage naturel désigne des bassins artificiels peu profonds et étanches, utilisés pour traiter des effluents bruts ou prétraités, sans recirculation des boues décantées. La biomasse épuratrice y est peu concentrée. Ces bassins, appelés aussi étangs de stabilisation (**Koller, 2004**), sont classés en trois types selon le mode de développement bactérien : anaérobies, aérobies ou facultatifs

(mixtes). Selon les conditions locales, la qualité de l'effluent souhaitée ou le débit à traiter, différents agencements de lagunes peuvent être envisagés. Le lagunage peut servir de traitement principal ou tertiaire, notamment pour affiner la qualité des eaux après un traitement par boues activées, comme dans le cas de la désinfection (**Degrémont, 1978**).

b- Lagunage aéré

Le lagunage aéré consiste en un ou plusieurs bassins d'une profondeur variant entre 2 et 4 mètres, où l'oxygène est introduit de manière artificielle à l'aide d'aérateurs de surface ou de diffuseurs d'air (**Rejasse, 2009**). Ce procédé permet d'éliminer efficacement une grande partie de la pollution organique (80 à 90 % de la DBO), entre 20 et 30 % de l'azote, et réduit fortement la charge en germes. Cependant, il nécessite de vastes surfaces et son efficacité peut varier selon les saisons (**Troyes, 2002**).

I.4.2.3.Lit bactérien

Le lit bactérien est un procédé d'épuration où les eaux usées préalablement décantées sont réparties sur un lit de matériaux poreux servant de support à des micro-organismes épurateurs. L'aération, naturelle ou forcée, assure l'apport en oxygène nécessaire aux bactéries aérobies. La pollution organique et l'oxygène diffusent à travers un film biologique vers les micro-organismes. Ce film contient des bactéries aérobies en surface et anaérobies en profondeur. Les sous-produits, comme le CO₂, sont évacués avec les fluides. Ce procédé permet d'éliminer jusqu'à 80 % de la DBO₅ (**Rodart et al., 1989**).

I.5.Les systèmes d'assainissement

I.5.1.Le système unitaire

Dans ce type de système, un unique collecteur est utilisé pour acheminer à la fois les eaux usées domestiques et les eaux pluviales vers la station d'épuration. L'un des avantages majeurs de ce système réside dans son coût plus faible comparé à d'autres types de réseaux. Cependant, les canalisations doivent être dimensionnées de manière

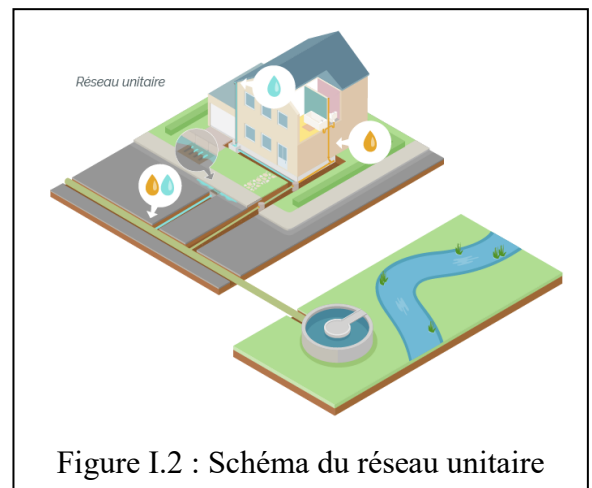


Figure I.2 : Schéma du réseau unitaire

adéquate afin de prévenir les inondations et de permettre l'évacuation d'un volume important d'eaux pluviales, au moins jusqu'au bassin de rétention.

I.5.2. Le système séparatif

Dans le système séparatif, les eaux usées urbaines (ménages, artisanats et industries) circulent dans un réseau de canalisations indépendant de celui dédié aux eaux pluviales. Ainsi, le réseau d'eaux usées est acheminé vers la station d'épuration, tandis que les eaux de pluie sont déversées directement dans le cours d'eau sans subir de traitement. Ce dispositif offre une maîtrise plus fine tant de la qualité que du volume des effluents arrivant à la station.

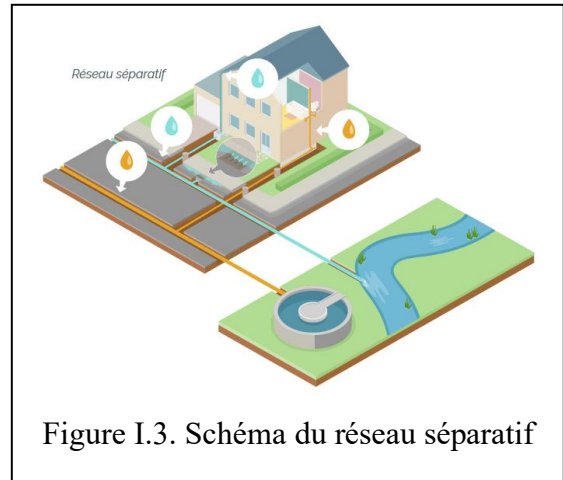


Figure I.3. Schéma du réseau séparatif

I.6. Réutilisation des eaux usées en Algérie

La réutilisation des eaux usées traitées consiste à exploiter ces eaux après épuration pour des usages variés tels que l'irrigation agricole, le nettoyage urbain, ou encore la recharge des nappes phréatiques. Ce procédé s'inscrit dans une logique d'économie circulaire, permettant de préserver les ressources en eau potable et de limiter les rejets polluants dans l'environnement (**Ben Abdallah, 2003**). En Algérie, l'eau est une ressource rare, fortement dépendante de précipitations irrégulières. Sur plus de 12 milliards de m³ d'écoulements de surface estimés, seulement 2 milliards sont réellement mobilisés chaque année, avec un potentiel maximal de 6 milliards m³, même après la mise en service de nouveaux barrages. Face à ces limitations, et à une qualité d'eau souvent menacée par la pollution, la réutilisation des eaux usées représente une solution stratégique. Actuellement, environ 750 millions de m³ d'eaux usées sont rejetés annuellement, un chiffre qui pourrait dépasser 1,5 milliard de m³ à l'horizon 2020 (**Kessira, 2013**). Le secteur de l'eau en Algérie a donc lancé un programme ambitieux de construction de stations d'épuration. L'usage prioritaire des eaux usées traitées est recommandé pour les zones déficitaires en ressources conventionnelles, afin de répondre aux besoins croissants tout en préservant l'environnement (**Ben Abdallah, 2003**).

I.7. Critères de qualité des eaux usées pour l'irrigation

L'irrigation des cultures et des espaces verts est la forme la plus répandue de réutilisation des eaux usées urbaines. Elle présente un fort potentiel à court et moyen terme, comparée à d'autres méthodes comme le double réseau urbain, les usages industriels ou la recharge des nappes phréatiques (Faby, 1997). Les avantages de cette pratique résident non seulement dans la préservation des ressources en eau et de l'environnement, mais aussi dans la richesse de ces eaux en éléments nutritifs comme l'azote, le phosphore et le potassium, ainsi qu'en oligoéléments tels que le fer, le cuivre, le manganèse et le zinc, qui favorisent la croissance des plantes et améliorent les rendements agricoles. De plus, les matières en suspension (MES) contribuent à la fertilité des sols grâce à leur teneur en matière organique.

Ainsi, les bénéfices de la réutilisation des eaux usées en irrigation sont doubles : en plus de préserver l'eau, les agriculteurs réalisent des économies sur les coûts d'engrais. Sur le plan technique, les caractéristiques physico-chimiques de ces eaux sont comparables à celles d'autres eaux utilisées pour l'irrigation, et peuvent être évaluées selon des critères tels que la teneur en sels dissous, le sodium et les ions toxiques.

I.7.1. Salinité

Le critère principal pour évaluer la qualité d'une eau naturelle dans le cadre d'un projet d'irrigation est sa teneur totale en sels solubles. En général, la concentration en sels des eaux usées dépasse celle de l'eau potable d'environ 200 mg/l, sauf en cas d'infiltration d'eaux saumâtres dans le réseau d'assainissement ou de collecte d'eaux industrielles. Cette augmentation reste toutefois insuffisante, à elle seule, pour compromettre la faisabilité de l'irrigation. On distingue deux types d'impacts liés à une salinité excessive de l'eau d'irrigation : Les effets néfastes sur les sols, et donc indirectement sur les rendements agricoles, Les dommages directs causés aux cultures (Faby, 1997). Dans la majorité des pays, l'eau destinée à l'usage municipal est celle de meilleure qualité disponible, généralement faiblement salée. Cependant, en situation de pénurie d'eau, la salinité devient un facteur préoccupant. Il est donc essentiel de tenir compte de la quantité et de la nature des sels présents pour juger de la pertinence de l'utilisation des eaux usées traitées en irrigation.

Des problèmes potentiels sont liés à la teneur en sels totaux, au type de sel ou à la concentration excessive d'un ou plusieurs éléments (Ayers et al, 1985).

I.7.2. Alcalinité

La dispersion de la phase colloïdale du sol, la stabilité des agrégats, la structure du sol et sa perméabilité à l'eau sont fortement influencées par les types d'ions échangeables présents dans l'eau d'irrigation. L'augmentation de l'alcalinité du sol, souvent observée lors de l'utilisation des eaux usées traitées riches en sodium (Na), entraîne une réduction de la perméabilité du sol, notamment en surface, même en présence d'un lessivage. Ce phénomène est principalement dû à la dispersion et au gonflement des argiles lorsque la concentration en sodium échangeable augmente. Cependant, à un certain niveau du Rapport d'Adsorption du Sodium (SAR), la vitesse d'infiltration peut soit augmenter, soit diminuer selon le niveau de salinité. Par conséquent, le SAR et la conductivité électrique de l'eau (ECw) doivent être analysés conjointement pour évaluer les risques potentiels liés à l'irrigation avec ce type d'eau (**Rhoades, 1977**).

I.7.3. Sodicit 

L'accumulation de sodium sur le complexe adsorbant du sol, connue sous le nom de sodicité, peut altérer les propriétés physiques du sol. La capacité de drainage, et donc un excès de sodium par rapport aux éléments alcalino-terreux (comme le calcium et le magnésium) dans le complexe adsorbant entraîne la défloculation des argiles, ce qui provoque une dégradation de la structure du sol. Cela se manifeste par une diminution de la porosité et de la perméabilité des couches superficielles du sol. En conséquence, l'eau d'irrigation tend à stagner en surface sans atteindre efficacement la zone racinaire. Par ailleurs, à teneur égale en sodium et en alcalino-terreux dans la solution, la tendance à la sodisation devient plus marquée lorsque la concentration totale en cations est élevée. Ainsi, les risques liés à la sodisation d'un sol irrigué sont généralement évalués à travers deux paramètres principaux : le SAR (Sodium Adsorption Ratio), qui exprime le rapport entre les concentrations de sodium et des alcalino-terreux, et la conductivité électrique de l'eau d'irrigation. Le SAR, calculé selon la formule :

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{[Na^+] + [Mg^{2+}]}{2}}}$$

avec les concentrations exprimées en meq/l, peut être ajusté pour mieux refléter la quantité de calcium qui reste dans le sol après irrigation (**Faby, 1997**).

I.7.4. métaux lourds

Les métaux lourds se trouvent en grand nombre dans les eaux usées urbaines, bien qu'ils soient généralement présents à de très faibles concentrations (de l'ordre de quelques microgrammes par litre). Les métaux les plus abondants sont le fer, le zinc, le cuivre et le plomb, tandis que d'autres comme le manganèse, l'aluminium, le chrome, l'arsenic, le sélénium, le mercure, le cadmium, le molybdène, le nickel, etc., sont présents à l'état de traces. De plus, l'accumulation de ces métaux dans les sols peut avoir des effets néfastes sur les cultures irriguées (**Attab, 2005**).

I.7.5.pH

Le pH du sol est un indicateur pratique et précis permettant de caractériser la réaction chimique du sol. Il s'agit d'une mesure logarithmique de l'acidité d'une solution.

La Détermination du pH se fait à l'aide d'un pH-mètre équipé d'une électrode en verre, préalablement calibré à l'aide d'une solution tampon de pH connu. La mesure s'effectue sur un extrait aqueux préparé dans un rapport de 1/5 avec la solution du sol. Dans les régions arides, le pH des sols varie généralement d'une valeur légèrement inférieure à 7 jusqu'à environ 9 **Garnier(2012)**.

I.7.6. Conductivité électrique

La conductivité électrique de l'eau correspond à la capacité d'une colonne d'eau, située entre deux électrodes métalliques en platine d'une surface de 1 cm² et distantes de 1 cm, à conduire le courant électrique. Elle est l'inverse de la résistivité électrique. Son unité de mesure est le Siemens par mètre (S/m), avec les équivalences suivantes :

$1 \text{ S/m} = 10^4 \text{ } \mu\text{S/cm} = 10^3 \text{ mS/m}$. La conductivité reflète le degré de minéralisation de l'eau, ce qui en fait un indicateur pertinent pour identifier l'origine de cette eau.

I.7.7. Demande Chimique en Oxygène (DCO)

La demande chimique en oxygène (DCO) représente la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder les substances présentes dans l'eau, selon des conditions opératoires bien précises. Elle constitue en réalité une estimation de la quantité de matière oxydable, qu'elle soit d'origine organique ou minérale. La DCO dépend des propriétés des substances présentes, de leurs proportions respectives et de leur capacité à être oxydées (**Rodier, 2005**).

Elle est exprimée en mg/L d'oxygène et correspond à la concentration équivalente à la quantité de dichromate consommée par les matières dissoutes et en suspension dans un échantillon d'eau, lorsqu'il est traité par cet oxydant selon les conditions normalisées (**Rejsek, 2002**).

I.7.8. matière en suspension (MES)

La séparation de MES s'effectue par centrifugation. L'échantillon est soumis à une rotation rapide, ce qui permet, grâce à la force centrifuge, de concentrer les particules solides au fond du tube sous forme de culot. Ce culot est ensuite lavé avec de l'eau distillée, transféré sur un papier filtre, puis séché à 105°C. Le résidu sec obtenu est ensuite pesé : il représente la quantité de MES présentes dans l'échantillon. La concentration des matières en suspension dans l'eau (exprimée en mg/l) se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$MES \left(\frac{mg}{l} \right) = \frac{(M1 - M0) * 1000}{V}$$

Où :

M0 : la masse du papier filtre avant filtration (mg),

M1 : la masse du papier filtre après filtration (mg),

V : le volume de l'échantillon (l).

I.7.9. nitrates (NO_3^-)

Les nitrates représentent la forme finale de l'oxydation de l'azote organique dans l'eau. Ce sont les bactéries nitrifiantes (Nitrobacter) qui assurent la conversion des nitrites en nitrates. Bien que les nitrates ne soient pas directement toxiques, des concentrations élevées favorisent la prolifération des algues, contribuant ainsi au phénomène d'eutrophisation du milieu aquatique. Leur danger potentiel reste lié à leur transformation en nitrites (**Rodier, 2009**).

I.7.10. Nitrites (NO_2^-)

Les ions nitrites (NO_2^-) représentent une étape intermédiaire dans le processus de transformation de l'ammonium (NH_4^+) en nitrates (NO_3^-). Ce sont les bactéries nitrifiantes, notamment les Nitrosomonas, qui assurent cette conversion, appelée nitrification, un processus nécessitant une consommation élevée d'oxygène. Les nitrites peuvent également résulter de la réduction bactérienne des nitrates, un phénomène connu sous le nom de dénitrification. Même à très faibles concentrations, les nitrites sont hautement toxiques pour les organismes aquatiques, et leur toxicité augmente avec la température.

I.7.11. Ammonium (NH_4^+)

La forme réduite de l'azote, fréquemment observée dans les eaux usées, représente généralement la première étape de la dégradation de la matière organique contenant de l'azote. Sa présence peut également résulter de la réduction des nitrates et des nitrites (**Marcel, 1989**).

I.7.12. Les fertilisants dans les eaux usées traitées

La forte teneur en éléments fertilisants des eaux usées traitées leur confère une réelle valeur agronomique. Cependant, lorsque ces éléments nutritifs sont présents en excès, en raison soit de leur concentration élevée soit d'un apport trop important d'eaux usées, ils peuvent devenir un facteur limitant pour la culture. Les eaux usées d'origine urbaine sont généralement riches en nutriments essentiels à la croissance des plantes, notamment les macronutriments (azote, phosphore, potassium, calcium, magnésium) et les oligo-éléments (fer, zinc, cuivre, manganèse...) (**Massena, 2001**). Toutefois, la quantité de nutriments apportée peut dépasser les besoins réels des cultures, ce qui présente un risque de pollution des eaux souterraines. De plus, un excès de nutriments peut provoquer une croissance végétative exagérée, retardant ainsi la maturité des plantes et nuisant à la qualité des récoltes. C'est pourquoi il est essentiel d'intégrer les nutriments

contenus dans les eaux usées traitées dans un programme global de fertilisation adapté aux cultures irriguées. Dans cette optique, une analyse des eaux usées est recommandée, au minimum en début de chaque saison agricole (FAO, 2003).

I.7.13. Charge nutritive en NPK

La teneur en azote (N) et en phosphore (P) dans les eaux usées traitées au stade secondaire peut varier considérablement en fonction de la nature des eaux usées d'origine et du procédé de traitement appliqué. En règle générale, les stations de traitement classiques produisent des effluents avec des concentrations en N et P plus élevées que celles observées dans les systèmes de lagunage aéré ou les fossés d'oxydation. Si les traitements réduisent efficacement les concentrations en azote et en phosphore, la teneur en potassium (K), quant à elle, reste généralement proche de celle mesurée dans l'eau usée brute.

a- Azote (N)

L'azote joue un rôle essentiel dans le métabolisme des plantes, étant le principal constituant des protéines, qui sont les éléments de base de la matière vivante. Cependant, un excès d'azote, particulièrement par temps couvert et froid, peut entraîner l'accumulation de nitrates dans les plantes. Ce surplus de nitrates, surtout dans les légumes à feuilles (comme la laitue, le céleri, ou les épinards), peut être nuisible à la santé du consommateur (Skiredje, 2005). La concentration en azote dans les eaux usées peut varier de 20 à plus de 100 mg/l, selon les usages et le traitement des effluents (FAO, 1992). L'utilisation des eaux usées pour l'irrigation soulève

la problématique d'un excès d'azote. Ce surplus présente des risques non seulement pour la tolérance des cultures, mais aussi pour la pollution potentielle des nappes phréatiques & sous-jacentes.

b- phosphore (p)

Le phosphore est un élément vital pour la plante, intervenant dans l'énergie cellulaire (ATP), la génétique (ADN/ARN), la photosynthèse et le développement des fruits (Skiredje, 2005). Dans les eaux usées traitées (niveau secondaire), sa concentration varie entre 6 et 15 mg/l (soit 15–35 mg/l de P_2O_5), à moins qu'un traitement tertiaire soit appliqué (FAO, 2003). Selon la FAO (1992), les effluents peuvent contenir de 5 à 50 mg/l de phosphore. Dans les sols, le phosphate issu du phosphore peut précipiter selon le pH : avec le calcium (sols alcalins), ou avec le fer et l'aluminium

(sols acides). Il peut aussi être adsorbé puis relâché lentement, offrant une disponibilité continue pour les plantes, notamment dans les sols sablonneux neutre

c- potassium (K)

Le potassium (K) est un élément essentiel et très mobile dans la plante, jouant un rôle majeur dans de nombreuses fonctions physiologiques comme l'absorption des cations, la régulation hydrique, la turgescence cellulaire, ainsi que l'activation des systèmes enzymatiques. Il contribue à la résistance des plantes au gel et à la sécheresse, et facilite le transfert des assimilats vers les organes de réserve (Skiredje, 2005). Dans les eaux usées, le potassium ne présente généralement aucun effet nocif. Au contraire, il agit comme un macronutriment bénéfique qui améliore la fertilité des sols ainsi que la productivité et la qualité des cultures. Sa concentration dans les eaux usées traitées secondairement varie entre 10 et 30 mg/l (soit 12 à 36 mg/l de K₂O) (FAO, 1992).

d- bore (B)

Le bore est un oligo-élément essentiel au développement des plantes, impliqué dans des fonctions vitales comme le métabolisme des glucides, la fertilité du pollen, et la synthèse des protéines (Skiredje, 2005). Il contribue aussi au renforcement des parois cellulaires et à la fixation de l'azote chez les légumineuses. Présent dans les eaux usées via les lessives et rejets industriels, il est bénéfique à faibles doses, mais devient toxique au-delà de 1 mg/l pour certaines plantes. Ces eaux peuvent couvrir les besoins nutritifs des cultures, voire remplacer les engrais, à condition d'adapter l'irrigation aux besoins en eau des plantes. Il est donc essentiel d'intégrer les apports en bore, azote phosphore (P) et potassium (K) dans les programmes de fertilisation, selon les besoins spécifiques des cultures..

I.7.14. Autre nutriment

Les eaux usées contiennent généralement des niveaux suffisants en soufre, zinc, cuivre et autres oligo-éléments, indispensables aux fonctions enzymatiques et au métabolisme des plantes. Chaque micronutriment joue un rôle spécifique : le cuivre (Cu) stimule la germination, renforce les parois cellulaires et intervient dans la nitrification ; le fer (Fe) est crucial pour la chlorophylle et la respiration cellulaire ; le manganèse (Mn) favorise la résistance au gel et active la nitrate réductase ; le molybdène (Mo) est essentiel pour l'assimilation de l'azote ; et le zinc (Zn) soutient la croissance et la formation des fruits (Cadillon et al., 1996). Sauf en cas de pollution industrielle importante,

les concentrations en métaux lourds dans les eaux usées restent faibles, car la majorité est retenue dans les boues des stations d'épuration. Une surveillance régulière de la qualité des eaux recyclées est néanmoins recommandée pour assurer une irrigation sûre, adaptée aux cultures choisies (**Faby, 1997**). Les concentrations limites en éléments traces sont indiquées dans le tableau II.6, et les charges admissibles en métaux lourds pour les sols agricoles ont été rapportées par **Biswas (1987)**.

I.8. Risques liés à la réutilisation des eaux usées en agriculture

I.8.1. Risque microbiologique

Dans le cas de l'agriculture, il est prouvé depuis longtemps que les micro-organismes pathogènes des animaux ne peuvent ni pénétrer ni survivre à l'intérieur des plantes (**Murphy et al, 1985**).

Les micro-organismes se retrouvent donc à la surface des plantes et sur le sol. Les feuilles et la plante créent un environnement frais, humide (évaporation) et à l'abri du soleil. Il peut donc y avoir une contamination pendant la croissance des plantes ou la récolte. Les pathogènes survivent plus longtemps sur le sol que sur les plantes (**Asano, 1998**).

La contamination susceptible de se produire se situe à différents niveaux : Le consommateur, Cultures légumières, Cultures fourragères, les cultures forestier, personnel d'exploitation (**Maait, 1997**).

I.8.2. Risque chimique

Au-delà de l'effet global de certains constituants de l'eau usée sur les cultures irriguées comme la salinité, l'eau usée peut potentiellement créer une toxicité due à une concentration élevée de certains éléments comme le bore et quelques métaux lourds (**FAO, 2003**).

I.8.3. Risque environnemental

L'utilisation d'eau usée pour l'irrigation peut avoir également des effets négatifs sur l'environnement et la santé humaine. Les principaux dangers pour l'environnement associés à l'eau usée sont :

- L'introduction des produits chimiques dans des écosystèmes sensibles (principalement le sol, l'eau et les plantes),
- La propagation des microorganismes pathogènes (**FAO, 2003**).

I.8.3.1.Effets sur le sol

Ces impacts sont particulièrement préoccupants pour les agriculteurs, car ils peuvent entraîner une baisse de la productivité, de la fertilité et du rendement des terres agricoles. Pour garantir une utilisation durable et rentable des sols à long terme, il est essentiel de maintenir une bonne fertilité chimique et physique. Parmi les principaux problèmes liés à l'utilisation des eaux usées en irrigation figurent la salinisation, l'alcalinité, la réduction de la perméabilité du sol, ainsi que l'accumulation d'éléments potentiellement toxiques et de nutriments (FAO, 2003). Le risque majeur associé à cette pratique est le colmatage, qui affecte généralement la couche superficielle du sol.

I.8.3.2.Effets sur les eaux souterraines

Dans certaines conditions, les effets sur les eaux souterraines sont plus importants que les effets sur le sol. La pollution des eaux souterraines avec des constituants de l'eau usée est possible (FAO, 2003). La contamination des eaux souterraines dépend de trois paramètres : le sol, les roches sous-jacentes et la nappe. Deux caractéristiques sont essentielles pour les sols : la capacité de rétention et la capacité d'épuration. Les sols qui ont une bonne capacité de rétention sont les sols argilo sableux, ceux ayant une mauvaise qualité sont les roches fissurées. Une bonne capacité de rétention assure une bonne assimilation par les plantes et un étalement de la pollution dans le temps. La capacité d'épuration est assurée par la fixation des substances polluantes (adsorption, précipitation), la transformation des molécules organiques par des micro-organismes et l'exportation par les végétaux (Asano, 1998).

I.8.3.3.Effet sur les eaux superficielles

Les rejets directs d'eaux épurées posent des problèmes d'eutrophisation des cours d'eau, de qualité de l'eau destinée à la production d'eau potable (norme d'un maximum de 50 mg/l pour l'azote) et de contamination microbiologique des zones de conchyliculture.

C'est pourquoi une réutilisation des eaux usées épurées est quasiment toujours préférable à un rejet direct dans le milieu (Baumont et al, 2004).

La concentration élevée en N et P dans l'eau usée est d'un intérêt particulier lorsque l'eau usée est mélangée dans un barrage, avant irrigation, car ces éléments peuvent créer des conditions favorables à l'eutrophisation. Dans de telles conditions, l'apparition d'algues vertes est très

fréquente et il est difficile de remédier aux problèmes y associés, en particulier à l'obstruction des systèmes d'irrigation pressurisés. Ce problème est un des soucis majeurs des agriculteurs.

Le problème d'eutrophisation et du déficit en oxygène, dû aux nutriments dans l'eau usée, est particulièrement important quand l'effluent est déchargé dans les étendues d'eau (fleuves, lacs et mer). L'azote est le facteur limitant pour la croissance des algues en mer, alors que N et P sont les facteurs limitant dans les lacs, les bassins d'eau salée et dans les barrages où l'eau usée est stockée avant irrigation (FAO, 2003).

I.8.3.4. Avantages environnementaux de réutilisation des eaux usées

Lorsque l'eau usée est utilisée correctement à des fins agricoles, plutôt que toute autre utilisation, l'environnement peut être amélioré. Voici quelques avantages environnementaux :

- La suppression de rejet en eaux de surface, prévient l'éventualité de situations esthétiques désagréables, de conditions anaérobies dans les cours d'eau et l'eutrophisation des lacs et réservoirs. La conservation des ressources en eau fournit des avantages à l'utilisation telle que l'approvisionnement en eau et la préservation des étendues d'eau à usage récréatif.
- La sauvegarde des ressources en eaux souterraines dans les zones de surexploitation de ces ressources pour l'agriculture pose le problème de l'épuisement et de l'intrusion du biseau salin.
- La possibilité de conservation des sols et de leur amélioration par apport d'humus sur les terres agricoles et de prévention de l'érosion.

I.9. Les normes de qualité de l'eau d'irrigation

Les normes de la qualité des eaux varient selon les usages auxquels elle est destinée (alimentation, besoin agricole, besoins industriels)

Les normes ont pour objectif de :

- Protéger le public et les ouvriers agricoles ;
- Protéger les consommateurs des produits agricoles ;
- Protéger les ressources en eau superficielle et souterraine et les sols ;
- Protéger le matériel d'irrigation ; Maintenir des rendements acceptables.

Tableau.I.1 : Directives pour l'interprétation de la qualité de l'eau pour l'irrigation

Paramètres	Unites	Limites	Normes
pH	-	6.5-8.5	JORA (2012)
T	C	30	JORA (2012)
DBO ₅	mg/l	30	FAO (2003)
DCO	mg/l	90	FAO (2003)
CE	μS/cm	3000	FAO (2003)
MES	mg/l	30	FAO (2003)
PO ₄	mg/l	2	FAO (2003)
NO ₃	mg/l	30	FAO (2015)
NO ₂	mg/l	3	FAO (1985)
NH ₄	mg/l	2	FAO (1985), OMS(1989)
HCO ₃	mg/l	518.5	JORA (2012)
Cl	mg/l	354.5	JORA (2012)
Ca	mg/l	40 – 120	H.G. Peterson (1999)
Mg	mg/l	6 – 25	H.G. Peterson (1999)
K	mg/l	0.5 – 5	H.G. Peterson (1999)
Na	mg/l	69	FAO (2015)

I.10.Lois de l'eau en Algérie

I.10.1. Le contexte réglementaire

La réglementation algérienne est assez succincte concernant la réutilisation des eaux usées épurées. Les textes de la loi n° 05/12 du 04 aout 2005 relative à l'eau sont :

Art. 2.- Les objectifs assignés à l'utilisation, à la gestion et au développement durable des ressources en eau visent à assurer :

- La préservation de la salubrité publique et la protection des ressources en eau et des milieux aquatiques contre les risques de pollution à travers la collecte et l'épuration des eaux usées domestiques et industrielles ainsi que des eaux pluviales et de ruissellement dans les zones urbaines.

Art. 4.- Les eaux usées épurées et utilisées dans un but d'utilité publique.

Art. 43.- Conformément aux dispositions des articles 48 à 51 de la loi n° 03-10 du 19 Jomada El-Oula 1424 correspondants au 19 Juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable, les milieux hydriques et les écosystèmes aquatiques doivent être protégés de toute forme de pollution susceptible d'altérer la qualité des eaux et de nuire à leurs différents usages.

Art. 46.- Sont interdits : -tout déversement ou rejet d'eaux usées e toute nature dans les puits, forages, galerie de captage, fontaines et abreuvoirs publics, oueds à sec et canaux.

Art. 52.- Les caractéristiques techniques des systèmes d'épuration des eaux usées sont fixées par voie réglementaire en prenant en compte notamment les critères relatifs aux agglomérations, aux possibilités d'utilisation des eaux épurées, aux risques de contamination et de pollution.

Art. 77.- Sont soumises au régime de la concession d'utilisation des ressources en eau, les opérations portant sur la réalisation d'infrastructures destinées à l'utilisation d'eaux usées épurées pour des usages agricoles individuels ou collectifs ou pour des usages industriels.

Art. 82.- Les cahiers de charges portant sur la concession d'utilisation des eaux usées épurées pour l'irrigation de certaines cultures ou l'arrosage d'espaces vert doit tenir compte des mesures préventives liées aux risques sanitaires et aux impacts sur l'environnement.

Art. 93.- Des aides et soutiens de toute nature peuvent être accordés aux personnes physiques ou morales, de droit public ou privé, qui initient et mettent en œuvre des opérations portant notamment sur l'utilisation des eaux usées épurées en vue de valoriser les eaux traitées.

Art. 130.- L'utilisation des eaux usées brutes pour l'irrigation est interdite.

Conclusion

La réutilisation des eaux usées traitées constitue une réponse durable et efficace face à la pénurie d'eau. Grâce aux technologies modernes, ces eaux peuvent être valorisées en toute sécurité dans plusieurs secteurs tels que l'agriculture, l'industrie ou la recharge des nappes phréatiques. Toutefois, leur gestion nécessite une connaissance approfondie de leur origine, de leur composition et des risques qu'elles présentent. Une collecte maîtrisée, un traitement rigoureux et une valorisation encadrée permettent non seulement de limiter leur impact environnemental, mais aussi de préserver les ressources en eau et de contribuer à un développement durable.

Chapitre II :

Présentation de la zone d'étude

Introduction

La présente étude porte particulièrement sur la station d'épuration de Filfila, conçue pour traiter les eaux usées d'origine domestique et pluviale, en adoptant le procédé biologique des boues activées à faible charge. Cette station n'est pas conçue uniquement comme un outil de protection de l'environnement, mais aussi pour la valorisation des eaux épurées, notamment à des fins agricoles, permettant d'alléger la pression sur les ressources en eau conventionnelles.

I. Présentation de la région d'étude

La wilaya de Skikda est située dans le nord-est de l'Algérie. Elle est délimitée au nord par la mer Méditerranée, à l'est par la wilaya d'Annaba, à l'ouest par celle de Jijel, au sud par les wilayas de Constantine et Guelma, et au sud-ouest par la wilaya de Mila. Elle s'étend sur une superficie de 4 137,68 km² et dispose d'une façade maritime de 142 km de long. Sa position centrale sur le littoral de l'Est Algérien, sa fonction portuaire et son rôle économique lui confèrent une place privilégiée dans l'armature urbaine.

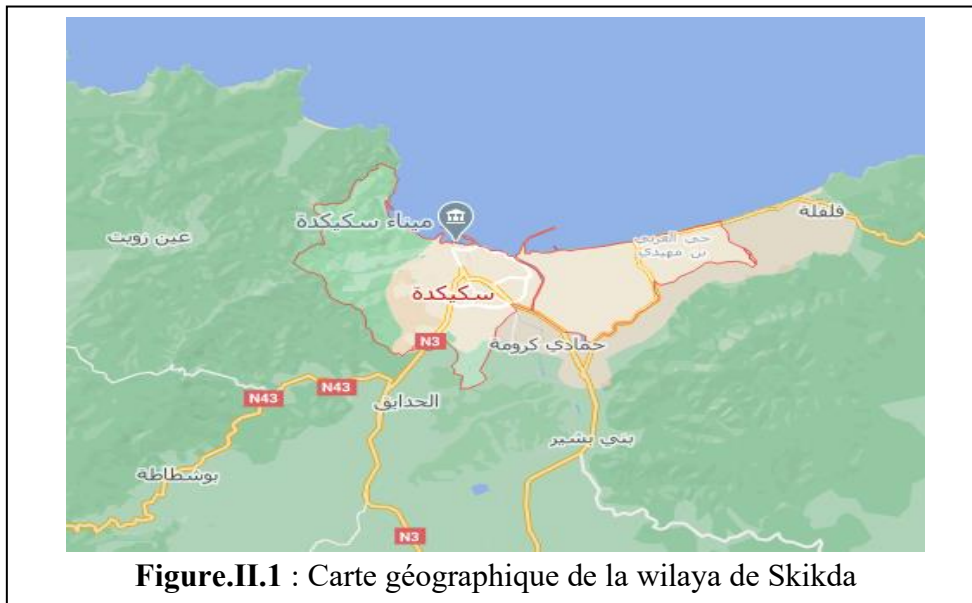


Figure.II.1 : Carte géographique de la wilaya de Skikda

II. Contexte climatique de la zone d'étude

Le diagramme ombrothermique de Gausson, établi à partir des données climatiques enregistrées entre 2002 et 2022 pour la région de Skikda, met en évidence deux phases climatiques distinctes (voir Figure II.2). Une période sèche s'étend sur cinq mois de l'année, de mai au début de septembre, tandis qu'une période humide couvre les autres mois, de mi-septembre à avril. Cette représentation illustre les variations saisonnières significatives du climat dans la région, avec des périodes de sécheresse suivies de saisons de précipitations plus abondantes.

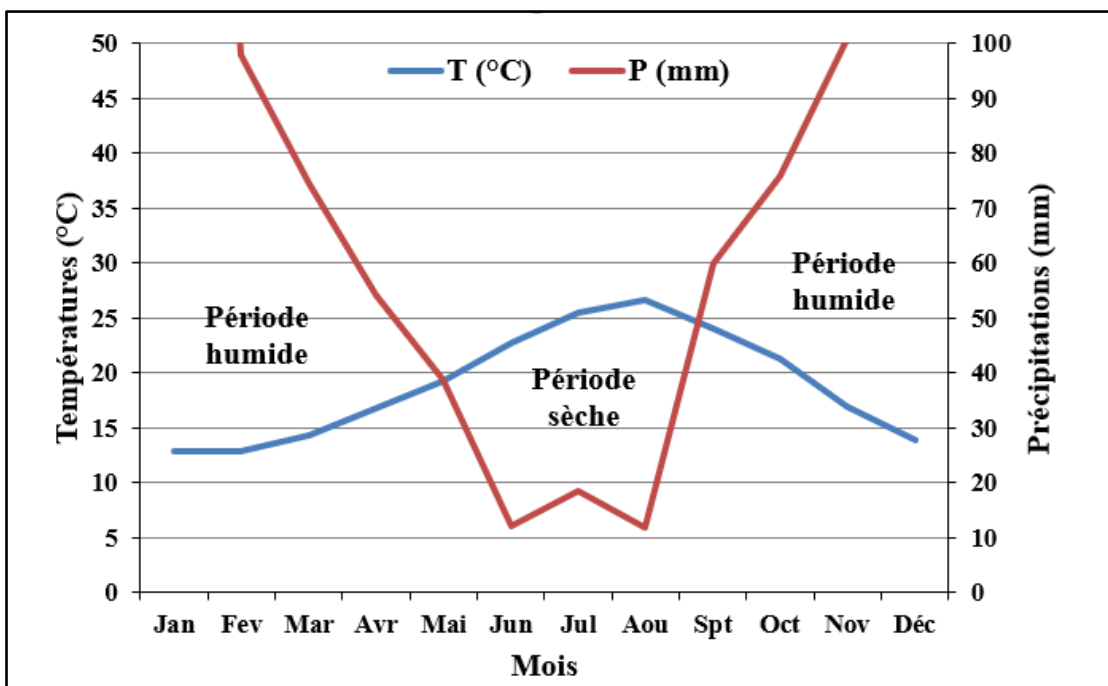


Figure.II.2 : Diagramme ombrothermique de Gausson de Skikda (ONM, 2022).

III. Description de la station d'épuration des eaux usées de Filfila

La station d'épuration des eaux usées d'El Arbi Ben M'hidi est implantée dans la commune de Filfila, relevant de la wilaya de Skikda et s'étend sur une superficie de 2,665 hectares. Elle est bordée par la mer Méditerranée. Elle assure le traitement des effluents issus de plusieurs zones à vocation résidentielle et touristique, notamment le centre de la commune de Filfila, la nouvelle ville de Bouzaâroura, ainsi que les quartiers Salah Chebel et El Arbi Ben M'hidi, en plus d'autres secteurs touristiques environnants.



Figure.II.3 : Situation de la STEP de Filfila (Source : Google maps, 2024)

Considérée comme une infrastructure stratégique pour la région, cette station d'épuration joue un rôle essentiel dans la préservation du littoral, en particulier dans la protection des plages contre la pollution engendrée par les rejets directs d'eaux usées en mer. Mise en service en novembre 2024, elle fonctionne depuis lors de manière continue. Sa capacité nominale est estimée à 153 000 équivalents-habitants (EH), avec un débit maximal de traitement de 22 000 m³ par jour. Les charges théoriques retenues pour son dimensionnement sont présentées dans le tableau ci-après :

Tableau.II.1. : Charges théoriques de la station d'épuration de Filfila (ONA, 2024)

Paramètre	Unité	valeur
Type réseau	Unitaire	/
Nature des eaux brutes	Domestique (urbaine)	/
Population	E.H	153000
Débit journalier	m ³ /j	22000
Débit de pointe horaire	m ³ /h	1522
DBO5 journalier	Kg/j	9180
DCO journalier	Kg/j	1530
MES	Kg/j	10710
NTK	Kg/j	1530
PT	Kg/j	383

IV. Equipements de la STEP

L'organisation de la station d'épuration repose sur des unités fonctionnelles, chacune ayant un rôle précis pour assurer un traitement efficace des eaux. La gestion de la station se fait à travers des équipements techniques et une coordination rigoureuse garantissant le bon déroulement du processus.

Tableau II.2. : Unités de la station d'épuration de Filfila (ONA, 2024).

01. ouvrage de prétraitement.	17. local de chloration.
02. dessablage-déshuilage.	18. canal venture.
03. bassin décantation.	19. fosse a flottants.
05. bassin d'aération.	20. loge gardien.
06. local des supprimeurs.	21. poste transformateur.
07. répartiteur.	22. logement de fonction.
08. clarificateur.	23. lit de séchage.
09. local d'extraction des boues.	24. guérite.
10. puisard a boue.	25. bâche a eau.
11. épaisseur.	28. bâtiment d'exploitation.
12. déshydratation mécanique.	29. pont bascule.
13. silos de stockage.	30. protection en gabions.
14. fosse toutes eaux.	31. bâtiment électrique.
15. atelier.	32. groupe électrique.
16. bassin de désinfection	33. citerne de stockage.



Figure.II.4 : Vue générale de la station d'épuration de Filfila

Le fonctionnement automatique de la STEP se fait principalement à partir de la salle de contrôle, depuis laquelle la visualisation et la modification des différents équipements de la station est applicable, à partir d'une interface de supervision appelé PCV.

V. Processus d'épuration des eaux usées de la STEP de Filfila

L'objectif principal de cette station est de réduire la charge polluante des eaux usées domestiques, afin de produire un effluent traité conforme aux normes environnementales et une qualité compatible avec les usages potentiels, notamment la réutilisation en irrigation agricole. En plus de contribuer à la protection du milieu naturel, cette station permet la valorisation des boues produites, pouvant être utilisées comme amendements organiques dans le secteur agricole. Le processus de traitement adopté au sein de cette installation comprend les étapes suivantes :

V.1.Prétraitement

Le prétraitement constitue une phase fondamentale du processus d'épuration des eaux usées. Il a pour objectif d'éliminer les déchets solides grossiers, les matières flottantes, les sables ainsi que les huiles et graisses, afin de protéger les ouvrages et équipements situés en aval et d'optimiser l'efficacité des traitements biologiques ultérieurs. Cette étape se décompose en plusieurs opérations successives :



Figure.II.5 : Prétraitement

V.1.1. Dégrillage grossier

Cette étape permet d'éliminer les particules grossières telles que le bois, les bouteilles en plastique, et autres déchets solides volumineux. Le dégrillage se fait à l'aide de grilles dont l'espacement entre les barreaux est de $\varnothing = 4 \text{ mm}$.

V.1.2. Dégrillage fin

Situé généralement au niveau du dessableur-déshuileur, il permet d'éliminer les particules plus fines. Les grilles utilisées possèdent un espacement plus réduit, de l'ordre de $\varnothing = 0,2$ mm. Cette étape fait partie du prétraitement et permet de protéger les étapes suivantes du colmatage.

V.1.3. Dessablage - Déshuilage

Cette opération a pour objectif d'éliminer les sables décantés et les huiles présentes dans l'eau. Les matières solides sont séparées par décantation, facilitée par un système de pompage. Ensuite, une phase de dégazage est réalisée pour éliminer le sulfure d'hydrogène (H_2S), ce qui permet d'accélérer la remontée et la séparation des matières flottantes.

V.2. Traitement secondaire (biologique)

Après le prétraitement, l'eau passe à l'étape du traitement biologique, qui repose principalement sur des procédés microbiologiques permettant d'éliminer les matières organiques dissoutes, l'azote et le phosphore. Ce traitement englobe les étapes suivantes :

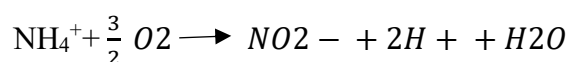
V.2.1. Bassin d'aération (bassin oxygéné)

Ce bassin constitue le cœur de la station d'épuration. C'est ici que se mélangent les différents flux d'eaux tels que les eaux usées brutes, les eaux recirculées et celles provenant du dessableur-déshuileur. Cette étape vise essentiellement à éliminer les nutriments tels que l'azote (N) et le carbone (C). Une partie de l'élimination du phosphore (P) peut aussi avoir lieu, principalement dans des zones spécifiques d'anoxie. Le traitement de l'azote s'effectue en deux étapes :

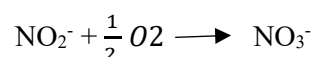
V.2.1.1. Nitrification (En condition aérobie)

Cette phase consiste en une oxydation biologique de l'azote ammoniacal (NH_4^+) réalisée par des bactéries spécifiques qui sont :

- Les Nitrosomonas transforment le NH_4^+ en nitrites (NO_2^-).



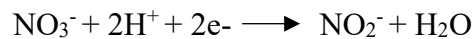
- Les Nitrobacter oxydent les nitrites (NO_2^-) en nitrates (NO_3^-).



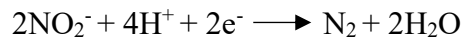
V.2.1.2. Dénitrification (En condition anoxique)

La dénitrification constitue la seconde phase du traitement de l'azote. Elle se déroule dans un bassin anoxique (sans oxygène dissous) et consiste en la réduction biologique des nitrates en azote gazeux (N₂), qui est ensuite libéré dans l'atmosphère. Ce processus se fait en deux étapes principales :

Les bactéries hétérotrophes comme *Pseudomonas* réduisent les nitrates (NO₃⁻) en nitrites (NO₂⁻).



Ensuite, sous l'action de bactéries telles que *Paracoccus*, les nitrites (NO₂⁻) sont convertis en azote gazeux (N₂).



Ce mécanisme permet d'éliminer efficacement l'azote minéral de l'eau, réduisant ainsi le risque d'eutrophisation dans le milieu récepteur.



Figure.II.6:Bassin biologique

V.2.2. Décantation secondaire (bassin de clarification)

Cette étape vise à séparer les boues biologiques de l'eau traitée. Elle a lieu dans un bassin appelé clarificateur secondaire où les boues activées se déposent au fond du bassin par décantation gravitaire et l'eau clarifiée, quant à elle, reste en surface et est évacuée vers les étapes finales ou directement vers le milieu naturel si elle est conforme.

Ce bassin est généralement conçu avec deux zones ; une zone centrale qui recueille l'eau claire et une zone périphérique qui récupère les boues (certaines flottantes) pour les renvoyer partiellement dans le bassin d'aération ou vers le traitement des boues.



Figure.II.7 : Bassin de clarification

V.3.Traitement tertiaire

Le traitement tertiaire constitue la dernière étape dans le processus de dépollution des eaux usées. Il repose sur l'injection de chlore (eau de Javel), qui agit non seulement comme désinfectant, mais aussi comme coagulant, facilitant l'élimination des impuretés résiduelles et des substances toxiques encore présentes dans l'eau. L'eau ainsi traitée passe ensuite par Oued Elksab, avant d'être rejetée dans la mer, sous réserve de la conformité aux analyses réglementaires effectuées sur les eaux usées urbaines.

V.4.Traitement des boues

Au niveau du clarificateur, neuf vannes télescopiques sont installées pour assurer la récupération des boues décantées au fond du bassin qui sont dirigées vers une pompe, qui les transfère ensuite vers un épaisseur. Cette étape permet de réduire le volume de la boue d'environ 30 % à 20 %, en concentrant les matières solides en suspension. La boue épaisse est ensuite acheminée vers une unité de déshydratation mécanique, où un polymère de type anionique blanc est ajouté afin de favoriser la floculation et d'améliorer l'efficacité de la séparation solide-liquide. Ce traitement permet d'obtenir une boue bien déshydratée, qui est par la suite stockée dans la benne.

Dans le but de valoriser cette boue, des analyses spécifiques sont réalisées dont les plus couramment mesurés figurent la siccité (taux de matière sèche) et la teneur en matières volatiles sèches (MVS), ces indicateurs permettant d'estimer la concentration et la stabilité biologique de la boue.



Figure.II.8 : Benne des boues

VI. Les heures de pointe

Les heures de pointe représentent les périodes de la journée durant lesquelles la station d'épuration enregistre des débits élevés et irréguliers des eaux usées, en raison des activités domestiques intensives des usagers. En général, ces pics se produisent deux fois par jour :

- **Le pic du matin** : Généralement entre 6h00 et 9h00 du matin, moment où la consommation d'eau augmente en raison des activités ménagères (douche, vaisselle, toilettes...).
- **Le pic du soir** : Entre 18h00 et 21h00, période où les familles sont de retour à la maison, ce qui entraîne une nouvelle augmentation de la consommation d'eau.

VI.1. Importance de la connaissance des heures de pointe

- **Conception technique** : Ces périodes sont prises en compte lors de la conception de la station afin de garantir sa capacité à absorber les débits maximaux sans compromettre son fonctionnement.
- **Gestion de l'exploitation** : Permet de réguler le fonctionnement des pompes, grilles et systèmes d'aération de manière optimale, évitant ainsi une consommation énergétique inutile en dehors des heures de pointe.
- **Prévention des surcharges** : La connaissance des heures de pointe permet de mettre en place des mesures préventives pour éviter les débordements des bassins ou la surcharge des équipements.

VI.2. Influence des saisons dans une zone touristique sur une station d'épuration

Dans les zones touristiques, le nombre d'usagers de la station d'épuration varie considérablement selon la saison, ce qui entraîne des fluctuations importantes au niveau du débit des eaux usées et de la charge organique, surtout pendant la période estivale.

a. En été (période de haute saison touristique)

- Augmentation significative du nombre de visiteurs, ce qui entraîne une élévation du volume quotidien d'eaux usées à traiter.
- Surcharge des équipements : La station peut fonctionner au-delà de sa capacité nominale, réduisant ainsi l'efficacité du traitement.
- Production accrue de boues : Due à une charge organique plus élevée. Modification possible de la composition des eaux usées (plus de matières organiques, graisses, détergents, etc. liés aux activités touristiques).

b. En hiver (basse saison)

- Réduction du nombre d'habitants temporaires, ce qui diminue fortement les débits entrants.
- Fonctionnement déséquilibré des installations : certains équipements peuvent devenir inefficaces en cas de très faibles charges.
- Consommation énergétique inutile si le fonctionnement n'est pas adapté à la faible activité.

VI.3. Mesures d'adaptation aux variations saisonnières

- Conception flexible de la station avec des unités modulables ou fonctionnant par intermittence.
- Système de surveillance automatique pour ajuster en temps réel le fonctionnement selon les débits.
- Bassin de stockage tampon pour accumuler temporairement les excès en période de pointe.
- Entretien préventif renforcé avant la saison estivale pour assurer une pleine efficacité de l'installation.

Conclusion

La présentation de la station d'épuration des eaux usées constitue une étape fondamentale pour comprendre son rôle central dans la protection de l'environnement et la gestion durable des ressources en eau. Ce chapitre a permis de mettre en lumière les objectifs principaux de la station, ses composantes techniques ainsi que son fonctionnement général. Cette vision globale permet de mieux appréhender les enjeux liés au traitement des eaux usées.

Chapitre III :

Matériel et méthodes

Introduction

Ce chapitre décrit l'ensemble des moyens matériels, techniques et méthodologiques mis en œuvre pour la réalisation de cette étude, en précisant les protocoles expérimentaux des paramètres physico-chimiques, bactériologiques mesurés, ainsi que les outils utilisés pour le traitement des données, notamment pour la détermination des indices de qualité et du diagramme hydrogéochimiques.

III.1. Protocoles expérimentaux des analyses physicochimiques

III.1.1. Détermination de la demande biochimique en oxygène (DBO₅)

Principe

La demande biochimique en oxygène (DBO₅) est la masse d'oxygène moléculaire dissoute nécessaire aux micro-organismes pour la dégradation par oxydation des matières organiques contenus dans l'eau, dans des conditions définies.

Matériel Utilisé

- DBO mètre
- Incubateur
- Flacon coloré pour DBO₅

Mode Opérateur

- Evaluer la plage de mesure de l'échantillon à analyser et choisir le volume d'échantillon
Ajuster la valeur de pH.
- Mesurer exactement le volume d'échantillon à l'aide du ballon de débordement et le verser dans un flacon DBO on utilise un entonnoir.
- Ajouter l'inhibiteur de nitrification selon .
- Placer un barreau d'agitation dans le flacon DBO.
- Remplir le joint caoutchouc avec 3-4 gouttes de solution KOH et le placer dans le flacon.
- Visser la sonde DBO sur les flacons.
- Poser l'échantillon sur le support à flacons et démarrer l'appareil.
- Incuber l'échantillon selon la norme (DBO₅ à 20°C).

Tableau.III.1. Volume et dosage de l'échantillon pour la DBO₅

Plage de mesure DBO₅(mg/l)	Volume d'échantillon	Dosage ATH
0-40	428	10 gouttes
0-80	360	10 gouttes
0-200	244	5 gouttes
0-400	157	5 gouttes
0-800	94	3 gouttes
0-2000	56	3 gouttes
0-4000	21.7	1 goutte

III.1.2. Détermination de la demande chimique en oxygène (DCO)

La demande chimique en oxygène qui correspond à la quantité d'oxygène (en milligramme) qui a été consommée par voie chimique pour oxyder l'ensemble des matières oxydables présentes dans l'eau. La DCO est particulièrement indiquée pour mesurer la pollution d'un effluent urbaine.

Appareillage

- Thermostat
- Spectrophotomètre
- Micropipette

Mode opératoire

Sortie

- Ouvrir une cuvette de réaction a couvercle blanc à visser et y verser 2 ml d'eau déminéralisée (cuvette étalon).
- Ouvrir une deuxième cuvette de réaction a couvercle blanc à visser et y verser 2 ml D'échantillon (cuvette échantillon).
- Bien refermer les cuvettes avec leur couvercle respectif. Mélanger le contenu en l'agitant avec précaution. (ATTENTION : dégagement de chaleur).
- Exposer pendant 2 heures les cuvettes à une température de 150°C dans le réacteur thermique préchauffé.
- (Attention : les cuvettes sont brûlantes). Retirer les cuvettes du bloc chauffant et laisser.

- Refroidir jusqu'à une température de 60°C ou moins. Bien mélanger le contenu en retournant les cuvettes lorsqu'elles sont encore chaudes. Puis laisser refroidir les cuvettes à température ambiante et procéder à la mesure.
- Placer la cuvette étalon (remarques 3et4) dans la chambre de mesure Positionnement 1.
- Appuyer sur la touche ZÉRO.
- Retirer la cuvette de la chambre de mesure.
- Placer la cuvette échantillon dans la chambre de mesure. Positionnement 1.
- Appuyer sur la touche TEST.
- Le résultat de la mesure s'affiche et indique le DCO en mg/l.

III.1.3. Détermination du potentiel hydrotimétrique pH

Principe

Le pH est en relation avec la concentration des ions hydrogène [H⁺] présent dans l'eau ou les solutions, Le potentiel de l'électrode est lié à l'activité des ions H⁺. Le pH doit être compris entre 6,5 et 8,5.

Appareil : pH Mètre



Figure.III.1. pH Mètre

Réactif : Tampon pH = 10 ; pH = 7 ; pH = 4.

Mode opératoire

A) Etalonnage de l'appareil

- Allumer le pH Mètre.
- Rincer l'électrode avec l'eau distillée.

- Prendre dans un petit bécher, la solution tampon pH = 7.
- Agiter bien la solution.
- Tremper l'électrode de pH dans la solution tampon pH = 7.
- Laisser stabiliser un moment jusqu'à affichage du standard 2.
- Enlever l'électrode et la rincer abondamment avec l'eau distillée.
- Étalonner de la même manière avec les solutions tampon pH = 10 ou pH = 4.
- Puis rincer abondamment l'électrode avec l'eau distillée.

B) Dosage de l'échantillon

- Prendre environ 100 ml d'eau à analyser.
- Agiter la solution bien.
- Tremper l'électrode dans le bêcheur.
- Laisser stabiliser un moment.
- Puis noter le pH.

III.1.4. Détermination de la température (T)

Généralité

Il est important de connaître la température de l'eau avec une bonne précision en effet, Celle-ci joue un rôle dans la solubilité des sels et surtout du gaz, dans la dissociation des sels dissous donc sur la conductivité électrique, dans la détermination du pH.

La température influence aussi directement la réaction de dissolution de l'oxygène dans L'eau c'est à dire plus l'eau est froide plus la dissolution est importante.

Principe

Les mesures de la température de l'eau sur le lieu de prélèvement de l'échantillon sont

Une partie intégrante du traitement des eaux.

Appareillage

La température est mesurée au même temps avec le pH par le PH Mètre

III.1.5. La conductivité électrique (CE)

Toute eau est plus ou moins conductrice du courant électrique, elle est due à la présence

Dans le milieu d'ions qui sont mobiles dans un champ électrique. Elle dépend de la nature de

Ces ions et de leur concentration. La conductivité électrique d'une eau augmente avec la température, car la mobilité des Ions augmente avec elle. Donc la conductivité s'agit de la capacité de l'eau à conduire le courant.

Principe

La mesure est basée sur le principe d'utilisation d'un appareil spécifique qu'on nomme conductimètre à électrodes.

Appareillage

- Conductimètre à électrodes.
- pH mètre.

Mode opératoire

- Rincer plusieurs fois l'électrode de l'appareil d'abord avec de l'eau distillée.
- plonger l'électrode dans le récipient qui contient l'eau à examiner en prenant soin que

L'électrode soit complètement immergée.

- Laisser stabiliser un moment.
- Puis noter la conductivité.

III.1.6. Détermination des matières en suspension (MES)

La détermination de MES dans les eaux usées se fait selon deux méthodes soit par

Filtration pour les eaux de faible charge (traitée) ou par centrifugation pour les eaux de forte Charge (eaux brute).

Les deux méthodes comportent le même principe et même mode opératoire sauf que là

Centrifugation utilise une appaerille appelée centrifugeuse et des coupelles anoxie par contre

La filtration basée sur une autre appaerille s'appelle pompe à vide et utilise des filtros. Si pour

Ça nous a expliqué une seule méthode utilisée, la filtration à pompe à vide.

Principe

Séparation des matières en suspensions par filtration sur disque en fibre de verre puis

Séchage dans étuve à 105°C pendant deux heures.

Matériel utilise

- Papier filtre.
- Rampe de filtration sous vide.
- Pompe à vide.
- Etuve (105°C).
- Dessiccateur.
- Verrerie de laboratoire.
- Balance de précision.



Figure III.2. Étuve

Mode opératoire

- Mouiller le filtre avec de l'eau distillée
- Placer le filtre sur les verres de montre puis les sécher à l'étuve à 105°C pendant au moins 2 heures.
- Laisser refroidir les filtres dans dessiccateur ou à l'air libre près de la balance quelque
- Minute pour éviter la contamination par la poussière.
- Peser le filtre sur la balance (m_0 en mg).
- Placer le filtre sur le système de filtration.
- Filtrer un volume (Ex : $V=100ml$) de l'échantillon, puis rincer l'éprouvette graduée avec Environ 20 ml d'eau distillée.
- Récupérer le filtre par des pinces et remis dans son verre de montre.
- Placer le filtre dans l'étuve à 105 °C pendant 2 heures.
- Retirer le filtre de l'étuve et laisser s'équilibrer à température ambiante.
- Peser le filtre dans la balance de précisions (m_1 en mg).

Calcul

$$MES (mg /l) = (m1 - m0) * 1000 / V$$

m_0 : La masse du disque filtrant avant utilisation

m_1 : La masse du disque filtrant après utilisation (avec les MES)

V : Le volume d'échantillons versé sur le filtre en ml.

III.1.7. Détermination le dosage des phosphates (PO_4)

Mode opératoire

Sortie

Dissolution :

- Ouvrir une cuvette de réaction et ajouter 5 ml d'échantillon.
- Ajouter une cuillère graduée no. 4 (blanc) remplie à ras bord de Phosphate-103. (Fermer
- Immédiatement la bouteille de réactif !).
- Refermer la cuvette avec son couvercle et mélanger le contenu en agitant légèrement.
- Exposer pendant 30 minutes les cuvettes à une température de 100 °C dans le réacteur Thermique préchauffé.
- Retirer le tube du thermo réacteur. (ATTENTION : les tubes sont chauds !) Retourner le tube et le laisser refroidir jusqu'à la température ambiante.

Procédé :

- Placer la cuvette a valeur zéro (portant l'étiquette rouge) livrée dans la chambre de mesure Positionnement.
- Appuyer sur la touche ZÉRO.
- Retirer la cuvette de la chambre de mesure.
- Ajouter 2 gouttes (0,1 ml) de Phosphate-101 dans le tube prépare à l'avance.
- Refermer la cuvette avec son couvercle et mélanger le contenu en agitant légèrement.
- Ajouter une cuillère graduée no. 4 (blanc) remplie à ras bord de Phosphate-102.
- Refermer la cuvette avec son couvercle et mélanger son contenu en l'agitant jusqu'à ce que le réactif soit complètement dissout.
- Mettre la cuvette dans la chambre de mesure. Positionnement.

- Appuyer sur la touche TEST. Respecter un temps de réaction de 10 minutes. La mesure démarre automatiquement lorsque le temps de réaction est écoulé.
- Le résultat s'affiche pour le Phosphate total en mg/l.

III.1.8. Détermination de l'azote total (NTK)

Mode opératoire

Sortie

Dissolution :

- Remplir un des tubes de minéralisation fourni avec 5 ml d'échantillon d'eau.
- Ajouter une cuillère graduée no. 8 (noir) remplie aras bord de Digestion Regent.
- Refermer la cuvette avec le couvercle et mélanger le contenu.
- Chauffer les tubes pendant 60 minutes dans le réacteur préchauffé a une température de 100°C.
- Après 60 minutes, retirer les tubes du réacteur. (Attention : la cuvette est brûlante !).
- Mélanger les tubes et laisser refroidir jusqu'à la température ambiante.
- Ajouter une cuillère graduée no. 4 (blanc) remplie à ras bord de Compensation Regent.
- Refermer la cuvette avec le couvercle et mélanger le contenu.
- Utiliser cet échantillon prétraite pour la procédure de test suivante.

Procédé

- Placer la cuvette a valeur zéro (portant l'étiquette rouge) livrée dans la chambre de mesure Positionnement.
- Appuyer sur la touche ZÉRO.
- Retirer la cuvette de la chambre de mesure.
- Ouvrir un tube de réactif et ajouter 0,5 ml de l'échantillon prétraité (étape 8).
- Fermer correctement le tube avec le bouchon et retourner plusieurs fois le tube pour
- Mélanger son contenu. (Attention : le tube devient chaud !)
- Ajouter 0,2 ml de Nitrate-111.15. Refermer la cuvette avec son couvercle et mélanger le Contenu.
- Mettre la cuvette dans la chambre de mesure. Positionnement.
- Appuyer sur la touche TEST. Attendre un temps réaction de 15 minutes.
- La mesure s'effectue automatiquement après écoulement du temps de réaction.
- Le résultat s'affiche sur l'écran en mg/l azote.

III.1.9. Détermination dosage des nitrites (NO_2^-)

Mode opératoire

Sortie

- Placer la cuvette à valeur zéro (portant l'étiquette rouge) livrée dans la chambre de mesure Positionnement.
- Appuyer sur la touche ZÉRO.
- Retirer la cuvette de la chambre de mesure.
- Ouvrir une cuvette de réaction et ajouter 2 ml d'échantillon.
- Refermer la cuvette avec son couvercle et mélanger le contenu en agitant légèrement.
- Ajouter une cuillère graduée no. 8 (noir) remplie à ras bord de Nitrite-101.
- Refermer la cuvette avec son couvercle et dissoudre son contenu en l'agitant.
- Mettre la cuvette dans la chambre de mesure. Positionnement.
- Appuyer sur la touche TEST. Attendre 10 minutes de temps de réaction
- La mesure s'effectue automatiquement après écoulement du temps de réaction
- Le résultat de la mesure s'affiche et indique le nitrite en mg/l.

III.1.10. Détermination dosage des nitrates (NO_3^-)

Mode opératoire

Entrée/Sortie

- Placer la cuvette à valeur zéro (portant l'étiquette rouge) livrée dans la chambre de mesure Positionnement.
- Appuyer sur la touche ZÉRO.
- Retirer la cuvette de la chambre de mesure.
- Ouvrir une cuvette de réaction et ajouter 0,5 ml d'échantillon.
- Refermer la cuvette avec son couvercle et mélanger le contenu en agitant légèrement.
(ATTENTION : le tube devient chaud !)
- Ajouter de 0,2 ml Nitrate-111.
- Refermer la cuvette avec son couvercle et mélanger le contenu en agitant légèrement.
- Placer la cuvette échantillon dans la chambre de mesure. Positionnement.
- Appuyer sur la touche TEST. Respecter un temps de réaction de 15 minutes. La mesure
- Démarre automatiquement lorsque le temps de réaction est écoulé.
- Le résultat de la mesure s'affiche et indique le nitrate en mg/l.

III.1.11. Détermination de l'azote ammoniacal (NH_4^-)

Mode opératoire

Entrée

- Verser 10 ml d'échantillon dans une cuvette propre de 24 mm et fermer le couvercle de la cuvette.
- Mettre la cuvette dans la chambre de mesure. Positionnement.
- Appuyer sur la touche ZÉRO.
- Retirer la cuvette de la chambre de mesure.
- Ajouter une pastille d'AMMONIA No. 1 directement de l'emballage protecteur dans l'échantillon de 10 ml et l'écraser à l'aide d'un agitateur propre.
- Ajouter une pastille d'AMMONIA No. 2 directement de l'emballage protecteur dans le même échantillon et l'écraser à l'aide d'un agitateur propre.
- Refermer la cuvette avec le couvercle et mélanger le contenu en agitant jusqu'à dissolution
- Complète de la pastille.
- Placer la cuvette dans la chambre de mesure. Positionnement.
- Appuyer sur la touche TEST. Attendre un temps de réaction de 10 minutes. La mesure s'effectue automatiquement après écoulement du temps de réaction.
- Le résultat de la mesure s'affiche et indique l'ammonium en mg/l.

III.1.12. Détermination de la dureté totale (THT)

Principe

En milieu tamponnée, les alcalineux terreux présents dans l'eau sont amenés à former un complexe du type chélate par le sel disodique de l'acide éthylène diamine tétracétique à pH 10. La disparition des dernières traces d'éléments libres à doser est décelée par le virage d'un indicateur spécifique, le noir ériochrome T.

Mode opératoire

- Un milieu tamponné a pH=10 est indispensable car c'est à cette valeur de pH que le complexe EDTA -Mg est le plus stable, d'une part et d'autre part le virage du NET est bien apprécié à cette valeur de pH.
- La présence de sels ammoniacaux, empêche le Mg de précipiter à l'état de $\text{Mg}(\text{OH})_2$

Matériel

- Une burette avec support
- Agitateur magnétique
- Erlenmeyer de 250ml

Mode opératoire

- Dans une fiole conique de 150 ml introduire :
- 50 ml d'eau à analyser
- 2,5 ml de tampon ammoniacal.
- 1 ml de complexonate de Mg à 1%
- Trois gouttes de NET ou une pincée de poudre.
- -Titrer par la solution centimolaire d'EDTA jusqu'au virage au bleu. Vérifier que la coloration ne change plus par l'addition d'une goutte supplémentaire d'EDTA.
- Soit le nombre de ml d'EDTA utilisé.

$$Ca = (V(\text{ volume versé}) * 20 * 0.4008) \text{ mg/l} \longrightarrow R$$

$$(R \text{ mg/l}) / 20 = \text{meq}$$

Le magnésium (Mg)

$$Mg = THT (\text{meq}) - Ca (\text{meq}) = R \text{ meq}$$

$$Mg = R \text{ meq} * 12 = R \text{ mg/l}$$

III.1.14. Détermination de la dureté calcique (Ca²⁺)

Réactif

- E.D.T.A
- Murexide
- Hydroxyde de potassium (KOH)
- Pour l'hydroxyde de potassium en a (56.1g) remplir un bicher de 200 ml avec (KOH) avec 1000 ml d'eau distillé.

Principe

Dureté calcique désigne la concentration de calcium dissous dans l'eau, principalement sous forme d'ions calcium (Ca²⁺). Elle fait partie de la dureté totale de l'eau, qui inclut également les ions magnésium.

Matériel

Le même matériel comme la dureté totale

III.1.13. Détermination du TAC

Réactif

- Acide sulfurique (H₂SO₄)
- Phénol phtaléine
- Méthyle orange.

Principe

La détermination du TA et du TAC permet d'évaluer les teneurs de l'eau en bicarbonates, en carbonates et en hydroxydes alcalins. Ces déterminations sont basées sur la neutralisation d'un certain volume d'eau par un acide minéral dilue, en présence d'un indicateur colore.

Mode opératoire

- Prendre 100ml d'eau traité dans erlenmeyer
- Ajouter 01 au 03 goutte de phénol phtaléine, s'il n'y'a pas de coloration TA=0
- Ajouter 02 au 03 gouttes méthyle orange et en versé goutte à goutte l'acide sulfurique jusqu'à le virage.

$$TAC = V \text{ versè } F$$

$$TAC = (V - 1)/5 = R \text{ meq}$$

$$HCO_3 = TAC F * 12.2 = mg/l$$

$$HCO_3 = R \text{ meq} * 61 = R \text{ mg/l}$$

III.1.14. Determination de chlorure (Cl⁻)

Reactive

- Acide nitrique HNO₃
- Nitrate d'argent AgNO₃
- Alinferique (sulfate de fer et d'ammonium)
- Thiocyanate de potassium KSCN.

Principe

Les ions chlorures en solution réagissent avec le nitrate d'argent en produisant un précipité blanc qui noircit à la lumière

Préparation

- Pour acide nitrique : 95ml d'acide nitrique dans 250 ml d'eau distillé
- Pour nitrate d'argent : 4.247g dans 250ml d'eau distillé.

- Pour Alin féérique : 250ml HNO₃ + 33.5g(sulfate de fer)+ 1000 ml d'eau distillé.
- Pour thiocyanate de potassium : 4.859 g dans 500ml H₂O.

Mode opératoire

- Prendre 100ml d'eau analysées
- 05ml acide nitrite
- 10 ml AgNO₃.
- 01 ml alinferique.

En titre par le KSCN de potassium jusqu'à le virage.

$$Cl^- = (V - V') \longrightarrow Cl^- = (10 - V') = R$$

$$Cl^- = R \text{ meq} * 35.5 = R \text{ mg/l.}$$

III.1.15. Dosage du potassium (k⁺)

Réactifs

Dissoudre 1.907 g de KCl (ayant été séché à 105°C pendant une heure de temps) dans un litre d'eau distillée. Cette solution a, ainsi, une concentration égale à 1000 mg/l de potassium (K^{*}). Soit C, = 1000 mg/l. La solution doit être stockées dans une bouteille en plastique. A partir de C, préparer quotidiennement une solution de 10 mg/l, en prélevant 1 ml q.s.p. 100ml

Appareillage



Figure.III.3. : spectrophotomètre

Mesures

Faire passer la solution de 10 mg/l trois fois, et ça doit afficher « 10» Faire passer ensuite les échantillons. Si la concentration en potassium dépasse 10 mg/l, Procéder à la dilution de l'échantillon. Les concentrations correspondent aux extinctions x Facteur de dilution.

III.1.16. Dosage de sodium (Na^+)

Réactifs

Une devant Peser 2.54 g de chlorure de sodium, ayant séché pendant une heure, dans une étuve à 105°C. Dissoudre cette même quantité dans de l'eau distillée et compléter à 1L. Cette solution a une concentration de 1 000 mg/l de sodium. Conserver cette solution dans une bouteille en plastique. Par dilution, préparer quotidiennement une solution de 10 mg/l en prélevant 1 ml de la solution Précédente dans 100 ml d'eau distillée.

Mesures

Faire passer au photomètre à flamme la solution d'étalonnage de 10 mg/l, trois fois. Faire passer les échantillons. Si la concentration en Na^* est supérieure à 10 mg/l; Procéder à La dilution de l'échantillon. Les concentrations correspondent aux extinctions x Facteur de dilution.

III.2. Analyse bactériologique

III.2.1. Recherche et dénombrement des coliformes totaux et fécaux

III.2.2. Définition

Les coliformes sont des bacilles Gram négatif, non sporulés, oxydase négatif, aéro-anaérobies facultatifs. Ils se développent en présence de sels biliaires et fermentent le lactose avec production d'acide et de gaz à 37°C en 24 à 48h. Les coliformes thermotolérants (ou fécaux) se distinguent par leur capacité à se développer à 44°C, indiquant ainsi une contamination d'origine fécale (Guiraud & Galzy, 1980 ; Lapied & Petransxiene, 1981).

Principe

La colimétrie regroupe l'ensemble des méthodes permettant la recherche et le dénombrement des coliformes dans l'eau, en tant qu'indicateurs de pollution fécale. Leur capacité à fermenter le lactose produit un gaz observable dans une cloche de Durham et un changement de couleur du milieu (acidification). Le nombre de bactéries est estimé statistiquement à l'aide de la table de Mac Grady (NPP) (Champsaur, 2007).

III.2.3. Test présomptif : recherche des coliformes totaux

Milieu utilisé :

Bouillon lactosé au pourpre de bromocrésol (BCPL).

- Trois séries de dilutions (10 ml, 1 ml, 0,1 ml) sont ensemencées dans des tubes contenant une cloche de Durham.

- Incubation à 37°C pendant 24 à 48 heures.

Résultat positif :

- Présence de gaz ($\geq 1/10$ de la cloche),

- Trouble du milieu + virage au jaune (indique fermentation du lactose). Le nombre de

coliformes totaux est ensuite déterminé via la table de Mac Grady, exprimé par ml ou 100 ml d'eau analysée.

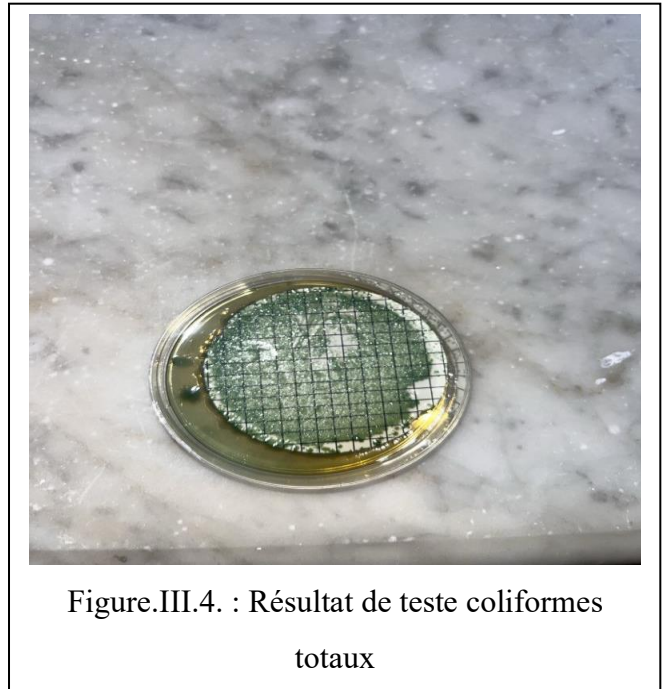


Figure.III.4. : Résultat de teste coliformes totaux

III.2.4. Test confirmatif : recherche des coliformes fécaux

- Les tubes positifs sont repiqués dans le milieu Schubert, puis incubés à 44°C pendant 24 heures.

- Après incubation, on ajoute 2 à 3 gouttes de réactif de Kovacs. Résultat positif (présence d'Escherichia coli)

- Dégagement de gaz

- Apparition d'un anneau rouge en surface (indique la production d'indole). Le nombre de coliformes fécaux est calculé selon la table de Mac Grady et exprimé pour 100 ml d'eau.

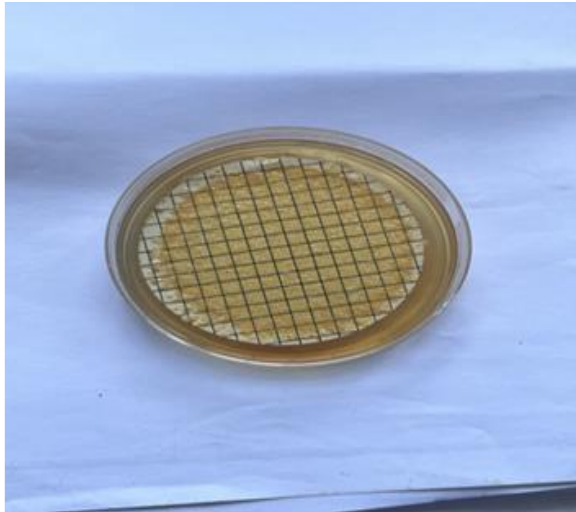


Figure.III.5 : Résulta de teste coliformes fécaux



Figure.III.6 : Résulta de confirmation du teste coliformes fécaux et Escherichia coli

III.2.5. Recherche des streptocoques fécaux (SF)

III.2.5.1. Définition

Les streptocoques fécaux appartiennent à la famille des Streptococcaceae, constituée de coques Gram positif, non sporulées, généralement groupées en paires ou en chaînes de longueur variable. Ils sont catalase négatifs, immobiles, et certains genres comme les *Pediococcus* peuvent présenter une pseudo-catalase (Guiraud et Galzy, 1980). Dans le domaine de la microbiologie de l'eau, la présence de streptocoques fécaux est un indicateur de contamination fécale humaine ou animale.



Figure.IV.7: Résulta de teste les streptocoques fécaux .

Principe

La détection des streptocoques fécaux repose sur une méthode en deux étapes :

Test présomptif : Réalisé à l'aide du milieu Rothe, ensemencé avec différentes dilutions de l'échantillon d'eau (10 ml, 1 ml, 0,1 ml). Après incubation à 37°C pendant 48 h, les tubes présentant un trouble ou un virage du milieu sont considérés comme présomptivement positifs.

Test confirmatif : Les cultures présomptivement positives sont repiquées sur le milieu EVA Litsky et incubées à 37°C pendant 24 h. La présence d'un trouble microbien et d'un virage de couleur du milieu, accompagnée d'une pastille violette au fond du tube, confirme la présence de streptocoques fécaux.

III.3. Faciès chimique de l'eau

Le faciès chimique constitue une représentation graphique de la composition hydrochimique de l'eau, obtenue à l'aide du diagramme de Piper, généré ici à l'aide du logiciel Diagramme. L'analyse du faciès chimique de l'eau épurée destinée à l'irrigation représente une étape essentielle pour évaluer l'efficacité du traitement appliqué au niveau de la station d'épuration des eaux usées (STEP) de Filfila.

III.4. Calcul de l'indice de qualité de l'eau (WQI)

L'Indice de Qualité de l'Eau (WQI) est défini comme un outil numérique permettant d'évaluer l'état de l'eau en combinant plusieurs paramètres physico-chimiques en une seule valeur, exprimant ainsi le degré de conformité de l'eau aux normes établies. Cela facilite l'évaluation environnementale et la prise de décision.

Seize (16) paramètres importants ont été sélectionnés pour le calcul de WQI : le pH, la conductivité électrique (CE), la température (T), la demande biologique en oxygène sur 5 jours (DBO5), les phosphates (PO_4), l'ammonium (NH_4^+), les nitrates (NO_3^-), la demande chimique en oxygène (DCO), les matières en suspension (MES), le sodium (Na^+), le chlorure (Cl^-), le calcium (Ca^{2+}), les nitrites (NO_2^-), le potassium (K^+) et les bicarbonates (HCO_3^-). Cet indice est utilisé comme méthode de classification de la qualité de l'eau, en comparant les valeurs mesurées aux normes internationales. Il permet de simplifier et d'interpréter la qualité de l'eau de manière globale, à travers une seule valeur numérique classée selon des niveaux de danger définis dans le tableau III.2. Dans le cadre de cette étude, le WQI a été appliqué aux eaux traitées de la station d'épuration de la commune de Filfila, dans le but d'évaluer leur aptitude à être utilisées pour l'irrigation.

Cet indice est calculé en suivant la méthode de l'indice arithmétique pondéré (Brown et al., 1970 ; Brown et al., 1972 ; Chatterji et Raziuddin, 2002 ; Xidana et Xidana , 2010; Lagrid, 2022). Dans cette approche, une valeur numérique appelée poids relatif (W_i), spécifique à chaque paramètre physico-chimique, est calculée (Tab.III.2) selon la formule suivante :

$$W_i = k S_i$$

Où :

k : constante de proportionnalité et peut également être calculée à l'aide de l'équation suivante:

$$k = 1 \sum_{i=1}^n (1/S_i) n i = 1$$

n : nombre de paramètres

S_i : valeur maximale de la norme standard Algérienne de la réutilisation des eaux usées épurées à des fins d'irrigation (JORA, 2012) de chaque paramètre en mg/l sauf pour le pH, la T°C et la conductivité électrique.

Ensuite, une échelle d'évaluation de la qualité (Q_i) est calculée pour chaque paramètre en divisant la concentration par la norme dudit paramètre et en multipliant l'ensemble par 100 comme dans la formule suivante :

$$Q_i = (C_i / S_i) \times 100 \quad (3)$$

Q_i : échelle d'évaluation de la qualité de chaque paramètre.

C_i : la concentration de chaque paramètre en mg/l Finalement l'indice global de la qualité de l'eau est calculé par l'équation suivante :

$$IQE = \sum_{i=1}^n Q_i \times W_i n i = 1 \sum_{i=1}^n W_i n i = 1 / \quad (4)$$

Cinq classes de qualité peuvent être identifiées selon les valeurs de l'indice de qualité de l'eau WQI (Tab.III.2.).

Tableau III.2 : Classification de l'indice de qualité des eaux d'irrigation (Meireles et al., 2010)

WQI	Restrictions relatives à l'utilisation de l'eau	Recommandations	
		Plante	Sol
85-100	Aucune restriction	Pas de risque de toxicité pour la plupart des plantes	Peut être utilisé pour la majorité des sols présentant une faible probabilité de problèmes de salinité et de sodicité, en recommandant le lessivage dans le cadre des pratiques d'irrigation, à l'exception des sols à très faible perméabilité.
70-85	Faible restriction	Éviter les plantes sensibles au sel	Recommandé pour les sols irrigués à texture légère ou à perméabilité modérée, le lessivage des sels étant recommandé. La sodicité du sol peut se produire dans les sols à texture lourde. Il est recommandé d'éviter son utilisation dans les sols à forte teneur en argile.
55-70	Restriction Modérée	Les plantes présentant une tolérance modérée aux sels peuvent être cultivées	Peut-être utilise dans des sols avec des valeurs de perméabilité modérées à élevées, étant donné que l'on suggère un lessivage modéré des sels.
40-55	Haute restriction	Doit être utilisé l'irrigation de plantes présentant une tolérance moyenne à élevée aux sels avec des pratiques spéciales de contrôle de la salinité, à l'exception de l'eau contenant des faibles valeurs de HCO_3^- , Na^+ et Cl^-	Peut être utilisé dans les sols à haute perméabilité sans couches compactes. Il convient d'adopter un calendrier d'irrigation à haute fréquence pour les eaux dont la CE est supérieure à 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$ et le SAR supérieur à 7.0
0-40	Restriction sévère	Seules les plantes à forte tolérance au sel à l'exception des eaux présentant des valeurs extrêmement faibles de Na^+ , Cl^- et HCO_3^-	Il faut éviter de l'utiliser pour l'irrigation dans des conditions normales. Dans des cas particuliers, il peut être utilisé occasionnellement. Les eaux à faible teneur en sel et à SAR élevé nécessitent l'application de gypse. Dans les eaux à forte teneur en sel, les sols doivent être très perméables et l'excès d'eau doit être appliqué à la terre pour éviter l'accumulation de sel.

Chapitre IV :

Résultats et discussion

Introduction

Ce chapitre expose les résultats des analyses physico-chimiques et bactériologiques réalisées sur les eaux usées traitées au niveau de la STEP de Filfila, aboutissant à la détermination du faciès chimique et de l'indice de qualité de l'eau pour l'irrigation. Ces données permettent d'évaluer l'efficacité du traitement appliqué, en lien avec la conformité de l'eau épurée aux normes d'aptitude à l'irrigation.

IV.1. Evaluation des paramètres physico-chimiques

L'évaluation des paramètres physico-chimiques permet de mieux connaître la qualité de l'eau. Elle consiste à mesurer différents paramètres jugés utiles pour savoir si l'eau peut être utilisée sans danger pour l'irrigation.

IV.1.1. Résultats des statistiques descriptives

Cette section présente les résultats des statistiques descriptives de seize (16) paramètres physicochimiques. Elle permet de résumer les principales caractéristiques des paramètres analysés à travers la moyenne, l'écart-type, le minimum et le maximum. Les résultats sont révélés dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1. Résultats des statistiques descriptives

Variables	N	Moyenne	Ecart-type	Min	Max	Limites	Normes
pH	11	7,20	0,16	6,89	7,5	6,5 – 8,5	JORA (2012)
CE (µS/cm)	11	1060,8	46,2	1011	1140	3000	JORA (2012)
T (°C)	11	22,3	4,45	14,6	27,2	30	JORA (2012)
MES (mg/l)	11	5,90	2,85	1	10,5	30	JORA (2012)
DCO (mg d'O ₂ /l)	11	47,28	13,88	29	79,5	90	JORA (2012)
DBO ₅ (mg d'O ₂ /l)	11	15,36	4,8	6	22	30	JORA (2012)
PO ₄ (mg/l)	11	3,52	1,16	1,97	5,67	2	FAO (2003)
NO ₂ (mg/l)	11	0,39	0,35	0,07	1,13	3	FAO (1985)
NO ₃ (mg/l)	11	14,99	8,64	3,03	25,7	30	JORA (2012)
NH ₄ (mg/l)	11	1,611	1,42	0,12	5,47	2	FAO (1985), OMS (1989)
HCO ₃ (mg/l)	6	84,5	5,05	80	90	518,5	JORA (2012)
Cl (mg/l)	6	151,47	23,19	142	198,8	354,5	JORA (2012)
Ca (mg/l)	6	58,73	9,03	52,02	76,09	40 - 120	H.G. Peterson (1999)
Mg (mg/l)	6	191,3	27,3	148	219,9	6 - 25	H.G. Peterson (1999)
K (mg/l)	6	6,86	0,58	6,33	7,81	0,5 - 5	H.G. Peterson (1999)
Na (mg/l)	6	38,8	3,34	36,7	45,5	69	FAO (2015)

Le tableau ci-dessus présente un aperçu global de la variabilité des concentrations de seize paramètres physicochimiques. Il permet ainsi d'évaluer la qualité de l'effluent final et son aptitude à être réutilisé pour l'irrigation.

Les valeurs de pH oscillent entre 6,89 et 7,5, avec une moyenne de 7,21, traduisant une eau légèrement alcaline. Ces valeurs restent dans l'intervalle recommandé de 6,5 à 8,5 selon les normes du JORA (2012) pour la réutilisation agricole des eaux usées.

La conductivité électrique (CE) varie de 1011 à 1140 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une moyenne de 1060,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$, inférieure à la limite maximale de 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (JORA, 2012). Cela témoigne d'une minéralisation relativement élevée, typique des eaux usées.

La température de l'eau, comprise entre 14,6 et 27,2 $^{\circ}\text{C}$, avec une moyenne de 22,3 $^{\circ}\text{C}$, reste compatible avec les processus biologiques des stations d'épuration et respecte le seuil réglementaire de 30 $^{\circ}\text{C}$ (JORA, 2012).

Les matières en suspension (MES) affichent une moyenne de 5,91 mg/l, avec un minimum de 1 mg/l et un maximum de 10,5 mg/l, bien inférieure à la limite de 30 mg/l fixée par JORA, (2012). Cela indique une bonne efficacité de clarification par décantation ou filtration.

Les valeurs de la demande chimique en oxygène (DCO) sont comprises entre 29 et 79,5 mg O_2/l , avec une moyenne de 47,28 mg/l. La demande biochimique en oxygène sur 5 jours (DBO_5) varie de 6 à 22 mg O_2/l , avec une moyenne de 15,36 mg/l. Ces deux paramètres demeurent inférieurs aux seuils réglementaires (90 mg/l pour la DCO et 30 mg/l pour la DBO_5), selon JORA (2012), ce qui suggère une réduction notable de la charge organique, bien qu'une fraction résiduelle persiste.

En revanche, les orthophosphates (PO_4^{3-}) présentent une moyenne de 3,52 mg/l, avec des valeurs allant jusqu'à 5,7 mg/l, dépassant la limite de 2 mg/l fixée par JORA, (2012). Cette surcharge en phosphates pourrait engendrer un risque d'eutrophisation si l'effluent est rejeté sans contrôle dans le milieu naturel.

Pour les composés azotés, on trouve que les nitrites (NO_2^-) varient de 0,07 à 1,13 mg/l, avec une moyenne de 0,39 mg/l, ainsi que les nitrates (NO_3^-), de 3,03 à 25,7 mg/l, avec une moyenne de 14,59 mg/l, alors que l'ammonium (NH_4^+) présente une moyenne de 1,61 mg/l avec un pic de 5,47 mg/l. Ces résultats traduisent une nitrification partielle et une efficacité modérée du traitement biologique de l'azote. Comparés aux seuils fixés par la FAO (1985, 2015) et l'OMS (1986), qui sont respectivement de 3 mg/l (NO_2^-), 30 mg/l (NO_3^-) et 2 mg/l (NH_4^+), seuls les

nitrates restent systématiquement dans les normes, tandis que les nitrites et l'ammonium atteignent parfois des niveaux inquiétants.

Concernant les éléments dissous, les données montrent que les bicarbonates (HCO_3^-) présentent une moyenne de 84,5 mg/l (entre 80 et 90 mg/l), bien inférieures à la limite de 518,5 mg/l mentionnée dans le JORA, (2012). Les chlorures (Cl^-) aussi restent inférieurs à la limite de 354,5 mg/l, avec une moyenne de 151,47 mg/l. Ainsi que les teneurs en calcium (Ca^{2+}), comprises entre 52,02 et 76,09 mg/l, avec une moyenne de 58,73 mg/l, respectent la plage recommandée de 40 à 120 mg/l (H.G. Peterson, 1999).

En revanche, les concentrations en magnésium (Mg^{2+}) varient de 148 à 219,9 mg/l, avec une moyenne de 191,3 mg/l dépassent largement les normes de 6 à 25 mg/l (H.G. Peterson, 1999), ce qui peut poser des problèmes de salinité et de déséquilibre du rapport $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ dans le sol.

Pour les cations majeurs et selon H.G. Peterson, (1999) on trouve que le potassium (K^+) varie de 6,33 à 7,81 mg/l, avec une moyenne de 6,86 mg/l, dépassant les recommandations de 0,5 à 5 mg/l. Le sodium (Na^+), avec une moyenne de 38,8 mg/l, reste inférieur à la limite de 69 mg/l, indiquant une salinité modérée.

IV.2. Variations spatiotemporelles des paramètres physicochimiques

IV.2.1. Variation du potentiel d'hydrogène (pH)

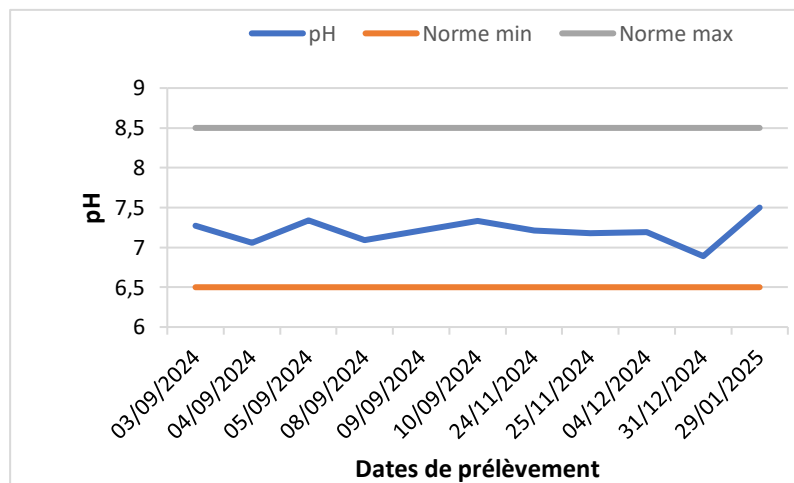


Figure IV.1. Variations spatiotemporelles du potentiel d'hydrogène (pH) de l'eau épurée

Les valeurs de pH relevées varient de 6,89 à 7,5, avec une moyenne de 7,21, traduisant un environnement neutre à légèrement alcalin. Ces résultats respectent les normes établies par le JORA (2012), qui préconisent une plage acceptable comprise entre 6,5 et 8,5. Un pH situé dans cet intervalle est favorable

à la biodisponibilité des éléments nutritifs dans le sol, ce qui facilite leur absorption par les plantes tout en limitant les risques de carences ou de toxicités liées aux déséquilibres d'acidité.

IV.2.2. Variations spatiotemporelles de la conductivité électrique (CE)

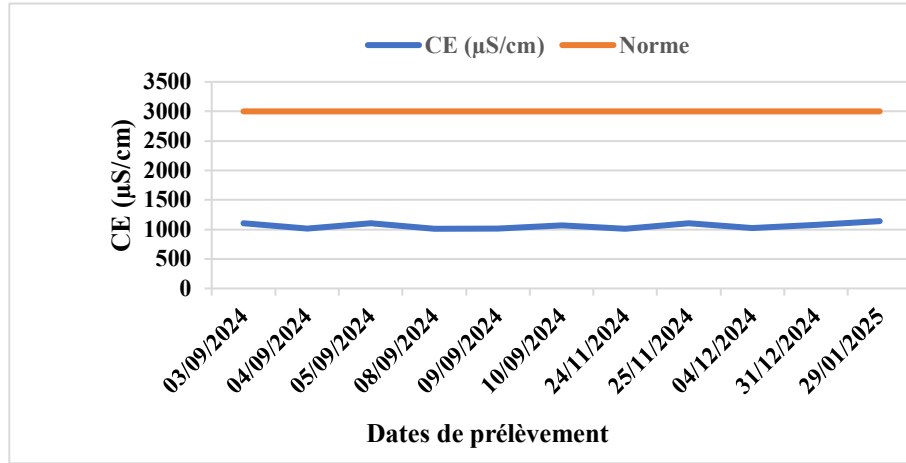


Figure IV.2. Variations spatiotemporelles de la conductivité électrique (CE) de l'eau épurée

Les valeurs de la conductivité électrique varient entre 1011 et 1140 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ce qui traduit une présence importante d'ions dissous, caractéristique des eaux usées traitées, où certains sels persistent après le traitement. Ces valeurs restent bien en dessous de la limite fixée par le JORA (2012) pour les eaux d'irrigation ($<3000 \mu\text{S}/\text{cm}$). Une conductivité modérée comme celle-ci indique une salinité acceptable pour la majorité des cultures. Elle permet un usage agricole sans risque immédiat de stress osmotique pour les plantes. Toutefois, une accumulation prolongée de sels pourrait, à long terme, affecter la structure du sol et la disponibilité de l'eau pour les racines, d'où la nécessité d'un suivi régulier de drainage.

IV.2.3. Variations spatiotemporelles de la température (T)

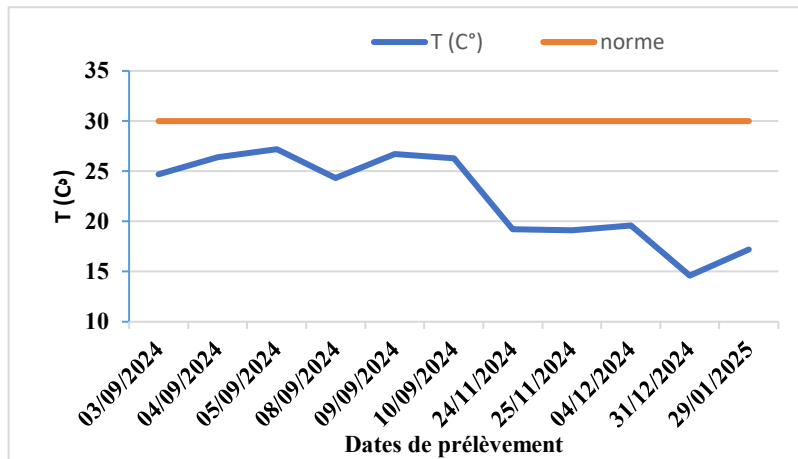


Figure IV.3. Variations spatiotemporelles de la température (T) de l'eau épurée

Les températures mesurées varient entre 14,6°C et 27,2°C, ce qui reste en dessous de la limite de 30°C fixée par la norme JORA (2012). Des températures modérées favorisent le bon développement des racines et stimulent l'activité des micro-organismes du sol, ce qui améliore l'absorption des éléments nutritifs et contribue à la fertilité du sol.

IV.2.4. Variations spatiotemporelles des matières en suspension (MES)

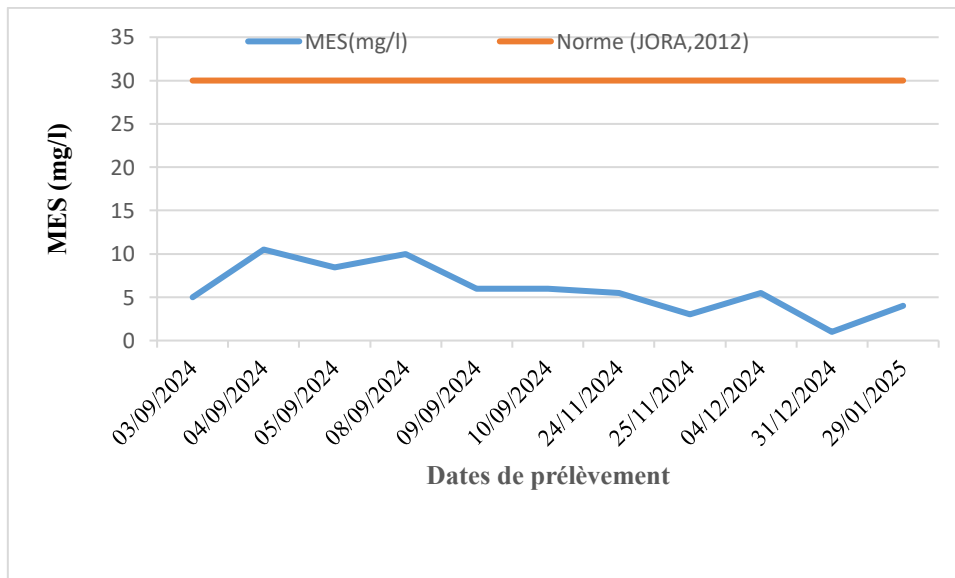


Figure IV.4. Variations spatiotemporelles des matières en suspension (MES) de l'eau épurée

Les matières en suspension sont des particules insolubles, fines, d'origine minérale ou organique, biodégradables ou non. Les valeurs mesurées varient entre 1 et 10,5 mg/L, avec une moyenne de 5,90 mg/L, ce qui reflète une bonne efficacité des procédés de traitement ayant

permis une réduction significative de la turbidité de l'eau. Ces valeurs restent bien en dessous du seuil de 30 mg/l fixé par le JORA (2012). Cette faible teneur en MES est favorable à l'irrigation, car elle limite le risque de colmatage des systèmes d'irrigation, assurant ainsi une meilleure aération du sol et une disponibilité optimale de l'oxygène pour les racines des plantes.

IV.2.5. Variations spatiotemporelles de la demande chimique en oxygène (DCO)

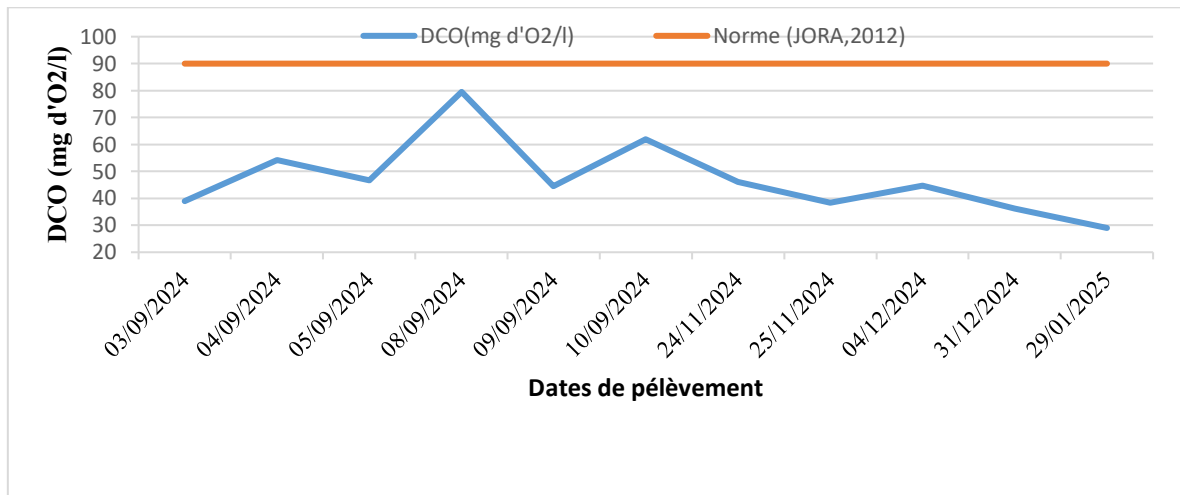


Figure IV.5. Variations spatiotemporelles de la demande chimique en oxygène (DCO) de l'eau épurée.

Les valeurs de la DCO varient entre 29 et 79,5 mg d'O₂/l, avec une moyenne de 47,28 mg d'O₂/l. Ces valeurs ne dépassent pas la norme de 90 mg d'O₂/l du JORA (2012) qui indiquent la présence résiduelle mais dans des limites acceptables des eaux épurées à des fins d'irrigation. Des niveaux modérés de DCO permettent de limiter l'appauvrissement en oxygène du sol, préservant ainsi l'activité microbienne bénéfique à la croissance des plantes.

IV.2.6. Variations spatiotemporelles de la demande biochimique en oxygène (DBO₅)

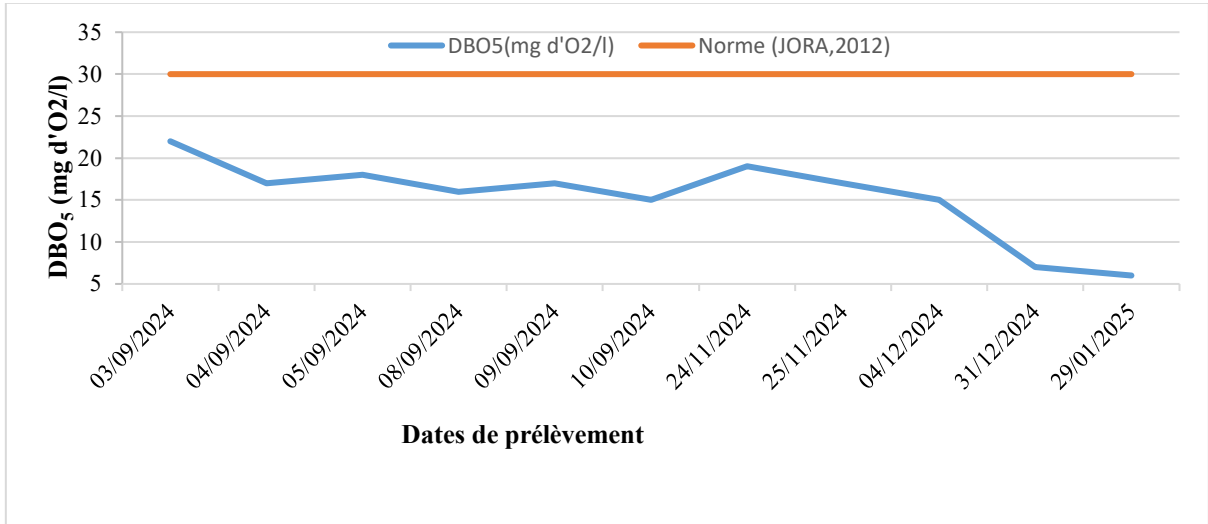


Figure IV.6. Variations spatiotemporelles de la demande biochimique en oxygène (DBO₅) de l'eau épurée

La DBO₅ mesure la quantité d'oxygène consommée par les microorganismes pour dégrader la matière organique biodégradable sur une période de cinq jours. Les valeurs relevées varient entre 6 et 22 mg/l, avec une moyenne de 15,36 mg/l, traduisant une bonne efficacité du traitement biologique. Ces valeurs restent inférieures au seuil de 30 mg/l fixé par le JORA (2012). Un faible taux de DBO₅ est bénéfique pour l'irrigation, car il limite la consommation d'oxygène dans le sol par les processus microbiens, préservant ainsi l'oxygène disponible pour les racines et évitant les conditions anaérobies nuisibles à la croissance des plantes.

IV.2.7. Variations spatiotemporelles des orthophosphates (PO₄)

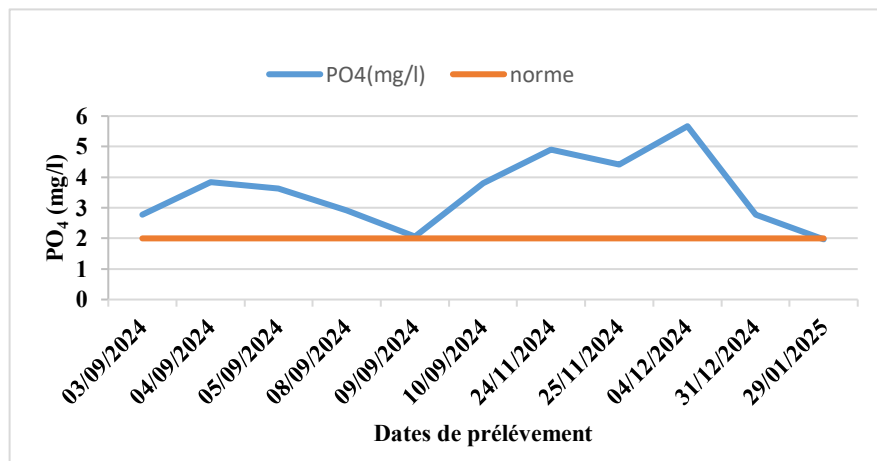


Figure IV.7. Variations spatiotemporelles des orthophosphates (PO₄) de l'eau épurée.

Les concentrations en phosphates (PO_4^{3-}) mesurées dans l'effluent varient de 1,97 à 5,67 mg/l, avec une moyenne de 3,52 mg/l. Cette moyenne dépasse la limite recommandée de 2 mg/l fixée par la FAO (2003) pour l'eau destinée à l'irrigation. Un tel excès peut avoir des implications notables sur l'environnement et la nutrition des cultures. D'un côté, les phosphates sont des éléments essentiels à la croissance des plantes, intervenant dans la photosynthèse, le transfert d'énergie et le développement racinaire. Une concentration modérée peut donc favoriser le rendement agricole. Toutefois, à des concentrations élevées et répétées, l'accumulation de phosphore dans le sol peut entraîner un déséquilibre des nutriments, notamment en bloquant l'absorption d'oligo-éléments comme le zinc et le fer, provoquant des carences chez les plantes. A long terme, une surcharge en phosphate peut aussi modifier la structure chimique du sol, en favorisant la précipitation de phosphates insolubles, réduisant ainsi leur disponibilité réelle pour les plantes et peut contribuer à l'eutrophisation des milieux aquatiques.

IV.2.8. Variations spatiotemporelles des nitrites (NO_2^-)

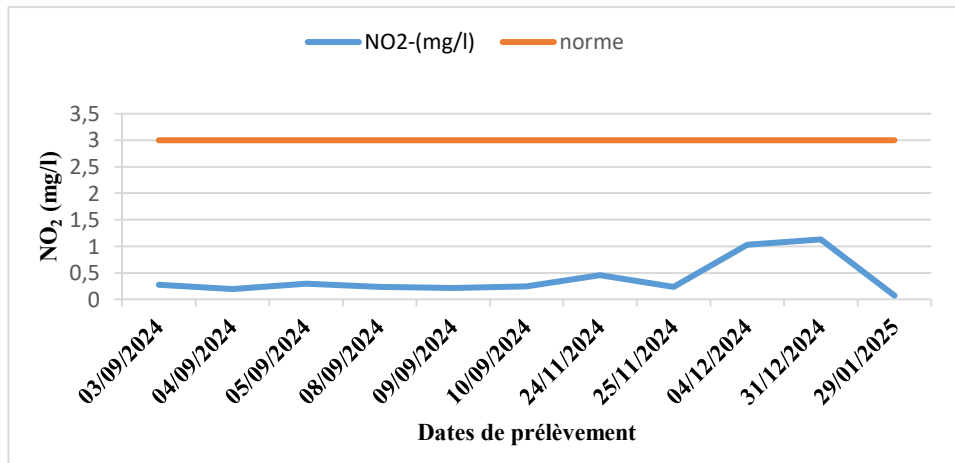


Figure IV.8. Variations spatiotemporelles des nitrites (NO_2) de l'eau épurée

Les valeurs des nitrites observées vont de 0,07 à 1,13 mg/L, avec une moyenne de 0,39 mg/L. Ces concentrations très faibles par rapport à la limite maximale (3 mg/L) de la FAO (1985) indiquent une bonne dynamique des réactions biologiques, sans accumulation de nitrites, un composé intermédiaire potentiellement instable. À ces niveaux, les nitrites ne présentent aucun risque pour les plantes, évitant toute toxicité racinaire ou perturbation du métabolisme azoté.

IV.2.9. Variations spatiotemporelles des nitrates (NO_3^-)

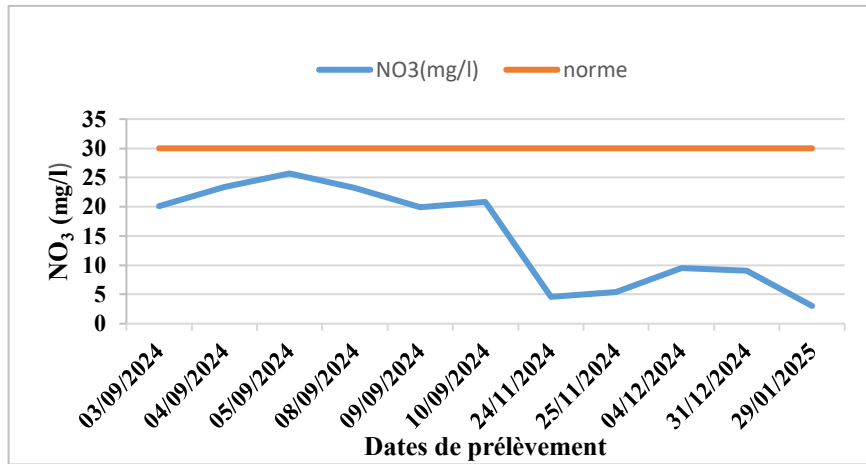


Figure IV.9. Variations spatiotemporelles des nitrates (NO_3^-) de l'eau épurée

Les teneurs en nitrates varient de 0,03 à 25,7 mg/l, avec une moyenne de 14,99 mg/l. Ces valeurs restent inférieures à la limite admise (≤ 30 mg/L) de FAO (2015), traduisant un bon déroulement du processus de nitrification et une transformation efficace de l'azote. Les nitrates à ce niveau favorisent la nutrition azotée des plantes, stimulant leur croissance sans présenter de risque de toxicité ou de déséquilibre nutritif.

IV.2.10. Variations spatiotemporelles de l'ammonium (NH_4)

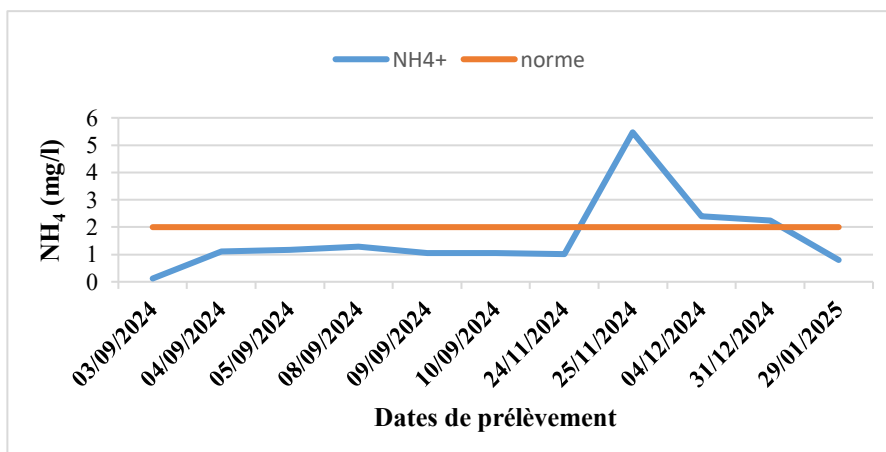


Figure IV.10. Variations spatiotemporelles de l'ammonium (NH_4) de l'eau épurée

Les valeurs de NH_4^+ varient entre 0,12 et 5,47 mg/L, avec une moyenne de 1,61 mg/L, ce qui reste inférieur à la norme d'irrigation fixée par la FAO (1985) et l'OMS (1989), établie à 2 mg/L. Cela indique que la concentration moyenne d'ammonium dans l'eau traitée ne dépasse pas la limite recommandée pour l'irrigation. Cependant, la valeur maximale enregistrée (5,47 mg/L) dépasse largement la norme, ce qui peut présenter un risque ponctuel pour la qualité de

l'eau d'irrigation, surtout en cas d'utilisation continue ou d'accumulation dans les sols. Ainsi, bien que la moyenne reste dans les normes, la présence de pics élevés nécessite de suivi régulier pour s'assurer de l'adéquation de cette eau avec les exigences de l'irrigation à long terme.

IV.2.11. Variations spatiotemporelles des bicarbonates (HCO₃)

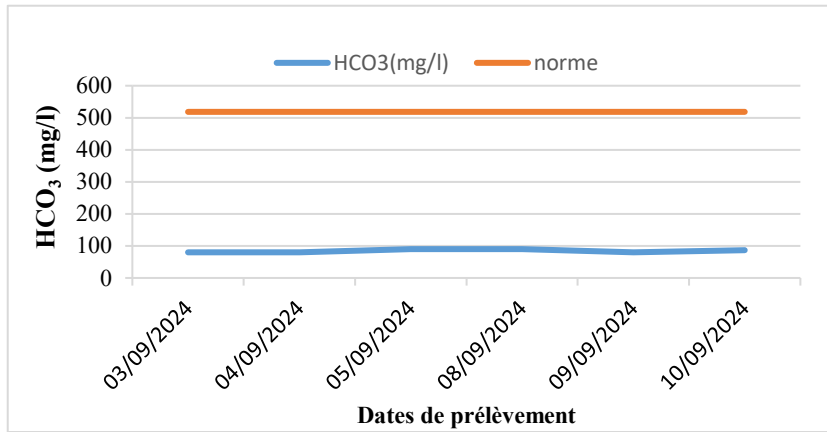


Figure IV.11. Variations spatiotemporelles des bicarbonates (HCO₃) de l'eau épurée

Les valeurs de bicarbonates (HCO₃⁻) se situent entre 80 et 90 mg/L, avec une moyenne de 84,5 mg/L. Ces valeurs restent inférieures à la norme de 518,5 mg/L fixée par JORA (2012), ce qui indique une concentration faible en bicarbonates dans les eaux analysées. Ainsi, il n'y a pas de risque d'alcalinisation excessive du sol, et la qualité de l'eau à ce niveau est considérée comme bonne pour l'irrigation.

IV.2.12. Variations spatiotemporelles des chlorures (Cl)

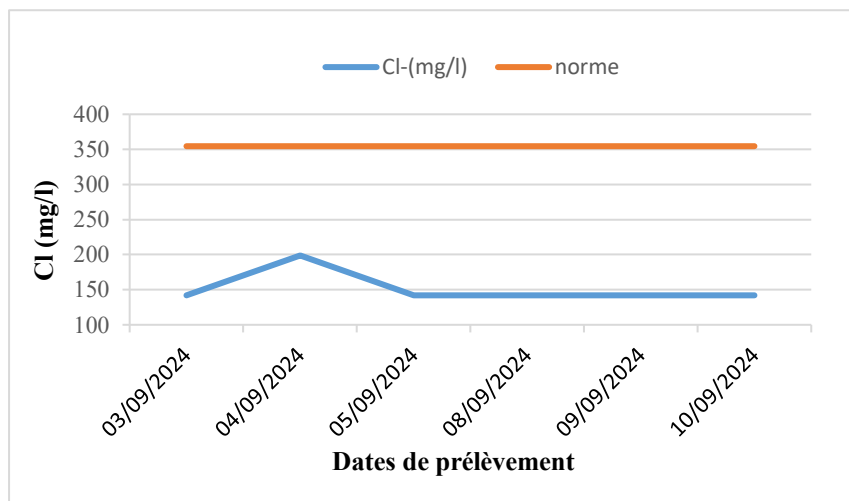


Figure IV.12. Variations spatiotemporelles des chlorures (Cl) de l'eau épurée

Les teneurs en chlorure varient entre 142 et 198,8 mg/L, avec une moyenne de 151,47 mg/L. Ces niveaux sont bien inférieurs à la limite admissible (354,5 mg/L) selon JORA (2012), ce qui indique un taux de chlorures maîtrisé. Cette concentration modérée ne représente pas un risque

immédiat pour les cultures, mais une accumulation à long terme, notamment en sols légers ou mal drainés, peut entraîner une toxicité pour certaines plantes sensibles et affecter leur croissance.

IV.2.13. Variations spatiotemporelles de calcium (Ca)

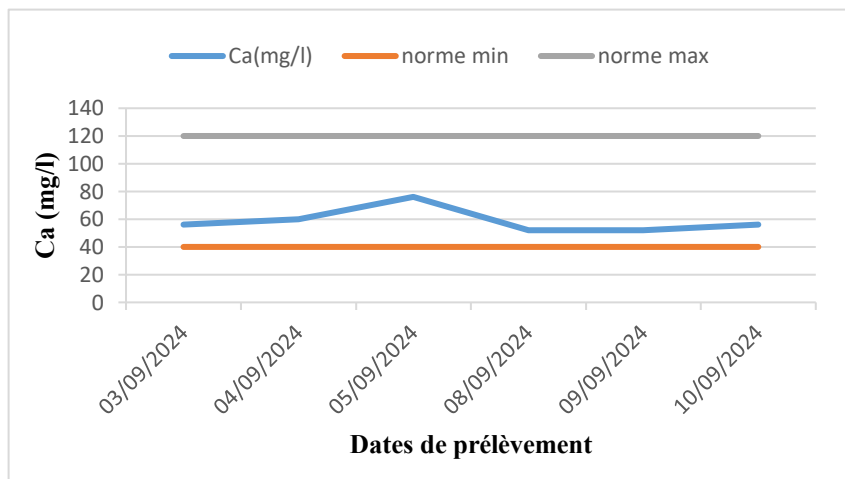


Figure IV.13. Variations spatiotemporelles de calcium (Ca) de l'eau épurée

Les concentrations de calcium varient entre 52,02 et 76,09 mg/L, avec une moyenne de 58,73 mg/L. Ces valeurs s'inscrivent dans la plage recommandée (40–120 mg/L) selon H.G. Peterson (1999), indiquant un équilibre satisfaisant en calcium. Ce niveau favorise le développement des racines, renforce les parois cellulaires et améliore la structure du sol, ce qui contribue à une meilleure absorption des nutriments par les plantes.

IV.2.14. Variations spatiotemporelles de magnésium (Mg)

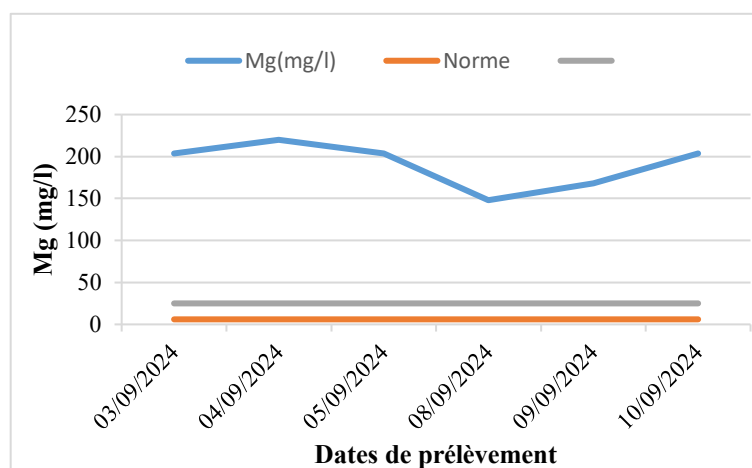


Figure IV.14. Variations spatiotemporelles de magnésium (Mg) de l'eau épurée

Les valeurs de magnésium sont comprises entre 148 et 219,9 mg/L, avec une moyenne élevée de 191,3 mg/L. Ce niveau dépasse largement la fourchette recommandée (6 – 25 mg/L) selon

H.G. Peterson (1999), témoignant d'une forte accumulation de magnésium et donc d'une dureté prononcée de l'eau. Cette teneur excessive peut nuire à l'absorption d'autres éléments nutritifs essentiels comme le calcium et le potassium, entraînant des déséquilibres nutritionnels chez les plantes, une croissance ralentie et une baisse de rendement.

IV.2.15. Variations spatiotemporelles de sodium (Na)

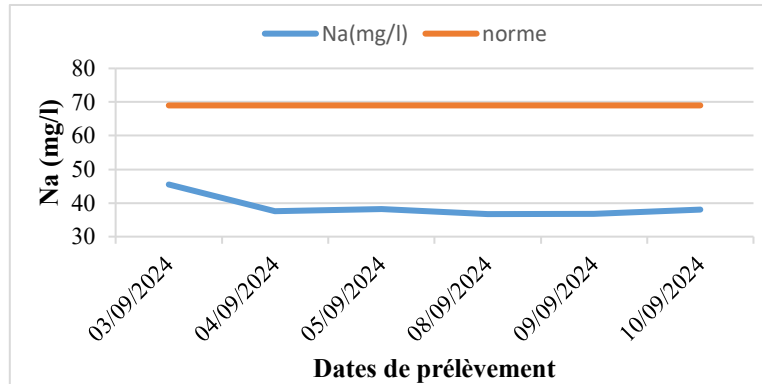


Figure IV.15. Variations spatiotemporelles de sodium (Na) de l'eau traitée

Les teneurs en sodium varient entre 36,7 et 45,5 mg/L, avec une moyenne de 38,8 mg/L. Ces niveaux restent inférieurs à la limite recommandée (69 mg/L) selon FAO (2015), indiquant une concentration modérée en sodium. Cependant, une accumulation progressive du sodium dans le sol peut entraîner une dispersion des particules d'argile, ce qui dégrade la structure du sol, réduit son infiltration et nuit à la capacité des plantes à absorber l'eau.

IV.2.16. Variations spatiotemporelles de potassium (K⁺)

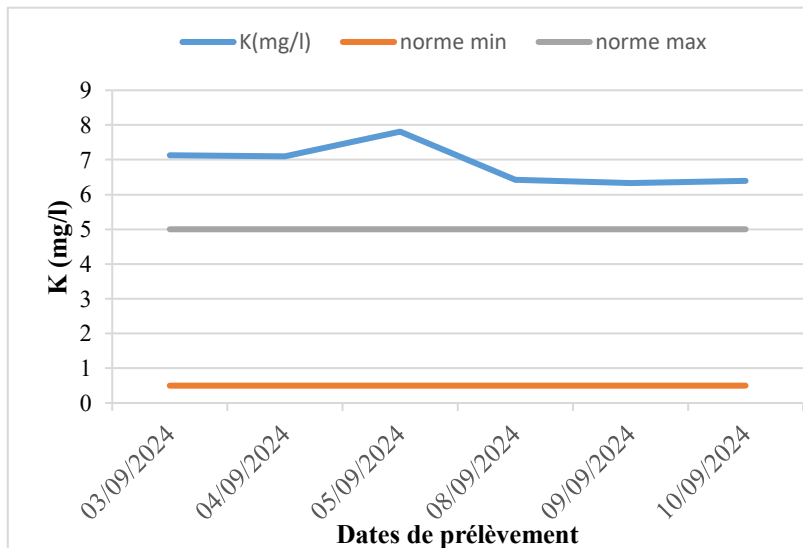


Figure IV.16. Variations spatiotemporelles de potassium (K⁺) de l'eau épurée

Les concentrations de potassium se situent entre 6,33 et 7,81 mg/L, avec une moyenne de 6,86 mg/L, ce qui dépasse la plage de référence (0,5 – 5 mg/L) selon H.G. Peterson (1999). Cela traduit un excès de potassium dans les eaux traitées pouvant entraîner des déséquilibres nutritionnels chez les plantes, notamment en limitant l'absorption d'autres cations essentiels comme le magnésium et le calcium, ce qui peut affecter leur croissance et leur développement.

IV.3. Résultats des paramètres bactériologiques

L'évaluation de la qualité bactériologique des eaux épurées constitue une étape fondamentale dans le cadre de leur réutilisation à des fins d'irrigation. Les résultats présentés dans cette section visent à analyser la charge bactérienne résiduelle dans les eaux traitées, à identifier d'éventuels dépassements des seuils recommandés par JORA (2012). En effet, les eaux usées, même après traitement, peuvent contenir des agents pathogènes d'origine fécale susceptibles de représenter un risque sanitaire pour les cultures, les sols et les consommateurs. Parmi les indicateurs les plus couramment utilisés figurent les coliformes totaux, les coliformes fécaux, les streptocoques fécaux et l'*Escherichia coli* qui permettent de juger l'efficacité du traitement et de la conformité de l'effluent aux normes sanitaires. Le tableau IV.2 révèle les résultats des analyses bactériologiques de l'eau épurée au niveau de la nouvelle STEP de Filfila.

Les résultats du suivi microbiologique des eaux usées traitées de la STEP de Filfila aux dates du 20, 25 et 30 avril 2025 mettent en évidence une contamination significative dépassant les seuils réglementaires fixés par la norme JORA (2012), ce qui soulève des préoccupations quant à leur utilisation pour l'irrigation, en particulier des cultures maraîchères et celles qui se consomment crues.

Tableau IV.2. Résultats du suivi bactériologique de l'eau épurée au niveau de la STEP de Skikda.

Paramètres microbiologique	20/04/2025	25/04/2025	30/04/2025	Norme
Coliforme totaux	>100	>100	>100	<100 (JORA, 2012)
Coliforme fécaux	51	50	00	Absence ou < 100 UFC/100 ml
Streptocoques fécaux	+++++	+++	+++	<1000 UFC/100 ml (JORA, 2012)
<i>Escherichia coli</i>	+++++	+++++	+++	< 100 UFC/100 ml (JORA, 2012)

- **Coliformes totaux** : Les concentrations sont systématiquement supérieures à 100 UFC/100 ml à toutes les dates analysées, traduisant une contamination bactérienne générale persistante. Ce dépassement constant compromet la conformité hygiénique de l'effluent destiné à l'irrigation.
- **Coliformes fécaux** : Bien que les valeurs enregistrées les 20 et 25 avril (51 et 50 UFC/100 ml) respectent la norme (<100 UFC/100 ml), l'absence de coliformes fécaux le 30 avril pourrait refléter une amélioration ponctuelle du traitement ou une variabilité dans la charge entrante. Toutefois, cette seule amélioration ne compense pas les autres indicateurs préoccupants.
- **Streptocoques fécaux** : Des niveaux élevés sont observés sur les trois dates, signalés par des valeurs semi-quantitatives (+++ à +++++), ce qui suggère une contamination fécale importante. Même si la norme tolère jusqu'à 1000 UFC/100 ml, l'intensité observée peut représenter un risque microbiologique, notamment en cas de contact direct entre l'eau d'irrigation et la partie comestible des cultures.
- **Escherichia coli** : La présence abondante de E. coli (de +++ à +++++) dépasse largement la norme (<100 UFC/100 ml), ce qui constitue un indicateur direct de pollution fécale fraîche. Cela renforce le risque sanitaire lié à une irrigation par aspersion ou goutte-à-goutte en surface, surtout pour les produits consommés crus.

IV.4. Résultats du faciès chimique

La Figure IV.17 illustre le faciès chimique de l'effluent traité dans cette station, en mettant en évidence les ions dominants et la nature globale de l'eau après épuration.

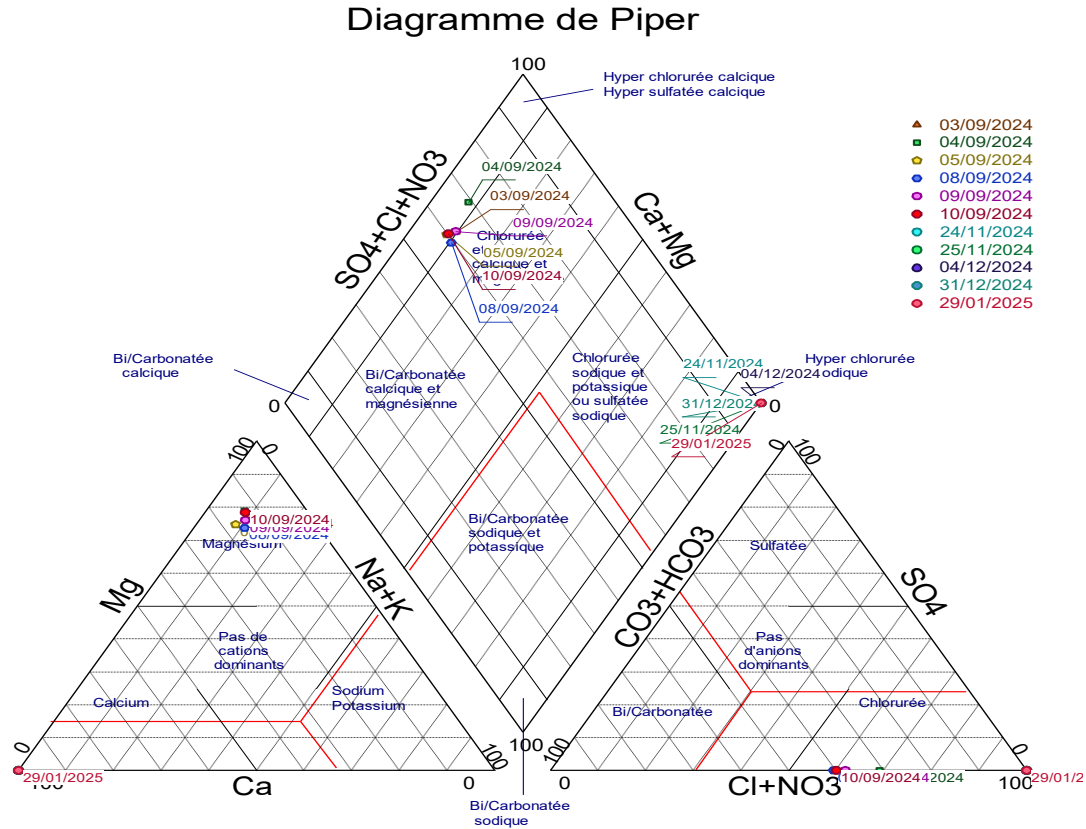


Figure IV.17. Faciès chimique de l'eau épurée de la nouvelle station d'épuration des eaux usées de Filfila, wilaya de Skikda.

D'après ce diagramme, les points entre le 03/09/2024 et le 25/11/2024 se situent majoritairement dans la zone chlorurée-sulfatée calcique/magnésienne. Cela indique que l'eau épurée à cette période contenait encore une forte empreinte géochimique naturelle (liée à l'eau de réseau ou aux eaux souterraines infiltrées dans les réseaux d'assainissement). Était modérément minéralisée, avec des cations majoritairement Ca^{2+} et Mg^{2+} , et des anions HCO_3^- , SO_4^{2-} et Cl^- . Le traitement semble efficace pour réduire les sels sodiques et chlorurés à cette période.

Aussi on remarque un changement progressif sur la période allant du 04/12/2024 au 31/12/2024 s'orientent vers une composition hyper chlorurée-sodique. Cela traduit une augmentation des ions Na^+ et Cl^- , donc soit un changement dans les eaux usées entrantes (plus chargées en détergents, lessives, sel, etc.), soit un traitement biologique ou physico-chimique moins efficace en élimination des ions minéraux.

Il est évident de remarquer un changement notable du 29/01/2025 où l'eau est hyper chlorurée sodique, signe très net de salinisation. Na^+ et Cl^- dominant très largement ou cette eau est fortement minéralisée et chimiquement très éloignée des eaux naturelles.

Ces résultats peuvent s'expliquer par :

- Rejets industriels salins ou fuites de l'eau de mer dans le réseau d'eaux usées non traités correctement.
- Nettoyage des bassins ou vidange d'un compartiment chargé en sels.
- Problème de dilution ou de traitement dans la station (déficit d'eau claire ou dysfonctionnement biologique).

Dans le contexte de l'irrigation, on peut résumer la nature chimique de cette eau selon les campagnes de prélèvement comme suit :

- De septembre à novembre 2024 : Eaux bicarbonatées calciques/magnésiennes, relativement équilibrées → utilisables en irrigation avec précaution.
- En décembre 2024 : Tend vers une eau chlorurée-sulfatée, plus salée → risque moyen à élevé.
- Le 29 janvier 2025 : Eau hyper chlorurée sodique → fort risque agronomique avec des risques de salinisation et sodicité élevés.

IV.5. Résultats de l'indice de qualité (WQI)

L'indice de qualité de l'eau (WQI – Water Quality Index) constitue un outil synthétique permettant d'évaluer globalement la qualité de notre échantillon d'eau à partir de l'analyse de plusieurs paramètres physico-chimiques. Il permet de transformer des données analytiques complexes en une seule valeur représentative, facilitant ainsi leur interprétation et leur exploitation dans un cadre de gestion des ressources en eau. La Figure IV.18 présente l'évolution de cet indice et permet de classer l'eau épurée de la STEP de Filfila en fonction de son aptitude à l'irrigation, selon la classification proposée par Meireles et al. (2010) (Voir Tableau III.2)

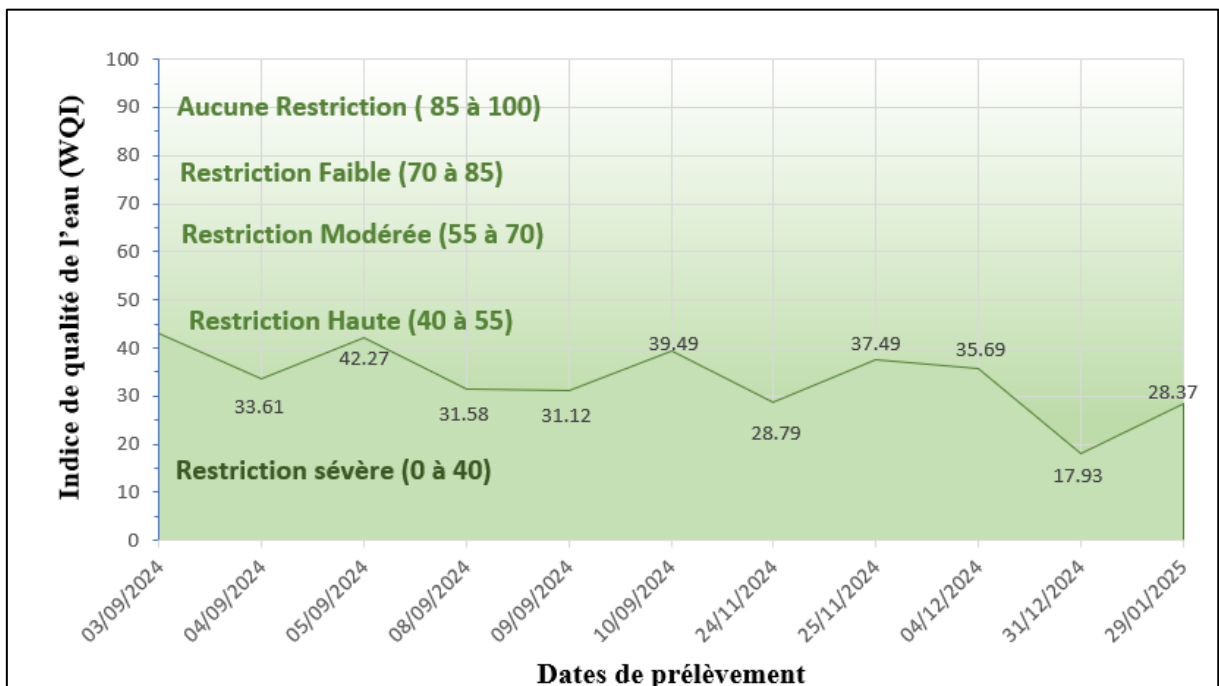


Figure IV.18. Variations temporelles de l'indice de qualité de l'eau (WQI) de l'eau traitée par la STEP de Filfila

Selon la classification de Meireles et al., (2010), le graphique ci-dessous révèle que sur onze (11) échantillons, neuf (09) sont classés en restriction sévère (0 à 40) et seulement deux (02) atteignent le seuil de haute restriction (40 à 55). Cela signifie que cette eau n'est pas appropriée pour l'irrigation de la majorité des cultures en raison de sa salinité et/ou sodicité probable où son usage doit être strictement surveillé en appliquant cette eau pour les cultures tolérantes au sel uniquement (orge, luzerne certaines espèces de palmiers, etc.) et d'éviter les cultures sensibles telles que la pomme de terre, fraise, laitue, etc.

Sur des sols sableux ou très perméables et non argileux ou peu perméables en ajoutant de gypse si le SAR est élevé avec un lessivage régulier pour évacuer l'accumulation de sels dont il faut éviter d'utiliser cette eau en périodes sèches sans drainage suffisant. Cette situation implique une amélioration du processus d'épuration, un suivi renforcé de la qualité physicochimique et de sensibiliser les agriculteurs pour adapter leur pratique à la qualité de cette eau.

Conclusion

Bien que la réutilisation de cette eau en irrigation constitue une alternative intéressante dans un contexte de changement climatique, son emploi doit se faire avec prudence, en particulier pour les cultures sensibles et les sols vulnérables à l'accumulation de sels ou de nutriments. Il est fortement recommandé de mettre en place un suivi régulier de la qualité de l'effluent, ainsi que des pratiques d'irrigation raisonnées, afin de prévenir les risques environnementaux et sanitaires à long terme.

Conclusion générale

Conclusion général

Face aux défis croissants liés à la raréfaction des ressources en eau en Algérie, notamment dans les régions côtières à forte pression agricole et démographique comme la wilaya de Skikda, la valorisation des eaux usées traitées apparaît comme une alternative stratégique afin de réduire la dépendance aux ressources conventionnelles. Cette étude a permis d'évaluer la qualité des eaux épurées par la nouvelle station de Filfila et d'analyser leur potentiel de réutilisation en irrigation, à travers une approche analytique approfondie combinée à l'utilisation de l'Indice de Qualité des Eaux d'Irrigation (IWQI).

Les résultats physico-chimiques ont montré que la majorité des paramètres analysés sont restés dans les limites admises par les normes nationales (JORA 2012) et internationales (FAO, OMS). Le pH mesuré variait entre 6,97 et 7,72, ce qui reflète un bon équilibre acido-basique. La conductivité électrique (CE) se situait entre 1400 et 1860 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ce qui indique une salinité modérée. Les nitrates (NO_3^-) affichaient des niveaux faibles (entre 0,21 et 2,9 mg/L), bien en dessous du seuil critique. La DBO_5 oscillait entre 16,3 et 25,3 mg/L, et la DCO entre 51,6 et 84,4 mg/L, ce qui indique une charge organique modérée et un traitement biologique globalement efficace.

Cependant, certains paramètres présentaient des valeurs préoccupantes. Les concentrations en ammonium (NH_4^+) variaient entre 3,3 et 5,6 mg/L, dépassant largement la valeur limite de 1 mg/L. De même, les orthophosphates (PO_4^{3-}) affichaient des valeurs élevées (entre 6,2 et 11,1 mg/L), ce qui peut induire un déséquilibre nutritif et un risque d'eutrophisation des sols. La teneur en chlorures (Cl^-) était également notable, comprise entre 199 et 239 mg/L, proche du seuil critique (350 mg/L), ce qui peut, à long terme, affecter la structure et la fertilité des sols. Sur le plan bactériologique, les analyses ont révélé une présence importante de coliformes totaux (entre 180 et 300 NPP/100mL) et de *Escherichia coli* (entre 56 et 98 NPP/100mL), excédant les seuils tolérés, notamment pour l'irrigation des cultures maraîchères consommées crues.

L'évaluation par l'indice IWQI a donné les résultats suivants : 66,66 % des échantillons (soit 9 sur 11) ont été classés da" (restriction sévère) ; 33,33 % (2 échantillons) dans la catégorie "restrictions modérées" (haute restriction) ; Aucun échantillon n'a été classé comme étant de "bonne qualité".

Ces résultats montrent que l'utilisation directe de ces eaux pour l'irrigation agricole nécessite des précautions techniques et sanitaires importantes.

Pour améliorer la qualité des eaux et garantir un usage sécurisé, plusieurs solutions sont proposées :

- Renforcement du traitement tertiaire, notamment pour l'élimination de l'azote et du phosphore à travers l'ajout de procédés avancés (ex. : filtration sur sable, traitements biologiques prolongés).
- Désinfection complémentaire par rayons UV ou chloration contrôlée pour réduire la charge microbiologique, notamment les coliformes.
- Adoption de l'irrigation localisée (goutte-à-goutte) pour limiter le contact direct de l'eau avec les parties comestibles des plantes et optimiser l'utilisation de l'eau.
- Réorientation de l'usage vers des cultures non alimentaires ou non consommées crues, comme les cultures industrielles, fourragères ou arboricoles.
- Stockage tampon dans des bassins fermés avant l'utilisation, ce qui permet une décantation naturelle et une réduction partielle de la contamination bactérienne par exposition au soleil.
- Surveillance régulière de la qualité de l'eau, du sol et des cultures à travers des analyses en laboratoire pour anticiper tout effet cumulatif.
- Sensibilisation et formation des agriculteurs à l'utilisation sécurisée des eaux usées traitées, en collaboration avec les services agricoles et environnementaux.

En conclusion, la station d'épuration de Filfila constitue un levier important pour la valorisation des eaux usées dans un contexte de stress hydrique. Néanmoins, cette valorisation ne peut être réussie que dans le cadre d'une gestion rigoureuse, intégrée et adaptée aux risques identifiés. L'IWQI s'est avéré un outil d'évaluation pertinent, permettant d'avoir une vision globale et scientifique de la qualité de l'eau et de sa compatibilité avec les usages agricoles, contribuant ainsi à une gestion durable et raisonnée des ressources non conventionnelles.

Références bibliographiques

- Attab, S. (2011, novembre). 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 local [Mémoire de magistère].
- Aulicino, E. A., Mastrantonio, A., Orsini, E., Bellucci, C., Muscillo, M., & Larosa, G. (1996). Enteric viruses in a wastewater treatment plant in Rome. *Water, Air, and Soil Pollution*, 91, 327–334.
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). La qualité de l'eau en agriculture (Bulletin FAO d'irrigation et de drainage n° 29 Rev 1). FAO.
- Baumont, S., Camard, J.-P., Lefranc, A., & Franconi, A. (2004). Réutilisation des eaux usées : risques sanitaires et faisabilité en Île-de-France. Rapport ORS, 220 p.
- Belaïd, N. (2010). Évaluation des impacts de l'irrigation par les eaux usées traitées sur les plantes et les sols du périmètre irrigué d'El Hajeb-Sfax : salinisation, accumulation et phytoabsorption des éléments métalliques [Thèse de doctorat].
- Benabdallah, S., & Neubert, S. (2003). La réutilisation des eaux usées traitées en Tunisie. Institut Allemand de Développement.
- Bliefert, C., & Perraud, R. (2002). Chimie de l'environnement : Air, eau, sols, déchets. De Boeck Université.
- Boutoux, J. (1983). Introduction à l'étude des eaux douces : eaux naturelles, eaux usées, eaux de boisson. CEBEDOC.
- Bouwer, H. (2000). Integrated water management: Emerging issues and challenges. *Agricultural Water Management*, 45(3), 217–228.
- Brown, R. M., McClelland, N. I., Deininger, R. A., & O'Connor, M. F. (1972). Water quality index—crashing the psychological barrier. In W. Thomas (Ed.), *Proceedings of the Conference on Water Quality* (pp. 787–797). U.S. Environmental Protection Agency.
- Brown, R. M., McClelland, N. I., Deininger, R. A., & Tozer, R. G. (1970). A water quality index—do we dare? Presented at the National Meeting of the American Institute of Chemical Engineers.

- Chatterji, C., & Raziuddin, M. (2002). Determination of water quality index of a degraded river in Asansol Industrial area, Raniganj, Burdwan, West Bengal. *Nature, Environment and Pollution Technology*, 1(2), 181–189.
- Chelli, F., Dellale, M., Dewachter, M., Mapakou, F., & Vermey, L. (2005). *L'épuration des eaux : Pourquoi et comment épurer*. Office international de l'eau.
- CSHPF. (1995). *Recommandations sanitaires relatives à la désinfection des eaux usées urbaines*. Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France.
- Degermant. (1992). *Le memento technique de l'eau*. Éditions Lavoisier.
- Degrémont. (1978). *Mémento technique de l'eau* (8e éd.).
- Degrémont. (2005). *Mémento technique de l'eau* (10e éd.).
- Des Jardins, R. (1997). *Le traitement des eaux* (2e éd.). École Polytechnique de Montréal.
- Dhaouadi, H. (2013). *Traitement des eaux usées urbaines : les procédés biologiques d'épuration* [Thèse de doctorat]. Université Virtuelle de Tunis.
- Djalil, S., & Draoui, I. (2022). *Contribution de la qualité des eaux des sources de Ras Sebaine (W. de Tiaret)*.
- Faby, J. A., & Brissaud, F. (1997). *L'utilisation des eaux usées épurées en irrigation*.
- FAO. (1992). *Wastewater treatment and use in agriculture* (Bulletin n° 47).
- FAO. (2003). *L'irrigation avec des eaux usées traitées – Manuel d'utilisation*.
- FAO. (2020). *The State of Food and Agriculture 2020: Overcoming water challenges in agriculture*.
- Frédéric, G. (2012). *Contribution à l'évaluation biogéochimique des impacts liés à l'exploitation géothermique des aquifères superficiels* [Thèse de doctorat]. Université d'Orléans.
- Guiraud, J. P., & Galzy, P. (1980). *L'analyse microbiologique dans les industries alimentaires*.
- Hamdi, W. (2011). *Qualité hygiénique et caractéristiques physico-chimiques des eaux usées domestiques de quelques localités de la cuvette d'Ouargla* [Mémoire de magistère]. Université d'Ouargla.
- Hannachi, E. T. A., et al. (2014). *Larhyss Journal*, 19, 51–62.

- Karaali, R. (2010). Caractérisation physico-chimique et bactériologique des eaux usées urbaines de Guelma [Mémoire d'ingénieur].
- Kessira, M. (2013). Valorisation des eaux usées épurées en irrigation – Synthèse internationale du projet « Sécurité d'utilisation des eaux usées en agriculture ». Téhéran, Iran.
- Lazarova, V., & Bahri, A. (2005). Water reuse for irrigation: Agriculture, landscapes, and turf grass. CRC Press.
- Maait, J. E. (1997). La réutilisation des eaux usées en irrigation. ENGREF.
- Marcel, D. (1989). Chimie des oxydants et traitement des eaux, 60–61.
- Martin, G. (1979). Le problème de l'azote dans les eaux. Fd Techniques et Documentation.
- Massena, P. A. (2001). Valorisation des eaux usées en irrigation localisée. Office international de l'eau.
- MATE. (2022). Rapport sur l'état de l'environnement en Algérie. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement.
- Meireles, A. C. M., Andrade, E. M., Chaves, L. H. G., Frischkorn, H., & Crisóstomo, L. A. (2010). A new proposal of the classification of irrigation water. *Revista Ciência Agronômica*, 41(3), 349–357.
- Metahri, M. (2012). Élimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées traitées [Thèse de doctorat]. Université Mouloud Mammeri.
- ONU-EAU. (2021). Évaluation mondiale des ressources en eau 2021. ONU.
- Pedrero, F., Kalavrouziotis, I., Alarcón, J. J., Koukoulakis, P., & Asano, T. (2010). Use of treated municipal wastewater in irrigated agriculture—Review of some practices in Spain and Greece. *Agricultural Water Management*, 97(9), 1233–1241.
- Qadir, M., Sharma, B. R., Bruggeman, A., Choukr-Allah, R., & Karajeh, F. (2007). Non-conventional water resources and opportunities for water augmentation to achieve food security. *Agricultural Water Management*, 87(1), 2–22.
- Rejasse, S. J. (2009). Optimisation du fonctionnement d'une station d'épuration à boues activées de 10 000 EH, Trélassac [Mémoire d'ingénieur]. ENGEES.

- Rejsek, F. (2002). Analyse des eaux : Aspects réglementaires et techniques. CRDP Aquitaine.
- Rhoades, J. D. (1977). Potential of using saline agricultural drainage for irrigation. In Proc. Water management for irrigation and drainage, ASAE, Reno, Nevada, 85–116.
- Rodart, T. (1989). Modélisation statistique d'une usine de traitement de l'eau potable. Rencontres Internationales Eau et Technologies Avancées, Montpellier.
- Rodier, J. (1996). Analyse de l'eau : Eaux naturelles, Eaux résiduaires, Eau de mer (8e éd.). Dunod.
- Rodier, J., Bazin, C., Broutin, J. P., Chambon, P., Champsaur, H., & Rolil. (2005). L'analyse de l'eau (8e éd.). Dunod.
- Seddar, Y., & Lagrid, C. (2022). L'indice de qualité de l'eau pour l'évaluation physico-chimique du parc national de Theniet el Had.
- Skiredje, A. (2005). Besoins des plantes en eau et en éléments nutritifs. Département d'Horticulture, Maroc.
- Toze, S. (2006). Reuse of effluent water—Benefits and risks. Agricultural Water Management, 80(1–3), 147–159.
- Troyes, I. (2002). Eaux usées et assainissement. Les traitements adaptés.
- Vaillant, J. R. (1974). Perfectionnement et nouveautés pour l'épuration des eaux résiduaires : eaux usées urbaines et industrielles. Eyrolles.
- WHO. (2006). Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater (Vol. 2): Wastewater use in agriculture. WHO Press.
- WWAP (UNESCO World Water Assessment Programme). (2019). The United Nations World Water Development Report 2019: Leaving no one behind. UNESCO.
- Yidana, S. M., & Yidana, A. (2010). Assessing water quality using water quality index and multivariate analysis. Environmental Earth Sciences, 59(7), 1461–1473.

Annexes

Tableau 1 : Les spécifications des eaux usées épurées utilisées à des fins d'irrigation : Journal Officiel de la République Algérienne. Arrêté interministériel du 02 Janvier 2012.

20		JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 41	25 Chaâbane 1433 15 juillet 2012
2. PARAMETRES PHYSICO - CHIMIQUES			
PARAMETRES		UNITÉ	CONCENTRATION MAXIMALE ADMISSIBLE
Physiques	pH	—	$6.5 \leq \text{pH} \leq 8.5$
	MES	mg/l	30
	CE	ds/m	3
	Infiltration le SAR = $\alpha - 3 \text{ CE}$		0.2
	3 - 6		0.3
	6 - 12	ds/m	0.5
	12 - 20		1.3
	20 - 40		3
Chimiques	DBO5	mg/l	30
	DCO	mg/l	90
	CHLORURE (Cl)	meq/l	10
	AZOTE (NO ₃ - N)	mg/l	30
	Bicarbonate (HCO ₃)	meq/l	8.5
Eléments toxiques (*)	Aluminium	mg/l	20.0
	Arsenic	mg/l	2.0
	Béryllium	mg/l	0.5
	Bore	mg/l	2.0
	Cadmium	mg/l	0.05
	Chrome	mg/l	1.0
	Cobalt	mg/l	5.0
	Cuivre	mg/l	5.0
	Cyanures	mg/l	0.5
	Fluor	mg/l	15.0
	Fer	mg/l	20.0
	Phénols	mg/l	0.002
	Plomb	mg/l	10.0
	Lithium	mg/l	2.5
	Manganèse	mg/l	10.0
	Mercure	mg/l	0.01
	Molybdène	mg/l	0.05
	Nickel	mg/l	2.0
	Sélénium	mg/l	0.02
	Vanadium	mg/l	1.0
Zinc	mg/l	10.0	

ANNEXE
SPECIFICATIONS DES EAUX USEES EPUREES
UTILISEES A DES FINS D'IRRIGATION

I. PARAMETRES MICROBIOLOGIQUES

GROUPES DE CULTURES	PARAMETRES MICROBIOLOGIQUES	
	Coliformes fécaux (CFU/100ml) (moyenne géométrique)	Nématodes intestinaux (œufs/l) (moyenne arithmétique)
Irrigation non restrictive. Culture de produits pouvant être consommés crus.	<100	Absence
Légumes qui ne sont consommés que cuits. Légumes destinés à la conserverie ou à la transformation non alimentaire.	<250	<0,1
Arbres fruitiers (1). Cultures et arbustes fourragers (2). Cultures céréalières. Cultures industrielles (3). Arbres forestiers. Plantes florales et ornementales (4).	Seuil recommandé <1000	<1
Cultures du groupe précédent (CFU/100ml) utilisant l'irrigation localisée (5) (6).	pas de norme recommandée	pas de norme recommandée

Tableau 2 : Directives pour l'eau d'irrigation (FAO, 1999)

General Notice No. 617 of 1999

**MINISTRY OF ENVIRONMENT, HUMAN
RESOURCE DEVELOPMENT &
EMPLOYMENT**

Department of Environment

Guidelines for irrigation water quality

The following guidelines refer to the quality of water used for irrigation, and are meant to help the planting community. The guidelines are general in nature, and should not be associated with any specific type of irrigation method, crop or soil. They have been based mainly on guidelines from Food and Agricultural Organisation (FAO).

Parameters	Unit	Max limit
Temperature	°C	35
pH	—	5.0-9.0
Colour	Hazen	20
Odour	—	Not objectionable
Biochemical Oxygen Demand (BOD ₅)	mg/l	30
Chemical Oxygen Demand (COD)	mg/l	90
Suspended Solids	mg/l	45*
Chloride	mg/l	250
Sulphate	mg/l	500
Nitrate-Nitrogen	mg/l	15
Ammonia-N	mg/l	5
Electrical Conductivity	µS/cm	2000
Sodium adsorption Ratio (SAR)	—	<6
Aluminium	mg/l	5.0
Arsenic	mg/l	0.1
Beryllium	mg/l	0.1
Boron	mg/l	0.75
Cadmium	mg/l	0.01
Chromium	mg/l	0.10
Cobalt	mg/l	0.05
Copper	mg/l	0.20
Iron	mg/l	5.0
Lead	mg/l	2.0
Lithium	mg/l	2.5
Manganese	mg/l	0.2
Mercury	mg/l	0.02
Molybdenum	mg/l	0.01
Nickel	mg/l	0.2
Selenium	mg/l	0.02
Vanadium	mg/l	0.1
Zinc	mg/l	2.0
Fluoride	mg/l	1.0
Oil & Grease	mg/l	No visible oil
Detergents	mg/l	5
Faecal Coliforms	Per 100ml	1000
Intestinal Nematodes	Aritomatic mean no of eggs per litre	51

Tableau 3 : Qualité de l'eau et micro-irrigation pour l'arboriculture (Pelerson, 1999)

Paramètres	Concentration maximale
Alcalinité (CaCO ₃)	1 à 100 ppm (pas supérieur à 200)
Aluminium (Al ³⁺)	0 à 5 ppm
Bicarbonate (HCO ₃ ⁻)	30 à 50 (pas supérieur à 150)
Bore (B)	0,2 à 0,5 (pas supérieur à 0,8)
Calcium (Ca ²⁺)	40 à 120 ppm
Chlore (Cl ⁻)	0-100 ppm (pas supérieur à 140)
Cuivre (Cu ²⁺)	0,08 -0,15 ppm (pas supérieur à 0,2)
Fluor (F ⁻)	0 (pas supérieur à 1)
Fer (Fe ³⁺)	1 à 2 ppm (pas supérieur à 5)
Magnésium (Mg ²⁺)	6 à 25 ppm
Manganèse (Mn ²⁺)	0,2 à 0,7 ppm (pas supérieur à 2)
Molybdène (Mo)	0,02 à 0,05 ppm (pas supérieur à 0,07)
pH	5 à 7
Potassium (K ⁺)	0,5 à 5 ppm
Ratio d'absorption du sodium (RAS)	0 à 4 ppm
Sodium (Na ⁺)	0 à 30 ppm (pas supérieur à 50)
Sulfate (SO ₄ ²⁻)	24 à 240
Matière dissoute totale	70 à 700 ppm (pas supérieur à 875)
Zinc (Zn ²⁺)	0,1 à 0,2 ppm (pas supérieur à 2,0)
Salinité (mS)	Inférieur à 1,0-1,5

H.G. Peterson 1999. Water quality and Micro-irrigation for horticulture. Agriculture et Agroalimentaire Canada.

http://www.agr.gc.ca/pfra/water/microirr_e.htm

CRAAQ, 2003. Guide de production des annuelles en caissettes 313p.

Thème : Valorisation des eaux usées traitées de la nouvelle station d'épuration de la commune de Filfila (wilaya de Skikda).

Résumé

Cette étude vise à valoriser la qualité des eaux traitées au niveau de la nouvelle station d'épuration des eaux usées de Filfila (wilaya de Skikda) afin de déterminer leur aptitude à être utilisées pour l'irrigation. L'analyse repose sur le calcul de l'indice de qualité de l'eau (WQI), permettant une appréciation globale de la qualité physico-chimique de l'effluent final. Les résultats obtenus sur une période allant de septembre 2024 à janvier 2025 révèlent des valeurs de WQI comprises entre 17,93 et 42,27, se situent dans les classes de restriction sévère ($WQI < 40$) et de haute restriction ($40 < WQI < 55$), indiquant que cette eau n'est pas directement appropriée pour l'irrigation sans précautions spécifiques. Toutefois, cette eau peut être utilisée pour l'irrigation de cultures tolérantes à la salinité, à condition d'adopter des pratiques agricoles adaptées, telles qu'un contrôle strict de la salinité, l'irrigation sur des sols très perméables dépourvus de couches compactes, ainsi qu'un calendrier d'irrigation à haute fréquence.

Mots clés : Indice de qualité de l'eau, épuration, irrigation, physicochimique, bactériologique, plante, sol.

Abstract

This study aims to evaluate the quality of treated wastewater at the new wastewater treatment plant in Filfila (Skikda province) in order to determine its suitability for irrigation. The analysis is based on the calculation of the Water Quality Index (WQI), which provides an overall assessment of the physico-chemical quality of the final effluent. The results obtained over the period from September 2024 to January 2025 reveal WQI values ranging from 17.93 to 42.27, falling into the categories of severe restriction ($WQI < 40$) and high restriction ($40 < WQI < 55$). These results indicate that the water is not directly suitable for irrigation without specific precautions. However, it can be used for irrigating salt-tolerant crops, provided that appropriate agricultural practices are adopted, such as strict salinity control, irrigation on highly permeable soils free of compact layers, and a high-frequency irrigation schedule.

Keywords: Water Quality Index, irrigation, physico-chemical, bacteriological, plant, soil.

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم جودة المياه المعالجة على مستوى محطة التصفية الجديدة للمياه المستعملة بفيلفلة (ولاية سكيكدة)، وذلك من خلال تقدير مدى صلاحيتها للاستعمال في الري الزراعي. تم الاعتماد في هذا التقييم على التحاليل الفيزيائية والكيميائية للمياه المعالجة، مع حساب مؤشر جودة المياه (WQI) الذي يعد أداة شاملة لتقييم الخصائص العامة للمياه. وقد كشفت النتائج المحصل عليها خلال الفترة الممتدة من سبتمبر 2024 إلى جانفي 2025 أن قيم مؤشر الجودة تتراوح بين 17.93 و 42.27 وهي تقع ضمن معايير الضبط الشديدة لجودة المياه ($WQI < 40$) والعالية ($40 < WQI < 55$) مما يشير إلى أن هذه المياه غير ملائمة للري مباشرة دون اتخاذ تدابير احترازية. غير أن استخدام هذه المياه يبقى ممكنا لري المحاصيل المحبة للملوحة، شرط تطبيق ممارسات زراعية مناسبة من بينها التحكم الدقيق في مستويات الملوحة، و الري في تربة ذات نفاذية عالية و خالية من الطبقات الملحية، إلى جانب اعتماد جدول ري متواتر لتفادي تراكم الاملاح.

الكلمات المفتاحية : مؤشر جودة المياه، الري، الخصائص الفيزيائية والكيميائية، بكتيريولوجيا، النبات، التربة.

