

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université 20 Août 1955 Skikda

Faculté des Sciences

Département des Sciences Agronomiques

Filière : Sciences Agronomiques

Option : Aménagement Hydro-Agricole



Mémoire de fin d'étude :

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

Thème :

*Caractérisation physico-chimique et bactériologique des eaux usées
traitées de la station d'épuration de Hamadi Krouma (Skikda) :
Perspectives de réutilisation en irrigation agricole.*

Présenté par :

- **BOUDEFFA Amina**
- **KECHEROUD Rayane**
- **ZAHY Manar**

Membres de Jury :

BOUCENNA Nawel	(MAA)	Présidente	Université du 20 Août 1955 – Skikda
KHELFAOUI Hakim	(MCA)	Examineur	Université du 20 Août 1955 – Skikda
KHELFAOUI Fayçal	(MCA)	Promoteur	Ecole Supérieure ENSET – Skikda

Année universitaire : 2024-2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

[وَقُلْ اَعْمَلُوا فَسَيَرَى اللَّهُ عَمَلَكُمْ وَرَسُولُهُ وَالْمُؤْمِنُونَ] – التوبة: 105

Remerciements

Par la grâce et l'aide d'Allah, nous vous présentons le fruit de nos efforts tout au long de ces années d'études, couronnés par ce travail qui n'aurait jamais vu le jour sans la volonté divine, puis grâce au soutien et aux orientations de nombreuses personnes bienveillantes qui ont grandement contribué à notre réussite.

Nous, les étudiantes, exprimons notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à notre encadrant, **Dr. KHELFAOUI Fayçal**, pour son suivi rigoureux, ses conseils judicieux et son accompagnement constant, qui ont été d'une grande importance dans la réalisation de ce travail. Nous lui adressons tout notre respect et notre reconnaissance.

Nous remercions également l'Université du 20 Août 1955 – Skikda, représentée par la Faculté des Sciences Agronomiques, ainsi que l'ensemble des enseignants qui ont participé à notre formation scientifique, en particulier Pr. Haddam Salim, pour ses efforts tout au long de notre parcours universitaire.

Nous tenons aussi à adresser nos vifs remerciements à toutes les personnes qui ont facilité le déroulement de notre stage pratique, notamment les responsables et les employés de l'Office National de l'Assainissement (ONA) – Unité de Skikda, et l'Office National de l'Alimentation du Bétail (ONAB) – Unité de El Harrouch, pour leur accueil chaleureux, leur collaboration et les conditions favorables qu'ils nous ont offertes tout au long de la période de stage pratique.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury, Dr KHELFAOUI Hakim et Mme BOUCENNA Nawel, pour l'honneur qu'ils nous ont fait pour avoir acceptés d'examiner et de juger ce travail

Nous prions Allah que ce travail soit accompli dans un esprit de sincérité, et qu'il nous soit utile dans notre parcours scientifique et professionnel.

Et qu'Allah nous accorde la réussite.

Dédicace

À ce que j'ai de plus cher dans la vie et à la raison de mon bonheur constant
ma mère, mon père et mes frères...

À ces bougies de ma vie, qui illuminent mon chemin avec leur amour, qui ont
été les meilleurs parents pour nous, et la couronne sur nos têtes... Les mots
et les expressions ne suffisent pas pour vous rendre justice.

Et aussi à mon soutien, ma fierté et ma dignité dans la vie, ceux que je
retrouve dans chaque petit et grand détail, comme une montagne solide mes
frères *Oussama, Mohamed Lamine, Ahmed et Anes.*

Ainsi qu'à mon refuge et mon réconfort, celles qui ont toujours été le soutien
et la compagnie sincère mes sœurs *Asma et Marwa.*

Et bien sûr, à mon cher neveu *Mohamed Islam*, qui a apporté la joie par sa
simple présence et qui est mon petit ami fidèle.

Et à mes belles nièces, les fleurs de la maison et la joie de ma vie *Sidra,*
Afuane et Watine.

Je prie Dieu de vous protéger de tout mal et de tout danger dans cette vie, et
que je ne voie jamais de peine dans vos yeux.

Et enfin, à mes chères amies qui occupent une place précieuse dans mon cœur
Rania, Manar, Kenza et Imen, que Dieu fasse durer notre amour et notre
amitié pour toujours.

Ceci est le fruit de ce travail, le résultat de ces années de labeur et de
réussite, avec tout mon amour

Amina

Dédicace

À ceux qui ont été la lumière sur mon chemin, le soutien dans chaque moment de faiblesse, le battement qui a insufflé à mon cœur patience et persévérance...

À ma mère, source de vie, refuge de l'âme, et voix de prière qui atteignait le ciel bien avant moi... Sans toi, ce rêve n'aurait jamais vu le jour.

À mon père, mon modèle et mon appui, toi qui m'as appris que la véritable force réside dans la constance, et que le silence, parfois, est plus éloquent que les mots... Merci pour ta confiance qui m'a portée vers les sommets.

À mon frère et mes sœurs, compagnons d'âme avant d'être compagnons de route, vous êtes le pilier solide sur lequel je me suis appuyée quand les jours devenaient incertains... Votre amour est ma patrie.

À mes amies (Majda, Abir, Amina), vous qui avez été le miroir reflétant mon être lorsque mes traits se perdaient, le soutien sincère quand ma voix faiblissait... Je vous suis reconnaissante pour chaque instant de vérité et de tendresse.

À ceux que j'aime, qui ont su habiter mon cœur en silence, être la paix de mon inquiétude, et l'écho de mes mots... Votre présence est une grâce inestimable.

À vous tous, je dédie ce travail... Il est le fruit de vous, il vous contient, et avec lui, le rêve a fleuri.

Dédicace

Louange à Dieu, en premier et en dernier, en apparence et en profondeur, Lui qui m'a guidé et facilité les voies du savoir et de la connaissance. Mon succès ne vient que de Dieu, en Lui j'ai placé ma confiance et à Lui je reviens. Le Très-Haut dit dans Son Livre Saint :

﴿وَقُلْ رَبِّ زِدْنِي عِلْمًا﴾ [114:114].

À Lui la louange pour chaque instant d'apprentissage, pour chaque fatigue qui a porté ses fruits, pour chaque pas qui m'a rapproché de cet accomplissement. Je dédie cette réussite à l'âme de ma chère mère, à celle qui fut la lumière de mon chemin, et la prière qui m'a relevé lorsque je suis tombé... Je t'offre ce succès, toi qui es absente en corps, mais bien vivante dans mon cœur à chaque battement.

À mes chers frères et sœur : *Salsabil*, *Abdelnour* et *Louqman*, vous avez été le soutien et le sourire dans les moments les plus sombres. Votre présence à mes côtés fut un bienfait inestimable. À mes êtres chers qui ne m'ont jamais abandonné, et à mes amies qui furent la lumière dans l'obscurité de la fatigue, merci d'avoir été ma force quand j'étais faible, et ma joie quand tout semblait étroit. À ces mains invisibles qui ont toujours été là pour moi... Cette graduation n'est pas la mienne uniquement, elle est le fruit de votre amour, de votre patience, et de votre présence dans ma vie. À vous tous... j'offre cet accomplissement du fond du cœur.

Rayene

Résumé

Dans un contexte de stress hydrique croissant en Algérie, aggravé par les changements climatiques et l'augmentation continue de la demande, notamment dans le secteur agricole, la réutilisation des eaux usées traitées s'impose comme une alternative stratégique et durable. La présente étude s'inscrit dans cette dynamique en portant son attention sur la station d'épuration de Hamadi Krouma (Skikda). Son objectif principal est d'évaluer la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux traitées, en vue d'une éventuelle réutilisation dans l'irrigation agricole.

Les résultats révèlent que, d'un point de vue physico-chimique, les eaux traitées présentent une qualité globalement acceptable, traduisant l'efficacité des procédés de traitement mis en œuvre. Toutefois, la présence d'indicateurs microbiologiques de contamination fécale souligne des insuffisances au niveau de la désinfection finale, ce qui constitue un frein à une utilisation sécurisée en irrigation, notamment pour les cultures à consommation crue.

En réponse à ces constats, cette étude recommande un ensemble de mesures visant à optimiser la qualité des eaux usées traitées en vue de leur réutilisation sécurisée en irrigation. Il s'agit notamment de renforcer les étapes du traitement, en intégrant des procédés tertiaires plus performants tels que la désinfection par rayonnement ultraviolet ou la chloration, d'actualiser le cadre réglementaire pour mieux encadrer les pratiques de réutilisation.

Ce travail ambitionne ainsi de contribuer à une gestion plus durable de l'eau en valorisant les eaux usées traitées comme ressource complémentaire, sous réserve d'un contrôle rigoureux et d'un encadrement adapté.

Mots clés : Réutilisation, eaux usées, station d'épuration, Hamadi Krouma, analyse bactériologique, irrigation, sécurité sanitaire.

Abstract

In the context of increasing water stress in Algeria, exacerbated by climate change and the continuous rise in demand—particularly in the agricultural sector—the reuse of treated wastewater emerges as a strategic and sustainable alternative. This study aligns with this perspective by focusing on the Hamadi Krouma wastewater treatment plant (Skikda), with the primary objective of evaluating the physico-chemical and bacteriological quality of the treated effluents to assess their potential for reuse in agricultural irrigation.

The results indicate that, from a physico-chemical standpoint, the treated water generally meets acceptable quality standards, reflecting the effectiveness of the implemented treatment processes. However, the presence of microbiological indicators of fecal contamination reveals shortcomings in the final disinfection stage, which hinders the safe use of this water, particularly for crops consumed raw.

To address these findings, the study proposes a series of recommendations aimed at optimizing treated wastewater quality for safe irrigation reuse. These include strengthening treatment stages through the integration of advanced tertiary processes such as ultraviolet disinfection or chlorination, and updating the regulatory framework to better govern reuse practices.

This research thus aspires to contribute to a more sustainable water management approach by promoting treated wastewater as an alternative resource, provided strict quality control and adequate regulatory oversight are ensured.

Keywords: *Reuse, wastewater, wastewater treatment plant, Hamadi Krouma, bacteriological analysis, agricultural irrigation, health safety.*

ملخص

في ظل تفاقم الإجهاد المائي في الجزائر، نتيجة التغيرات المناخية والطلب المتزايد باستمرار، خاصة في القطاع الزراعي، تبرز إعادة استخدام المياه العادمة المعالجة كخيار استراتيجي ومستدام. تندرج هذه الدراسة ضمن هذا التوجه، حيث ركزت على محطة تطهير "حمادي كرومة" (سكيكدة)، بهدف رئيسي يتمثل في تقييم الجودة الفيزيائية-الكيميائية والبكتريولوجية للمياه المعالجة، بغرض إمكانية إعادة استخدامها في الري الزراعي.

أظهرت النتائج أن المياه المعالجة تتمتع بجودة مقبولة من الناحية الفيزيائية-الكيميائية، مما يعكس فعالية العمليات المعتمدة في المعالجة. إلا أن وجود مؤشرات ميكروبيولوجية للتلوث البرازي يبرز أوجه القصور في مرحلة التطهير النهائي، وهو ما يُشكل عائقاً أمام استخدامها الآمن في الري، خصوصاً مع المحاصيل التي تُستهلك نيئة.

استجابةً لهذه الملاحظات، توصي الدراسة بمجموعة من الإجراءات لتحسين جودة المياه المعالجة وضمان إعادة استخدامها بشكل آمن في الري، من بينها تعزيز مراحل المعالجة بإضافة تقنيات ثالثية أكثر كفاءة مثل التطهير بالأشعة فوق البنفسجية أو الكلورة، وتحديد الإطار التنظيمي لتأطير أفضل للممارسات.

وتسعى هذه الدراسة إلى المساهمة في تحقيق إدارة أكثر استدامة للمياه، من خلال تثمين المياه العادمة المعالجة كمورد مائي بديل، شريطة وجود رقابة صارمة وتأطير تقني وتنظيمي مناسب.

الكلمات المفتاحية : إعادة استخدام، المياه العادمة، محطة التطهير، حمادي كرومة ، التحليل البكتريولوجي، الري الزراعي، السلامة الصحية.

Liste de figures

Figure I.1. Nature de la pollution des eaux	1
Figure I.2 . L'irrigation des cultures avec les eaux usées	7
Figure I.3. Irrigation avec des eaux usées	8
Figure I.4. Irrigation avec l'eau normale.....	8
FigureII.1. Échelle du pH.....	14
FigureII.2. Carence en azote chez les végétaux.	20
Figure II.3. Carence en phosphore chez les plantes	20
Figure II.4. Symptômes de la carence en potassium.....	21
Figure II.5. Vue microscopique coliformes fécaux	25
Figure II.6. Vue microscopique d'Esherichia coli.....	26
Figure II.7. Vue microscopique pathogènes spécifiques.....	26
Figure III.1. Situation géographique de la région de Skikda.....	31
Figure III.2. Distribution des précipitations mensuelles dans la zone d'étude	32
Figure III.3. Températures moyennes mensuelles dans la zone d'étude	34
Figure III.4. Diagramme ombro-thermique dans la station de Skikda	35
Figure III.5. Situation géographique de la STEP de Hamadi Krouma	36
Figure III.6. Présentation de la station d'épuration de Skikda.	39
Figure III.7. Bassin de réception des eaux usées.....	40
Figure III.8. Dégrillage grossier manuel	41
Figure III.9. Dégrillage fin manuel et automatique.....	41
Figure III.10. Dessaleur-Déshuileur plein.....	42
Figure III.11. Décanteur primaire.....	43
Figure III.12. Décanteurs Secondaires.....	44
Figure III.13. Bassin d'aération.....	44
Figure III.14. Bassins de clarification.....	45

Figure III.15. Poste de recirculation et extraction des boues.....	46
Figure. III.16. Bassin de contact	46
Figure. III.17. Poste de désinfection.....	46
Figure. III.18. Structure du traitement boues.....	47
Figure III.19. By-pass.....	48
Figure III.20. Schéma d'un by-pass.....	48
Figure III.21. Lits de séchage.....	49
Figure III.22. Plan de la station d'épuration de Hamadi Krouma	50
Figure III.23. Incubateur.....	51
Figure III.24. Thermostat.....	52
Figure III.25. Spectrophotomètre et l'hôte.....	53
Figure III.26. Le pH Mètre.....	54
Figure III.27. Oxymètre.....	55
Figure III.28. Conductimètre à électrodes.....	56
Figure III.29. Centrifugeuse.....	56
Figure III.30. Etuve.....	57
Figure IV.1. Variations moyennes mensuelles de la matière en suspension (MES) des eaux usées brutes et épurées de la STEP de Hamadi Krouma	63
Figure IV.2. Variations moyennes mensuelles de la DCO des eaux usées brutes et épurées de la STEP Hamadi Krouma.....	65
Figure IV.3. Variations moyennes mensuelles du pH dans les eaux usées brutes et épurées de la STEP de Hamadi Krouma.....	66
Figure IV.4. Variations moyennes mensuelles des conductivités dans les eaux usées brutes et épurées de la STEP de Hamadi Krouma	67
Figure. IV.5. Carte de répartition des points de prélèvements.....	68
Figure IV.6. Comparaison des niveaux de contamination en coliformes totaux aux quatre sites de prélèvement par rapport aux normes en vigueur	73
Figure IV.7. Comparaison des niveaux de contamination en E-coli aux quatre sites de prélèvement par rapport aux normes en vigueur	74

Figure IV.8. Comparaison des niveaux de contamination en Streptocoques aux quatre sites de prélèvement par rapport aux normes en vigueur	76
Figure IV.9. Comparaison des niveaux de contamination en Clostridium aux quatre sites de prélèvement par rapport aux normes en vigueur	78
Figure IV.10. Architecture du périmètre Saf-Saf.....	81
Figure IV.11. Bilan des superficies irriguées du périmètre Saf-Saf.....	82
Figure IV.12. Bilan des superficies irriguées par secteur.....	84
Figure IV.13. Bilan des volumes d'eau distribués sur périmètre Saf-Saf.....	85
Figure IV.14. Photo aérienne de STEP de Hamadi Krouma et les emplacements proposés pour deux dispositifs pilotes.....	90

Liste des tableaux

Tableau I.1. Représentant l'utilisation des eaux usées au fil des âges.....	4
Tableau I.2. Les normes internationales de la qualité des eaux réutilisées	10
Tableau I.3. Les normes de qualité algériennes pour les eaux réutilisées.....	11
Tableau III.1. Caractéristiques de la station utilisées dans l'étude.....	32
Tableau III.2. Précipitations moyennes mensuelles à la station de Skikda (1996 /97-2018/19).....	32
Tableau III.3. Températures moyennes mensuelles à la station de Skikda (1996 /97-2018/19).....	33
Tableau III.4. Population aux différents horizons.....	37
Tableau III.5. Les normes des paramètres de pollution retenues.....	38
Tableau III.6. Concentration de l'effluent traité en matières polluantes.....	38
Tableau III.7. Volume et dosage de l'échantillon pour la DBO ₅	52
Tableau III.8. Les garanties de traitement à l'entrée et la sortie du STEP.....	58
Tableau IV.1. Normes de rejets des effluents industriels et urbains de la STEP de Hamadi Krouma..	62
Tableau IV.2. Caractéristiques physico-chimiques des eaux échantillonnées au niveau de la STEP de Hamadi Krouma et de l'oued Saf-Saf (Mars 2025).....	69
Tableau IV. 3. Analyses bactériologiques et normes de rejets et d'irrigation (Mars 2025).....	72
Tableau IV.4. Répartition du périmètre par localisation.....	80
Tableau IV.5. Ressources et besoin en eau du périmètre.....	80
Tableau IV.6. Bilan d'irrigation dans le périmètre du Saf-Saf (2016-2023).....	82

Liste des abréviations

BRGM :	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CE :	Conductivité Électrique
DBO₅ :	Demande Biologique en Oxygène sur 5 jours
DCO :	Demande Chimique en Oxygène
DHW :	Direction de l'Hydraulique de Wilaya
EUT :	Eaux Usées Traitées
FAO :	Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
K :	Potassium
l/hab/j :	Litres par habitant par jour
m³/j :	Mètre cube par jour
MES :	Matières En Suspension
NA :	Norme Algérienne
N :	Azote (Nitrogène)
NGA :	Niveau Général des Altitudes
NH₄⁺ :	Ion Ammonium
NO₂⁻ :	Ion Nitrite
NO₃⁻ :	Ion Nitrate
NTK :	Azote Total Kjeldahl
ONA :	Office National de l'Assainissement
ONAB :	Office National d'Alimentation du Bétail
OMS :	Organisation Mondiale de la Santé
ONS :	Office National des Statistiques
ONU :	Organisation des Nations Unies (mention indirecte à travers UNEP, FAO...)
P :	Phosphore / Précipitations (selon le contexte)
pH :	Potentiel Hydrogène (indice d'acidité/alcalinité)
PO₄³⁻ :	Ion phosphate
STEP :	Station de Traitement des Eaux Polluées (ou Station d'Épuration)
T° :	Température

TEP : Station de Traitement des Eaux Usées

UE : Union Européenne

UNEP : Programme des Nations Unies pour l'Environnement

US EPA : United States Environmental Protection Agency

Table des matières

Remerciement

Dédicace

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale

Chapitre I : Concepts fondamentaux sur la réutilisation des eaux usées

Introduction	1
1. Définitions et typologies des eaux usées.....	1
1.1. Définition des eaux usées.....	1
1.2. Origines des eaux usées.....	1
1.2.1. Eaux usées domestiques.....	2
1.2.2. Eaux agricoles.....	2
1.2.3. Eaux de ruissellement.....	2
2. Historique et pratiques mondiales de réutilisation des eaux usées.....	2
2.1. Origines historiques.....	3
2.2. Développement au XXe siècle.....	3
2.3. Pratiques contemporaines.....	3
2.4. Approches innovantes.....	3
2.5. Défis et opportunités.....	4
3. Avantages de la réutilisation des eaux usées en agriculture.....	5
4. Risques sanitaires et environnementaux liés à la réutilisation des eaux usées.....	5
4.1. Risques sanitaires.....	6
4.2. Risques environnementaux.....	6
5. Cadre réglementaire et normes de qualité des eaux.....	9
5.1. Cadre réglementaire.....	9

5.1.1. Les cadres réglementaires des eaux réutilisées (internationaux et algériens).....	9
5.1.2. Cadre juridique international de la réutilisation des eaux usées.....	9
5.1.3. Cadre juridique algérien de la réutilisation des eaux usées.....	10
5.2. Les normes de qualité des eaux réutilisées (internationales et algériennes).....	10
Conclusion.....	12

Chapitre II : Généralités sur les paramètres de qualité des eaux réutilisées

Introduction.....	13
1. Paramètres physico-chimiques essentiel.....	13
1.1. Paramètres physiques.....	13
1.1.1. Température.....	13
1.1.2. Matières en suspension (M.E.S).....	13
1.1.3. La couleur.....	13
1.1.4. L'odeur.....	14
1.1.5. La Turbidité.....	14
1.1.6. Les matières minérales (MMS).....	14
1.2. Paramètres chimiques.....	14
1.2.1. Potentiel d'Hydrogène (pH).....	14
1.2.2. Oxygène dissous.....	15
1.2.3. La demande biochimique en oxygène (DBO ₅).....	15
1.2.4. La demande chimique en oxygène (DCO).....	15
1.3. Cations et anions.....	16
1.3.1. Définition des cations.....	16
1.3.2. Définition des anions.....	16
2. Concentration en éléments nutritifs NPK et leur impact sur les cultures.....	16
2.1. Rôle des éléments NPK dans les cultures.....	16
2.1.1. L'Azote (N).....	16
2.1.2. Le Phosphore (P).....	16
2.1.3. Le Potassium (K).....	17

2.2. Concentration des éléments NPK.....	17
2.3. Impact de la concentration des NPK sur les cultures.....	17
2.3.1. Effet de l'excès de NPK.....	18
2.3.2. Effet de la carence en NPK.....	19
2.3.3. Contaminants prioritaires.....	22
3. Paramètre bactériologique et microbiologique.....	24
3.1. Les coliformes fécaux (thermo tolérants).....	24
3.2. Escherichia coli.....	25
3.3. Pathogènes spécifiques.....	26
4. Méthodes de mesure et techniques analytique utilisées.....	27
4.1. Méthodes de mesure.....	27
4.1.1. Demande Chimique en Oxygène (DCO).....	27
4.1.2. Température.....	27
4.1.3. Mesure du pH.....	27
4.1.4. Conductivité électrique.....	27
4.1.5. Teneur en oxygène dissous.....	27
4.1.6. Turbidité.....	28
4.1.7. Demande Biologique en Oxygène sur 5 jours (DBO ₅).....	28
4.1.8. Solides en Suspension Totaux (SST).....	28
4.2. Techniques analytiques.....	28
4.2.1. Spectroscopie infrarouge FTIR.....	28
4.2.2. Chromatographie en phase gazeuse (GC).....	28
4.2.3. Spectrophotométrie UV-Visible.....	29
4.2.4. Spectrométrie d'Absorption Atomique (SAA).....	29
4.2.5. Filtration sur membrane (analyse bactériologique).....	29
Conclusion.....	29

Chapitre III : Cadre naturel et technique de la STEP de Hamadi Krouma

Introduction.....	30
1. Présentation de la région de Skikda.....	30
2. Caractéristiques climatiques.....	31
2.1. Station de mesure.....	31
2.2. Les paramètres météorologiques déterminants.....	32
2.2.1. Les précipitations.....	32
2.2.2. Les températures.....	33
2.3. La relation entre les précipitations et la température : (Courbe de Gaussien).....	34
3. Présentation de la station d'épuration de Hamadi Krouma.....	35
3.1. Objectif de traitement des eaux usées par la STEP de Hamadi Krouma.....	36
3.2. Dimensionnement de la station d'épuration.....	37
3.3. Caractéristiques de la station d'épuration.....	37
4. Qualité des eaux traitées et possibilités de réutilisation.....	38
5. Caractéristiques techniques de la STEP de Hamadi Krouma.....	38
5.1. Processus de traitement des eaux usées.....	39
5.1.1. Les étapes de traitement.....	39
5.2. Méthodes d'analyses des eaux usées.....	51
5.2.1. Détermination de la demande biologique en oxygène (DBO ₅).....	51
5.2.2. Détermination de la demande chimique en oxygène (DCO).....	52
5.2.3. Détermination du potentiel d'hydrogène Ph.....	54
5.2.4. Mesure d'oxygène dissous dans l'eau.....	54
5.2.5. Détermination de la température.....	55
5.2.6. La conductivité électrique CE.....	56
5.2.7. Détermination des matières en suspension (MES).....	56
6. Capacité et performances opérationnelles de la STEP de Hamadi Krouma.....	57
6.1. Capacité de traitement.....	58
6.2. Performances épuratoires.....	58

6.3. Suivi et contrôle.....	58
7. Contraintes techniques et environnementales de la station d'épuration	58
7.1. Contraintes techniques.....	59
7.2. Contraintes environnementales.....	59
Conclusion.....	60
Chapitre IV : Qualité des eaux traitées et stratégie de réutilisation en irrigation	
Introduction.....	61
1. Evolution des paramètres physico-chimiques des eaux usées (Années 2024).....	62
1.1. La matière en suspension (MES).....	63
1.2. La demande chimique en oxygène (DCO).....	64
1.3. Le Ph.....	65
1.4. La conductivité électrique (CE).....	66
2. Analyse des paramètres physicochimiques <i>et</i> bactériologiques des eaux usées et des eaux de surface.....	68
2.1. Analyse des paramètres physicochimiques <i>in-situ</i>	69
2.1.1. Les températures (T°).....	70
2.1.2. Le potentiel d'Hydrogène (pH).....	70
2.1.3. La conductivité électrique (CE).....	70
2.1.4. Les solides dissous totaux (TDS).....	70
2.1.5. La salinité.....	71
2.1.6. Le potentiel d'oxydoréduction (ORP).....	71
2.2. Analyse des paramètres bactériologiques des eaux usées et des eaux de surface.....	71
2.2.1. Les Coliformes totaux.....	72
2.2.2. L'Escherichia coli.....	73
2.2.3. Les Streptocoques fécaux (Entérocoques).....	75
2.2.4. Clostridium perfringens (formes sporulées).....	77
Conclusion.....	79
3. Situation actuelle de l'approvisionnement en eau dans le périmètre irrigué du Saf-Saf.....	79
3.1. Présentation du périmètre du Saf-Saf.....	80

3.1.1. Situation géographique.....	80
3.1.2. Répartition du périmètre.....	80
3.2. Ressources en eau du périmètre.....	80
3.3. Architecture du système d'irrigation au niveau du périmètre.....	81
3.4. Bilan des irrigations et bilan agricole.....	81
3.4.1. Evolution Bilan des superficies irriguées du périmètre Saf-Saf.....	82
3.4.2. Bilan des superficies irriguées dans le périmètre du Saf-Saf par secteur (2023).....	83
3.5. Volume d'eau distribué dans le périmètre irrigué du Saf-Saf (2016-2023).....	84
4. Contraintes de gestion du périmètre et opportunités de valorisation des eaux traitées.....	85
5. Scénarios d'amélioration pour une meilleure qualité de traitement.....	86
5.1. L'optimisation des processus de la STEP.....	87
5.2. L'intégration de nouvelles technologies.....	87
6. Perspectives d'utilisation durable des eaux traitées pour l'irrigation.....	88
6.1. Intérêts agronomiques et environnementaux.....	88
6.2. Cadre institutionnel et acceptabilité sociale.....	88
6.3. Stratégie de mise en œuvre.....	89
Conclusion	91

Introduction Générale

Introduction générale

L'eau, ressource limitée et enjeu majeur sur les plans environnemental et économique, fait face à une double contrainte : une rareté accrue et une demande en constante augmentation. Dans ce cadre, la réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation agricole se présente comme une solution durable et pertinente.

L'Algérie rejette chaque année 600 millions de m³ d'eaux usées qui sont non seulement perdues mais qui accentuent la dégradation de l'environnement déjà bien fragile. En revanche, à l'instar d'un grand nombre de pays du bassin méditerranéen, elle accuse un déficit hydrique très inquiétant, et se situe parmi les pays les plus pauvres en matière de potentialités hydriques, qui sont en dessous du seuil théorique de rareté fixé par la Banque Mondiale à 1000 m³ par habitant et par an. Cette disponibilité décroît de 1500 m³ en 1962 à 500 m³ en 2009, et ne sera plus que de 430 m³ en 2020. (Ouanouki et al., 2009).

Face à cette situation, la réutilisation des eaux usées après traitement apparaît comme une alternative souhaitable afin de mobiliser les ressources en eau conventionnelles pour l'approvisionnement domestique et d'autres usages prioritaires de la population algérienne. Cependant, en Algérie, peu d'importance est accordée à l'épuration des eaux usées. En effet, pour un taux de couverture du réseau d'assainissement de l'ordre de 85%, seuls 20% des eaux usées collectées en Algérie sont traitées. De plus, les ouvrages de traitement et d'épuration des eaux comprennent essentiellement une station d'épuration et des lagunes sont exclusivement destinées aux rejets dans le milieu sans objectif de réutilisation. (Hartani, 2004).

Face à l'aggravation du stress hydrique dans la région de Skikda, la réutilisation des eaux usées traitées apparaît comme une solution prometteuse, notamment pour l'irrigation agricole. Toutefois, avant d'envisager leur utilisation, il est indispensable d'évaluer leur qualité sur les plans physico-chimique et bactériologique.

Dans le cadre de cette étude, nous avons cherché à apprécier dans quelle mesure les eaux usées traitées par la station d'épuration de Hamadi Krouma (Skikda) répondent aux normes physico-chimiques et microbiologiques requises pour une réutilisation sûre en irrigation agricole. L'évaluation vise également à identifier les éventuels risques sanitaires pour les utilisateurs, ainsi

que les impacts possibles sur les sols et les cultures, en particulier celles destinées à la consommation crue. Cette analyse critique permet, en outre, de dégager des recommandations concrètes en vue d'optimiser la qualité des eaux traitées et d'encadrer leur valorisation dans une logique de gestion intégrée et durable des ressources en eau.

Chapitre I :

Concepts fondamentaux sur la réutilisation des eaux usées

Introduction

La réutilisation des eaux usées est une solution durable face à la pénurie d'eau, basée sur leur traitement pour des usages variés (irrigation, industrie, recharge des nappes, espaces urbains...). (BRGM,2010). Elle valorise ces eaux en ressource dans une logique d'économie circulaire. Ce processus dépend de la qualité de l'eau, des technologies adaptées et de la gestion des impacts environnementaux et sanitaires, offrant une approche viable pour les régions en stress hydrique ou arides. (FAO, 2017).

1. Définitions et typologies des eaux usées

1.1. Définition des eaux usées

Les eaux usées sont toutes les eaux qui parviennent dans les canalisations des eaux usées dont les propriétés naturelles sont transformées par les utilisations domestiques, les entreprises industrielles, agricoles et autres. On englobe aussi, les eaux de pluie qui s'écoulent dans ces canalisations. (Bliefert et Perraud, 2001). Selon Baumont, les eaux usées sont les eaux rejetées par les collectivités et les industries et qui sont acheminées par les égouts en station d'épuration, afin d'être traitées. Après traitement, on les appelle des eaux usées épurées. (Baumont et al, 2004).

1.2. Origines des eaux usées

Les eaux usées urbaines proviennent essentiellement des activités domestiques et industrielles, ainsi que des pratiques agricoles et des précipitations (les réseaux étant généralement unitaires). (Belaid, 2010).

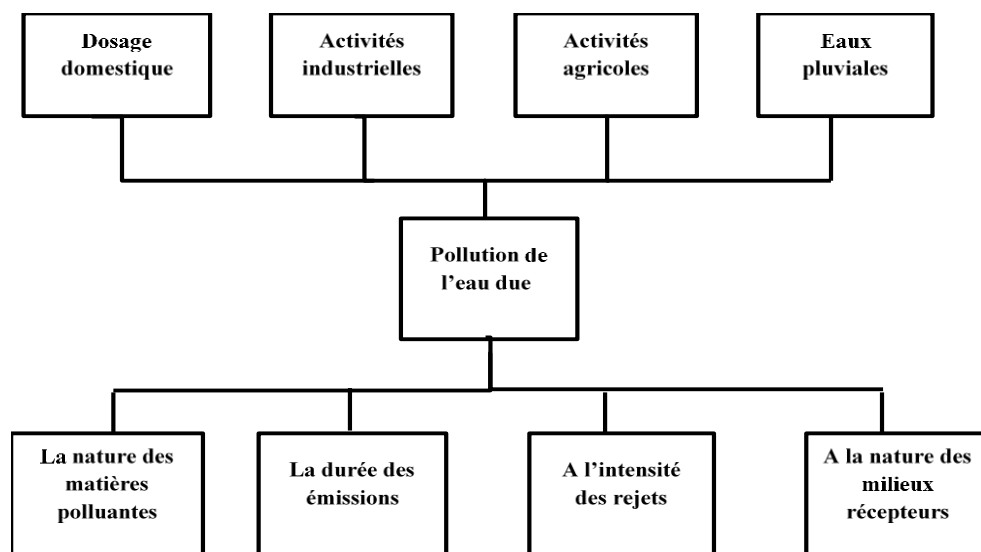


Figure I .1. Nature de la pollution des eaux. (Direction de l'environnement,1990).

On distingue cinq catégories d'eaux usées :

1.2.1. Eaux usées domestiques

Elles proviennent des différents usages domestiques de l'eau. Elles sont essentiellement porteuses de pollution organique. Elles se répartissent en :

- ❖ eaux ménagères, qui ont pour origine les salles de bains et les cuisines, et sont généralement chargées de détergents, de graisses, de solvants, de débris organiques...etc.
- ❖ eaux vannes ; il s'agit des rejets des toilettes chargés de diverses matières organiques azotées et de germes fécaux. (Mokhbia .N et al ,2018) .

1.2.2. Eaux agricoles

L'agriculture est une source de pollution des eaux non négligeable car elle apporte les engrais, les pesticides et les oligoéléments. Elle est la cause essentielle des pollutions diffuses. Les eaux agricoles issues des terres cultivées chargés d'engrais nitrates et phosphatés sous une forme ionique, ou en qui conduisent par ruissellement à un enrichissement en matières azotées ou phosphatées des nappes les plus superficielles et des eaux des cours d'eau ou des retenues. Entité telle, qu'ils ne seraient pas finalement retenus par le sol et assimilés par les plantes, conduisent par ruissellement à un enrichissement en matières azotées ou phosphatées des nappes les plus superficielles et des eaux des cours d'eau ou des retenues. (H. Boukhari Hassiba,2020).

1.2.3. Eaux de ruissellement

Les eaux de pluie ruissellent dans les rues où sont accumulés les polluants atmosphériques, poussières, détritiques, suies de combustion et hydrocarbures rejetés par les véhicules. Les eaux de pluies, collectées normalement à la fois avec les eaux usées puis déversées dans la canalisation d'assainissement acheminées vers une station d'épuration, sont souvent drainées directement dans les rivières entraînant ainsi une pollution intense du milieu aquatique.

2. Historique et pratiques mondiales de réutilisation des eaux usées

Historique et pratiques mondiales de réutilisation des eaux usées :

2.1. Origines historiques

La réutilisation des eaux usées remonte à l'Antiquité. En Mésopotamie, il existe des preuves de l'utilisation des eaux usées domestiques pour l'irrigation dès 3000 avant J.-C. (Angelakis et al., 2018).

Les Romains, quant à eux, ont développé des systèmes sophistiqués d'égouts pour recueillir et réutiliser les eaux usées dans l'agriculture urbaine. (Lofrano et Brown, 2010).

2.2. Développement au XXe siècle

Avec l'industrialisation et l'urbanisation, la réutilisation des eaux usées a gagné en importance dans les régions arides des programmes de réutilisation à grande échelle ont été mis en place dans les années 1950, intégrant des systèmes avancés de traitement pour l'irrigation agricole. (Shelef, 1991). De même, aux États-Unis, les premières réglementations sur la réutilisation des eaux usées ont émergé dans les années 1970 en Californie, un État pionnier dans ce domaine. (Asano, 1998).

2.3. Pratiques contemporaines

Aujourd'hui, la réutilisation des eaux usées est une pratique courante dans de nombreux pays, souvent motivée par la rareté des ressources en eau. En Espagne, les eaux usées traitées sont utilisées pour l'irrigation, la recharge des aquifères, et même à des fins récréatives dans les zones touristiques. (Salgot et al., 2006). En Chine, les eaux usées traitées sont intégrées dans les politiques de gestion intégrée des ressources en eau, notamment pour l'irrigation des cultures. (Qadir et al., 2007).

2.4. Approches innovantes

Certaines régions ont adopté des approches novatrices. À Singapour, le programme NEWater traite les eaux usées à un niveau ultra-pure pour la consommation humaine et les usages industriels, réduisant ainsi la dépendance aux ressources extérieures. (Tortajada, 2006). En Australie, des initiatives communautaires, telles que le projet de réutilisation des eaux usées à Perth, se concentrent sur la recharge des nappes phréatiques avec des eaux usées hautement traitées. (Radcliffe, 2004).

2.5. Défis et opportunités

Malgré ses avantages, la réutilisation des eaux usées soulève des défis, notamment la gestion des risques sanitaires et la perception sociale. Cependant, des cadres réglementaires

solides, comme ceux adoptés par l'Union européenne avec sa directive sur la réutilisation des eaux pour l'irrigation agricole (UE, 2020), facilitent l'acceptation et l'expansion de ces pratiques.

Tableau I.1. Représentant l'utilisation des eaux usées au fil des âges

Période / Époque	Région / Exemple	Pratique /Usage	Caractéristique et Innovations	Sources (Références)
Antiquité	Mésopotamie	Irrigation agricole	Utilisation des eaux usées domestiques pour les cultures	Angelakis et al., 2018
	Rome	Agriculture urbaine et système d'égouts	Système d'aqueducs et d'égouts sophistiqués	Lofrano et Brown, 2010
Moyen Âge	Moyen-Orient	Réutilisation pour l'irrigation	Adaptation aux besoins locaux dans un climat aride	Angelakis et al., 2018
XXe siècle (1950)	Californie, États-Unis	Réutilisation industrielle et urbaine	Premières réglementations sur l'usage des eaux traitées	Asno, 1998
XXe siècle (1990)	Singapour	Programme NEWater	Traitement avancé pour une réutilisation potable et industrielle	Tortajada, 2006
	Espagne	Irrigation et recharge des aquifères	Recyclage des eaux usées dans les zones touristiques	Salgot et al., 2006
XXIe siècle	Chine	Irrigation agricole et gestion intégrée	Politiques nationales pour l'utilisation sur des eaux usées traitées	Qadir et al., 2007
	Australie	Recharge des nappes phréatiques	Approches communautaires pour réutiliser les eaux usées hautement traitées	Radcliffe, 2004
Innovations récentes	Union Européenne	Directive sur la réutilisation des eaux agricoles	Cadre réglementaire pour l'irrigation et la réduction des risques sanitaires	Union Européenne, 2020

3. Avantages de la réutilisation des eaux usées en agriculture

L'utilisation durable et rationnelle des eaux usées traitées présente une multitude d'avantages répartis sur les plans environnemental, économique et social. Sur le plan environnemental, cette pratique contribue d'abord à une économie d'eau significative, en réduisant la pression exercée sur les ressources en eau potable, comme l'indique la FAO (2002). Elle permet également une réduction notable de la pollution, grâce à la diminution des déversements d'eaux usées dans les cours d'eau, un enjeu majeur de santé publique et de préservation des écosystèmes aquatiques, tel que souligné par l'OMS (2006). De plus, elle favorise la préservation des ressources en eau, notamment la conservation des eaux souterraines et superficielles, ce qui s'inscrit dans une logique de durabilité environnementale promue par le Programme des Nations Unies pour l'environnement. (UNEP, 2017).

Sur le plan économique, l'utilisation des eaux usées traitées permet une réduction significative des coûts d'irrigation, notamment en réduisant la dépendance à l'eau potable, comme l'a rapporté la FAO (2020). Cette ressource alternative améliore également la fertilité des sols et, par conséquent, accroît la production agricole, ce qui constitue un atout économique majeur pour les régions agricoles. En outre, elle participe au développement durable en s'intégrant dans une économie circulaire, réduisant ainsi le gaspillage des ressources et créant de nouvelles opportunités économiques (UNEP, 2017).

Enfin, les avantages sociaux sont également considérables. L'amélioration de la sécurité alimentaire, grâce à l'augmentation de la production agricole, est l'un des impacts les plus directs sur les populations locales. Par ailleurs, cette dynamique contribue à la réduction de la pauvreté par la création d'emplois et l'augmentation des revenus, notamment dans les zones rurales, comme l'a mis en avant l'OMS (2006). De plus, le recours à des eaux traitées sûres améliore la santé publique, en réduisant les risques de maladies liées à l'eau, une préoccupation essentielle.

4. Risques sanitaires et environnementaux liés à la réutilisation des eaux usées

4.1. Risques sanitaires

Plusieurs risques ont été identifiés lors de la réutilisation des eaux usées en irrigation, surtout lorsque ces eaux ne respectent pas les normes strictes de réutilisation. Les eaux usées contiennent plusieurs micro-organismes pathogènes qui pourraient se retrouver aussi dans les

eaux usées traitées (EUT) qui seront réutilisées pour irriguer les cultures destinées à la consommation humaine.

Cette réutilisation des eaux usées pour l'irrigation est associée à des agents biologiques (virus, bactéries, protozoaires pathogènes) qui peuvent entrer dans le corps par voie buccale (par exemple, en mangeant des légumes contaminés par des œufs d'ascaris) ou par la peau (en cas d'infection par des ankylostomes ou des schistosomes)

Ces agents biologiques peuvent causer des diarrhées et des infections provoquées par les nématodes. Ces risques peuvent augmenter à long terme avec l'utilisation continue des eaux usées. (Batouaf N.2012).

4.2. Risques environnementaux

La réutilisation des eaux usées présente des risques environnementaux majeurs si elles ne sont pas suffisamment traitées. Ces risques incluent la contamination des sols due à l'accumulation de polluants tels que les produits chimiques et les métaux lourds, ce qui peut détériorer la qualité des sols et nuire à la santé des plantes. De plus, l'infiltration d'eaux usées non traitées dans les nappes phréatiques peut poser une menace directe à la santé humaine et animale.

En outre, les eaux usées riches en nutriments peuvent favoriser l'eutrophisation des milieux aquatiques, entraînant une diminution de la biodiversité et des déséquilibres écologiques. Si elles ne sont pas correctement traitées, elles peuvent contenir des agents pathogènes mettant en danger la sécurité des cultures agricoles et la qualité de l'eau potable. Enfin, les substances chimiques présentes dans ces eaux peuvent altérer significativement la biodiversité et modifier la composition chimique des écosystèmes, entraînant des perturbations dans leur fonctionnement.



Figure I.2. L'irrigation des cultures avec les eaux usées (Wilaya de Batna).

<https://www.echoroukonline.com>

Et parmi cela, nous pouvons citer comme exemple la pastèque :

L'utilisation des eaux usées recyclées pour la culture de la pastèque peut provoquer des altérations notables dans ses caractéristiques organoleptiques et sa qualité globale. La chair interne, souvent de couleur rouge vif dans des conditions normales, peut présenter une teinte pâle, non uniforme, voire jaunâtre ou orangée en raison de l'utilisation d'eaux recyclées. Par ailleurs, le goût s'en trouve modifié, devenant moins sucré et parfois accompagné de notes atypiques ou métalliques, attribuables à l'absorption de polluants et de métaux lourds. La texture, quant à elle, peut perdre en jutosité, devenant plus sèche et fibreuse, ce qui altère l'attrait et la qualité du fruit.

En outre, ces pastèques présentent des risques sanitaires accrus, en raison de la possible contamination par des bactéries pathogènes et des éléments toxiques contenus dans les eaux usées, les rendant potentiellement dangereuses à consommer. Ainsi, bien que l'utilisation d'eaux recyclées puisse répondre à certaines contraintes environnementales, elle soulève des préoccupations majeures quant à la sécurité alimentaire et à la qualité des produits agricoles.

Les différences entre les pastèques arrosées avec des eaux usées et celles arrosées avec de l'eau normale :



Figure I.3. Irrigation avec des eaux usées.

<https://www.facebook.com/apoce.algerie/photos/296176976105217>

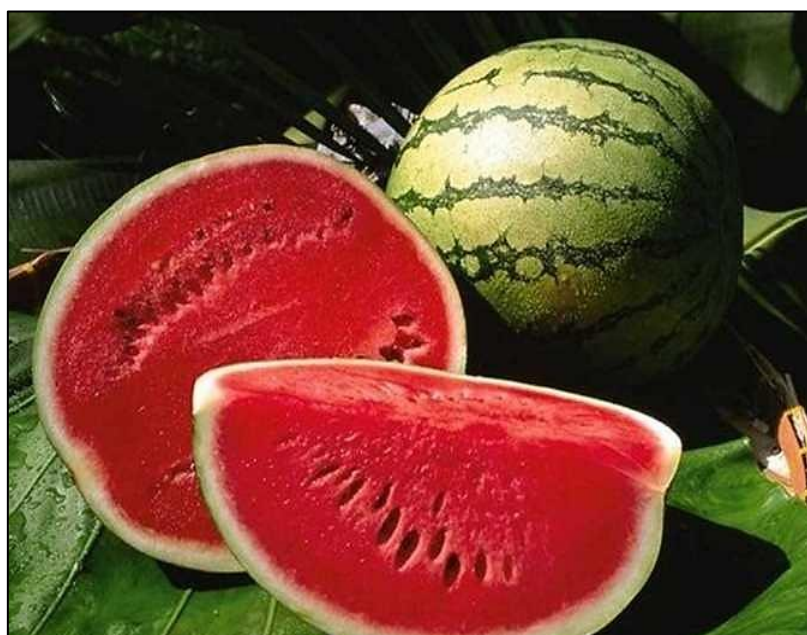


Figure I.4. Irrigation avec l'eau normale <https://www.almasyalyoum.com/news/details/3153197>

5. Cadre réglementaire et normes de qualité des eaux

5.1. Cadre réglementaire

5.1.1. Les cadres réglementaires des eaux réutilisées (internationaux et algériens)

Les cadres réglementaires internationaux et algériens encadrant la réutilisation des eaux usées visent à garantir une gestion durable des ressources hydriques tout en protégeant la santé publique et l'environnement. À l'échelle internationale, des organismes comme l'OMS (Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater, 2006), l'Union européenne (Règlement UE 2020/741) et l'EPA (Guidelines for Water Reuse, 2012) ont mis en place des normes définissant les critères de qualité des eaux réutilisées, notamment en limitant les pathogènes, les métaux lourds et les matières en suspension.

En Algérie, le cadre juridique est principalement basé sur le Code des eaux (**Loi n° 05-12**), le **Décret exécutif n° 07-149 (2007)** et la norme NA 1768-2001, qui fixent les conditions et seuils de qualité pour des usages tels que l'irrigation et l'industrie. Ces réglementations traduisent une volonté commune de faire de la réutilisation de l'eau une solution stratégique face au stress hydrique croissant.

5.1.2. Cadre juridique international de la réutilisation des eaux usées

- ❖ *OMS (2006)* : L'Organisation mondiale de la santé propose des lignes directrices fondées sur la gestion des risques pour garantir une réutilisation sûre des eaux usées, en particulier dans les domaines agricoles et municipaux.
- ❖ *FAO (1992)* : La FAO met l'accent sur les aspects techniques de la réutilisation des eaux en agriculture, tout en insistant sur l'importance d'un encadrement réglementaire strict.
- ❖ *Union européenne (2020)* : Le Règlement (UE) 2020/741 introduit des exigences minimales harmonisées pour la réutilisation de l'eau, soutenant ainsi une agriculture durable face au changement climatique.
- ❖ *EPA (2012)* : L'Agence américaine de protection de l'environnement propose un guide pratique détaillant les meilleures pratiques de réutilisation des eaux aux niveaux local et national.

5.1.3. Cadre juridique algérien de la réutilisation des eaux usées

- ❖ *Loi n° 05-12 (2005)* : Cette loi constitue la base de la gestion intégrée des ressources hydriques en Algérie. Elle reconnaît officiellement la réutilisation des eaux usées comme stratégie face au stress hydrique.
- ❖ *Décret exécutif n° 07-149 (2007)* : Définit les conditions d'octroi des autorisations pour l'usage des eaux usées traitées en agriculture, avec un système de suivi rigoureux.
- ❖ *Décret exécutif n° 09-209 (2009)* : Oblige les opérateurs économiques à contrôler la qualité des rejets industriels, dans le but de protéger l'environnement.
- ❖ *Arrêté interministériel du 17 mai 2011 (publié en 2012)* : Fixe les critères de qualité des eaux usées traitées pouvant être utilisées pour l'irrigation, selon des normes sanitaires et environnementales.

5.2. Les normes de qualité des eaux réutilisées (internationales et algériennes)

Les normes internationales et algériennes encadrant la réutilisation des eaux usées établissent des critères pour garantir une utilisation sécurisée tout en protégeant la santé publique et l'environnement. À l'échelle internationale, l'OMS (Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater, 2006), l'Union européenne (Règlement UE 2020/741) et l'EPA (Guidelines for Water Reuse, 2012) définissent des seuils pour les contaminants microbiologiques, chimiques et physiques adaptés à divers usages, tels que l'irrigation agricole et les activités industrielles. En Algérie, la norme NA 1768-2001, élaborée par l'Institut Algérien de Normalisation, et le Décret exécutif n° 07-149 (2007) fixent des limites pour les métaux lourds, les agents pathogènes et les matières en suspension. Ces cadres réglementaires, élaborés dans un contexte de stress hydrique croissant, traduisent une volonté de promouvoir une gestion durable et efficace des ressources en eau.

Tableau I.3. Les normes internationales de la qualité des eaux réutilisées

Paramètres	unité	normes		
		FAO*(1985)	OMS**(1989)	JORA(2012)
pH		6,5-8,4*		6,5-8,5
CE	ds/m	<0,7	Aucune restriction 0,7-3,0*	3
		restriction légère	à modérée	

		> 3,0 Forte restriction	
MES	mg/l	<30**	30
DCO	mg O2/l	<40**	90
DBO₅	mg O2/l	<10**	30
NO₃⁻	mg/l	<50**	30
NO₂	mg/l	<1**	Non Disponible
NH₄⁺	mg/l	<2**	Non Disponible
PO₄³⁻	mg/l	<0,994**	Non Disponible
SAR	mg/l	<3* Aucune restriction 3-9* restriction légère à modérée	Non Disponible
		>9* Forte restriction**	
Coliformes totaux	UFC/100ml	Non Disponible	Non Disponible
Streptocoque fécaux	UFC/100ml	1000**	Non Disponible
Salmonelles	UFC	Absence**	Non Disponible

(M.R.E.,2007)

Tableau I.4. Les normes de qualité algériennes pour les eaux réutilisées.

Paramètres		Unité	Maximale admissibles Concentration
Physico-chimiques	pH	mg/l	6,5 ≤ pH ≤ 8,5
	MES	mg/l	30
	DBO ₅	mg/l	30
	DCO	mg/l	90
	Azote (N-NO ₃)	mg/l	30
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
	Flore	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

(JORAD,2012)

Conclusion

La réutilisation des eaux usées est une approche essentielle pour gérer les ressources en eau de manière durable tout en protégeant la santé et l'environnement. Elle consiste à traiter ces eaux afin qu'elles puissent être utilisées en toute sécurité pour des besoins comme l'irrigation, l'industrie ou certains usages urbains. Encadrée par des normes strictes, cette pratique réduit les risques sanitaires et environnementaux. Face au stress hydrique croissant, elle représente une solution efficace pour préserver les ressources en eau douce, renforcer la sécurité alimentaire et soutenir une économie circulaire.

Chapitre II :

Généralités sur les paramètres de qualité des eaux réutilisées

Introduction

La réutilisation de l'eau est une stratégie essentielle pour faire face à la pénurie d'eau et promouvoir la durabilité (OMS, 2006). L'eau réutilisée doit répondre à des normes de qualité spécifiques pour garantir sa sécurité dans diverses applications, telles que l'irrigation, l'usage industriel et l'approvisionnement en eau potable (EPA, 2012). Ces normes réglementent les paramètres microbiologiques, chimiques et physiques afin de protéger la santé publique et l'environnement. Différentes organisations, comme l'OMS et l'EPA, ont établi des directives en fonction de l'utilisation prévue (FAO, 1985). Les avancées dans les technologies de traitement permettent de respecter ces normes, assurant ainsi une réutilisation de l'eau sûre, efficace et durable (Directive européenne 2020/741).

1.Paramètres physico-chimiques essentiel

1.1. Paramètres physiques

1.1.1. Température

Il est indispensable de connaître la température exacte de l'eau, car un changement de Température affecte les diverses propriétés de l'eau. Elle joue un rôle important dans la Solubilité des sels et des gaz en particulier la conductivité électrique et les variations du PH. (Mansouri. F., 2012)

1.1.2. Matières en suspension (M.E.S)

Ce paramètre englobe tous les éléments en suspension dans l'eau. Ce sont des substances non solubles dans l'eau (minérales ou organique). Leur concentration dépend de la nature des terrains traversés par l'activité humaine (rejet domestique et industriel et de la vitesse découle du cours d'eau). (Gani. F., (2001).

1.1.3. La couleur

La coloration d'une eau est due le plus souvent à la présence des matières organiques dissoutes ou colloïdales. Une eau d'égout d'origine domestique est d'une couleur grisâtre, la couleur noire indique une décomposition partielle ; les autres teintes indiquent un apport d'eau résiduaire industrielle. (Bouziani, 2000).

1.1.4. L'odeur

L'eau d'égout fraîche a une odeur fade qui n'est pas désagréable, par contre si elle est en état de fermentation, elle dégage une odeur nauséabonde. (Ladjel .F, Boucheref .S ,2011).

1.1.5. La Turbidité

C'est une mesure d'intensité lumineuse transmise à travers un liquide tenant à la présence plus ou moins importante des matières en suspension d'origine minérale ou organique .(Remal. Guessabi, 2017).

1.1.6. Les matières minérales (MMS) :

Elles représentent le résultat d'une évaporation totale de l'eau, c'est-à-dire son extrait sec constitué à la fois par les matières en suspension et les matières solubles telles que les chlorures, les phosphates, etc.... (Bourrier et al, 2010).

1.2. Paramètres chimiques

1.2.1. Potentiel d'Hydrogène (pH)

Le pH d'une eau représente son acidité ou son alcalinité dont le facteur le plus important est habituellement la concentration hydrique de carbone liée à la minéralisation totale. Le pH des eaux usées urbaines seules est généralement près de la neutralité, entre 7 et 7.5 environ. Un pH différent est l'indice d'une pollution industrielle. L'épuration biologique est possible entre pH 6.5 et pH 8.5. (Ladjel .F, Boucheref .S ,2011).

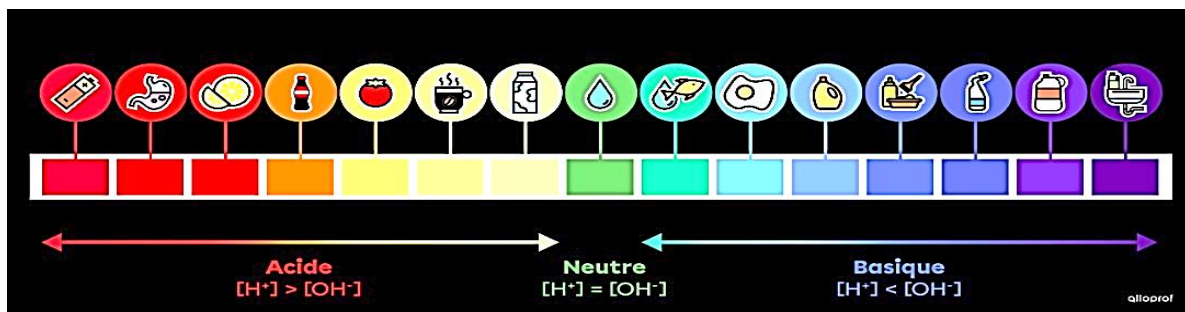


Figure II .1. Échelle du pH.

(<https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/sciences/1-echelle-de-ph-et-les-indicateurs-acidobasiques-s1038>).

1.2.2. Oxygène dissous

L'oxygène est toujours présent dans l'eau, n'en est pas un élément constitutif. Sa solubilité est en fonction de la température, de la pression partielle dans l'atmosphère et de la salinité. L'oxygène dissous conserve ses propriétés oxydantes, soit par une réaction purement chimique, soit par des phénomènes électrochimiques, d'où son importance dans le phénomène de corrosion. La teneur de l'oxygène dans l'eau dépasse rarement 10 mg/l. Elle est fonction de l'origine de l'eau : les eaux superficielles peuvent contenir des quantités relativement importantes proches de la saturation ; par contre, les eaux profondes n'en contiennent le plus souvent que quelques milligrammes par litre. L'eau saturée d'air, à 20°C et sous la pression normale contient 9.1 mg/l d'oxygène, l'eau usée domestique peut contenir de 2 à 8 mg/l. (Ladjel .F, Boucheref .S ,2011)

1.2.3. La demande biochimique en oxygène (DBO₅)

Pratiquement, la demande biochimique en oxygène devrait permettre d'apprécier la charge du milieu considéré en substances putrescibles, son pouvoir auto-épurateur et d'en déduire la charge maximale acceptable, principalement au niveau des traitements primaires des stations d'épuration. (Rodier, 2005), la demande biochimique en oxygène après 5 jours (DBO₅) d'un échantillon est la quantité d'oxygène consommé par les microorganismes aérobies présents dans cet échantillon pour l'oxydation biochimique des composés organiques et/ou inorganiques. (Rejsek ,2002).

1.2.4. La demande chimique en oxygène (DCO)

La demande chimique en oxygène (DCO) est la quantité d'oxygène consommée par les matières existant dans l'eau et oxydables dans des conditions opératoires définies. En fait la mesure correspond à une estimation des matières oxydables présente dans l'eau quel que soit leur origine organique ou minérale. La DCO étant fonction des caractéristiques des matières présentes, de leurs proportions respectives, des possibilités de l'oxydation. La DCO est la concentration, exprimée en mg/l, d'oxygène équivalente à la quantité de dichromates consommée par les matières dissoutes et en suspension lorsqu'on traite un échantillon d'eau avec cet oxydant dans des conditions définies par la norme. (Mokhbi .N, Grimed.M et Kaouane.N, 2021).

1.3. Cations et anions

1.3.1. Définition des cations

Les cations sont des ions chargés positivement. Ils résultent de la perte d'un ou plusieurs électrons par un atome ou une molécule.

- Exemples : Na^+ (ion sodium), Ca^{2+} (ion calcium)

1.3.2. Définition des anions

Les anions sont des ions chargés négativement. Ils résultent du gain d'un ou plusieurs électrons.

- Exemples : Cl^- (ion chlorure), SO_4^{2-} (ion sulfate).

2. Concentration en éléments nutritifs NPK et leur impact sur les cultures

2.1. Rôle des éléments NPK dans les cultures

2.1.1. L'Azote (N)

- L'azote joue un rôle fondamental dans la constitution des acides aminés, des protéines et des enzymes.
- Il participe activement à la synthèse de la chlorophylle, essentielle au processus de la photosynthèse.
- Il stimule la croissance végétative en favorisant le développement des feuilles et des tiges.
- Il intervient dans la régulation de l'absorption de certains éléments nutritifs, notamment le phosphore et le potassium.
- Il est également impliqué dans la formation des principaux constituants des fleurs et des fruits. (El-Gizawy, N .K , 2014).

2.1.2. Le Phosphore (P)

- Il entre dans la composition des protéines nucléaires.
- Il stimule la croissance des racines ainsi que le développement des fleurs et des fruits.
- C'est un élément important dans les processus de respiration.
- Il joue un rôle dans la transformation des glucides à l'intérieur de la plante, comme la conversion de l'amidon en sucre.

- Il joue un rôle dans le métabolisme des lipides.
- Il accélère la maturation des fruits et améliore le rendement. (El-Gizawy, N .K, 2014) .

2.1.3. Le Potassium (K)

- Il régule l'équilibre acido-basique au sein des cellules végétales et contribue à l'organisation des échanges cellulaires.
- Il diminue la transpiration, ce qui améliore la résistance de la plante à la sécheresse.
- Il stimule la photosynthèse et favorise la production de sucres dans les feuilles.
- Il facilite l'absorption de l'azote du sol et intervient dans la synthèse des protéines ainsi que dans leur transport vers les organes de réserve tels que les tubercules et les fruits.
- Il consolide les parois cellulaires, renforçant ainsi la capacité de la plante à se défendre efficacement contre les maladies et les attaques parasitaires. (Tolba. F.Z, Kherrab.I ,(2019).

2.2. Concentration des éléments NPK

La concentration optimale des éléments NPK varie selon le type de cultures, la fertilité du sol et les conditions climatiques. Voici quelques exemples de concentrations courantes :

- **Céréales** : Telles que le riz, avec des besoins de N (129–175 kg/ha), P (46–69 kg/ha), et K (20–70 kg/ha), ainsi que le maïs, avec une exigence de N (85 kg/ha).
- **Légumes** : Telles que la pomme de terre, nécessitant N (237 kg/ha), P (184 kg/ha), et K (230 kg/ha), ainsi que la tomate avec N (123 kg/ha), P (58 kg/ha) et K (62 kg/ha).
- **Fruits** : Telles que la banane, nécessitant N (340 kg/ha), P (0 kg/ha) et K (900 kg/ha), ainsi que les agrumes, avec N (153 kg/ha), P (35 kg/ha) et K (90 kg/ha). (FAO, 2003).

2.3. Impact de la concentration des NPK sur les cultures

La concentration des éléments nutritifs majeurs ; azote (N), phosphore (P) et potassium (K), joue un rôle crucial dans le développement des cultures. Un équilibre adéquat favorise une croissance optimale des plantes, tandis qu'un déséquilibre, qu'il s'agisse d'un excès ou d'une carence, peut affecter négativement la productivité agricole. Cette section examine les effets directs et indirects des concentrations de NPK sur les cultures.

2.3.1. Effet de l'excès de NPK

Si les éléments NPK sont indispensables à la croissance des plantes, leur excès peut engendrer des effets toxiques ou des déséquilibres nutritionnels. Une fertilisation excessive peut nuire à la santé des plantes, altérer la structure du sol et provoquer des impacts environnementaux tels que l'eutrophisation des eaux. Cette sous-section met en lumière les conséquences d'un apport excessif de ces nutriments sur les cultures.

a. L'azote (N)

L'azote est un élément essentiel présent dans les eaux naturelles et usées sous différentes formes. Il peut exister sous forme organique ou minérale. L'azote organique est associé à des composés provenant de la matière vivante ou en décomposition, tels que les protéines et les acides aminés. Quant à l'azote minéral, il se divise en trois principales formes : l'ammonium (NH_4^+), les nitrites (NO_2^-) et les nitrates (NO_3^-).

Ces différentes formes sont interconnectées à travers un cycle dynamique dans le milieu aquatique. L'ammonium est souvent le produit de la décomposition de l'azote organique, notamment via le processus d'ammonification. Ensuite, sous l'effet de l'oxygène et de bactéries nitrifiantes, l'ammonium est oxydé en nitrites, puis en nitrates à travers le processus de nitrification. Enfin, en conditions anaérobies, les nitrates peuvent être transformés en azote gazeux (N_2) par dénitrification, ce qui permet un retour de l'azote dans l'atmosphère.

Ce cycle de transformation de l'azote joue un rôle central dans la qualité de l'eau, notamment en ce qui concerne les risques d'eutrophisation et de pollution des nappes phréatiques.

(Demarquest, G., Aouriri, I., 2023).

b. Le phosphore (P)

Le phosphore, élément nutritif essentiel à la vie aquatique, se présente dans les eaux sous deux formes principales : phosphore organique et phosphore minéral. Le phosphore organique est contenu dans les matières biologiques (débris végétaux, microorganismes, matières fécales, etc.), tandis que le phosphore minéral regroupe les formes inorganiques dissoutes, principalement les orthophosphates (PO_4^{3-}).

Les orthophosphates représentent la forme la plus disponible pour les plantes et les algues, favorisant ainsi la productivité biologique des milieux aquatiques. Toutefois, un excès de

phosphore, notamment sous forme d'orthophosphates, peut entraîner des phénomènes d'eutrophisation, provoquant une prolifération excessive d'algues et un déséquilibre de l'écosystème.

Dans les eaux usées, le phosphore peut provenir de plusieurs sources : détergents, engrais, excréments humains ou animaux, et décomposition de matières organiques. Sa gestion est donc essentielle pour préserver la qualité des milieux aquatiques. (Provin, T.L., Pitt, J.L., 2002)

c. Le Potassium (K)

Le potassium joue un rôle important dans l'absorption des nutriments, notamment des micronutriments essentiels tels que le fer et le zinc. Toutefois, une carence en potassium peut entraîner un développement végétatif réduit, voire la mort des plantes, en particulier chez les espèces à racines superficielles ou celles adaptées aux sols acides. Par ailleurs, un excès de potassium non absorbé peut s'accumuler dans le sol sous des formes peu disponibles pour les plantes, persistant ainsi sur de longues périodes. Ce déséquilibre entraîne non seulement une baisse de l'efficacité des fertilisants, mais aussi une pollution des eaux de surface par ruissellement, favorisant la prolifération d'algues nuisibles. De ce fait, une gestion rigoureuse est nécessaire, incluant une surveillance régulière des sols et une application précise des engrais potassiques. (Provin, T.L. & Pitt, J.L., 2002).

2.3.2. Effet de la carence en NPK

a. L'azote (N)

Une carence en azote se manifeste principalement par un nanisme de la plante et une croissance anormale, traduisant un ralentissement de son développement global. Les feuilles inférieures jaunissent progressivement, signe classique de chlorose liée à un déficit en chlorophylle. Par ailleurs, les tiges deviennent plus courtes et prennent une forme cylindrique, limitant la capacité de la plante à soutenir une croissance vigoureuse et équilibrée.



Figure II. 2. Carence en azote chez les végétaux.

(<https://blog-crop-news.extension.umn.edu/2021/06/scouting-for-nutrient-deficiencies-in.html>).

b. Le phosphore (P)

Une carence en phosphore (P) se traduit généralement par une croissance réduite des plantes, en raison d'un ralentissement de l'activité cellulaire et de la division des cellules. Les feuilles prennent une teinte vert foncé, parfois accompagnée de nuances violacées, particulièrement visibles sur les nervures et les bords. Chez les jeunes feuilles, on peut observer une coloration vert bleuâtre avec l'apparition de pigments pourpres, signe caractéristique d'un déficit en phosphore. En outre, cette carence peut affecter la reproduction de la plante, entraînant une diminution du nombre de fleurs et, par conséquent, une baisse de la production.



Figure II.3. Carence en phosphore chez les plantes. (<https://www.yavuzertarim.com.tr/blog>).

c. Le Potassium (K)

Une carence en potassium (K) se manifeste par l'apparition de taches jaunes sous forme de petits points à la surface des feuilles, accompagnées souvent de brûlures sur les bords. Ces symptômes évoluent avec l'apparition de lignes jaunes le long des marges foliaires, progressant progressivement vers l'intérieur de la feuille. En plus de ces décolorations, les feuilles touchées conservent généralement une taille réduite et apparaissent recroquevillées, signe d'un affaiblissement structurel. Cette carence nuit à la résistance des plantes face au stress hydrique et aux maladies, limitant ainsi leur croissance et leur rendement.



Figure II .4. Symptômes de la carence en potassium. (https://id.pngtree.com/freebackground/teak-leaves-exhibiting-yellowing-and-dried-patches-due-to-inadequate-plant-nutrition-photo_10689977.html).

L'utilisation équilibrée des engrais N-P-K favorise la croissance des plantes, augmente la productivité et améliore la qualité des récoltes, tout en prévenant les symptômes de carence en éléments nutritifs. En revanche, l'utilisation excessive des engrais chimiques est le principal responsable de la pollution des sols et des eaux, ce qui constitue un danger pour la santé humaine et l'environnement. Cela provoque des maladies telles que le syndrome du bébé bleu, dû à une diminution de l'oxygène dans le sang, ainsi qu'un risque accru de cancers et de malformations congénitales. De plus, la pollution des eaux usées entraîne une prolifération excessive d'algues et de parasites, obstruant les canaux et détruisant la vie aquatique. Cela génère des coûts financiers importants pour le traitement de ces eaux, en plus des effets négatifs sur la qualité de l'air et la fertilité des sols, menaçant ainsi l'équilibre écologique.

2.3.3. Contaminants prioritaires

Outre les éléments nutritifs essentiels, certaines substances présentes dans les eaux d'irrigation peuvent représenter un risque majeur pour la santé des plantes, des sols et des consommateurs. Parmi ces contaminants prioritaires, les métaux lourds et les composés toxiques figurent parmi les plus préoccupants en raison de leur persistance, leur bioaccumulation et leur toxicité.

a. Métaux lourds

Les métaux lourds sont souvent introduits dans l'environnement par les activités industrielles, agricoles ou urbaines. Même à faibles concentrations, ils peuvent s'accumuler dans les sols et les tissus végétaux, affectant la croissance des plantes et présentant des risques pour la chaîne alimentaire.

- ❖ **Le plomb (Pb)** : Il provient principalement des batteries, des procédés de soudure et de certaines peintures. Une exposition prolongée peut entraîner des atteintes aux os, au foie, aux reins, au cerveau, aux poumons et à la rate. Il affecte également les systèmes immunitaire, cardiovasculaire, sanguin et reproducteur.
- ❖ **L'arsenic (As)** : Issu principalement de l'industrie électronique et de la fabrication du verre, il est toxique pour la peau, les poumons, les reins, le cerveau, le cœur, le système immunitaire et les glandes endocrines.
- ❖ **Le cuivre (Cu)** : Généralement libéré par la corrosion des systèmes de plomberie anciens ou par certaines industries électroniques. Il peut causer des troubles au niveau du foie, du cerveau, des reins, des poumons et du système digestif.
- ❖ **Le zinc (Zn)** : Dérivé des revêtements métalliques, du caoutchouc et de certains cosmétiques. Il peut provoquer des douleurs abdominales, des irritations cutanées, des nausées, des vomissements, une anémie et des crampes.
- ❖ **Le chrome (Cr)** : Présent dans les déchets issus de la fabrication de l'acier, du papier et du tannage. Il est toxique pour la peau, les poumons, le foie, les reins, le cerveau, le pancréas et le système reproducteur.
- ❖ **Le cadmium (Cd)** : Provient principalement des batteries, des revêtements métalliques et de l'industrie sidérurgique. Son accumulation dans l'organisme nuit aux os, aux reins, au foie, au cerveau, au cœur et au système immunitaire.
- ❖ **Le mercure (Hg)** : Utilisé dans la production de chlore et de soude. (Qasem ,N.A.A,Mohamed ,R. H , Lawal,D.U 2021)

b. Les Composés toxiques

Cette catégorie englobe divers produits chimiques à forte toxicité, souvent d'origine industrielle ou issues de traitements antérieurs, qui présentent également un risque en cas de présence dans l'eau destinée à la réutilisation. Parmi ces composés, on peut citer :

❖ Les composés organiques toxiques

Cette catégorie comprend :

- *Pesticides (comme le DDT et le chlorpyrifos)* : utilisés en agriculture, ils peuvent s'infiltrer dans les eaux souterraines et les eaux usées. (Eaufrance,2025).
- *Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)* : issus de la combustion des carburants et des industries pétrochimiques, ils sont considérés comme des polluants dangereux en raison de leurs effets cancérigènes. (Ben Gouider,S .,Nechadi,S .2024).
- *Solvants organiques (comme le benzène, le toluène et le xylène)* : provenant des usines chimiques et des ateliers automobiles. (Ben Gouider,S .,Nechadi,S .2024).
- *Phénols* : utilisé dans l'industrie chimique et les détergents. (Ben Gouider,S .,Nechadi,S .2024).

❖ Les composés pharmaceutiques et hormonaux

Ils comprennent :

- *Antibiotiques* : contribuant à l'émergence de souches résistantes aux médicaments. (Eaufrance,2025).
- *Hormones synthétiques (comme les œstrogènes)* : issues des médicaments et des produits pharmaceutiques, elles ont des effets sur les systèmes hormonaux des organismes vivants. (Eaufrance,2025).

❖ Les composés azotés et soufrés

Ils incluent :

- *Ammoniac (NH_3)* : issu de la décomposition biologique des déchets organiques, c'est un polluant qui affecte la vie aquatique. (Ben Gouider,S .,Nechadi,S .2024)
- *Nitrates et nitrites* : provenant des engrais chimiques et des déchets industriels, ils contaminent les eaux souterraines.

- *Sulfure d'hydrogène (H_2S)* : produit par la dégradation de la matière organique en l'absence d'oxygène, c'est un gaz toxique à l'odeur nauséabonde. (Ben Gouider,S .,Nechadi,S .2024)

❖ **Substances radioactives**

Elles incluent :

- *Uranium et radium* : provenant des déchets hospitaliers et de certaines industries nucléaires.
- *Iode 131* : rejeté lors des traitements médicaux (thyroïde) et des accidents de réacteurs nucléaires.
- *Thorium* : utilisé dans certains alliages métalliques et applications industrielles, présent aussi naturellement dans certains sols.

❖ **Polluants plastiques et micro-plastiques**

Ces polluants résultent de la dégradation des matériaux plastiques dans l'environnement. (Eaufrance,2025)

Ces priorités sont définies afin de garantir que les eaux réutilisées – que ce soit pour l'irrigation, les usages industriels ou autres applications non potables – respectent des normes de sécurité sanitaire et environnementale élevées.

3. Paramètre bactériologique et microbiologique

3.1. Les coliformes fécaux (thermo tolérants)

On parle aussi des Coliformes thermo tolérants, capables de fermenter le lactose à une température de 44°C. L'espèce la plus fréquemment associée à ce groupe bactérien est l'*Escherichia coli* principale bactérie de contamination fécale. Bien que la présence de coliformes fécaux témoigne habituellement d'une contamination d'origine fécale, plusieurs coliformes fécaux ne sont pas d'origine fécale, provenant plutôt d'eaux enrichies en matière organique. (Soudani, 2016).



Figure II.5. Vue microscopique coliformes fécaux. (<https://images.app.goo.gl/3NJzrfxgqyKQgb8f6>).

3.2. Escherichia coli

L'espace *E. coli* est subdivisé en sérotypes, sur la base des antigènes O (171), des antigènes K (80) et des antigènes H (56). C'est un hôte commun de l'intestin de l'homme et des animaux et il est recherché à ce titre, comme germe témoin de contamination fécale dans l'eau et les aliments. À l'intérieur de l'espace des pathotypes, souvent associés à des sérotypes particuliers et responsables d'infections intestinales. (Gastro-entérites et diarrhées) ; leur pouvoir pathogène est induit par des facteurs d'adhésion et/ou la production d'entérotoxines. Sans être parfait, *E. coli* reste à ce jour le meilleur indicateur microbien d'usage courant pour signaler les risques sanitaires associés à la consommation de l'eau des réseaux de distribution (Soudani, 2016). En raison des incertitudes associées aux données numériques, les organismes de réglementation ont de plus en plus tendance à fonder les contrôles de conformité sur le concept de présence-absence. (Washington State Department of Health, 2012).

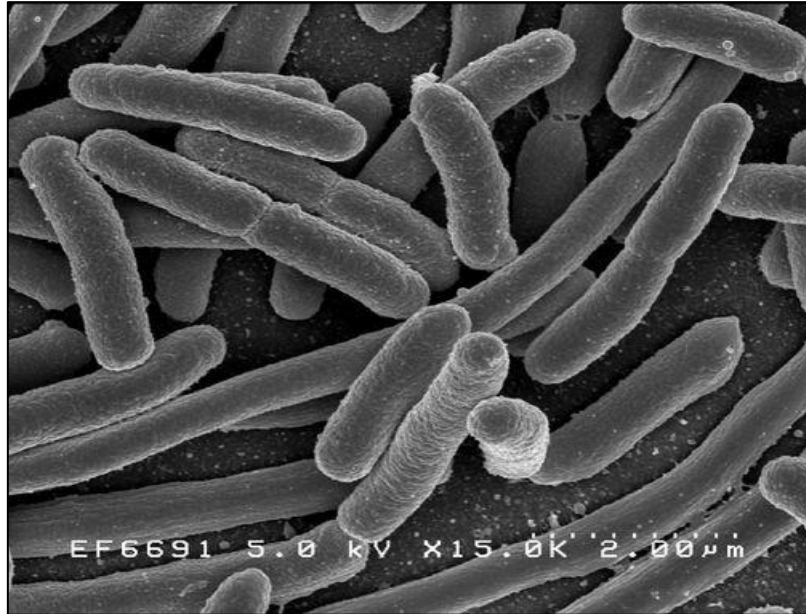


Figure II.6. Vue microscopique d’Esherichia coli. ([http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Coliforme fécal %28HU%29](http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Coliforme_fécal_%28HU%29))

3.3. Pathogènes spécifiques

Ce sont des bactéries non présentes au niveau intestinal qui dès qu’elles sont retrouvées dans l’organisme sont responsables d’infections plus ou moins graves comme: Salmonella, Shigella, Escherichia coli et Yersinia.

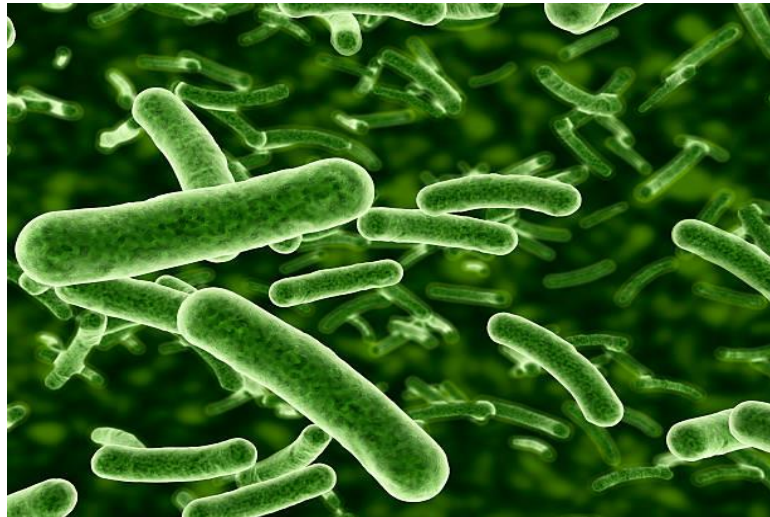


Figure II.7. Vue microscopique pathogènes spécifiques. (<https://images.app.goo.gl/9mDKvj2KEzLDS1>).

4. Méthodes de mesure et techniques analytique utilisées

4.1. Méthodes de mesure

4.1.1. Demande Chimique en Oxygène (DCO)

- But : Évaluer la charge en matière organique oxydable chimiquement.
- Principe : Oxydation des matières organiques par le dichromate de potassium en milieu acide sous reflux. (Rodier et al ;2009).
- Norme : NF T90-101.
- Application : Indicateur global de la pollution organique dans les eaux usées.

4.1.2. Température

- But : Surveiller la température de l'eau qui influence les réactions biologiques et chimiques ainsi que la solubilité des gaz.
- Principe : Utilisation d'un thermomètre électronique ou d'une sonde thermique pour mesurer directement la température de l'échantillon. (Rodier et al ;2009)
- Application : Un contrôle essentiel dans les stations d'épuration, car une température trop élevée ou trop basse peut affecter le rendement du traitement biologique.

4.1.3. Mesure du pH

- But : Déterminer l'acidité ou la basicité de l'eau.
- Principe : Utilisation d'un pH-mètre qui mesure les ions H⁺. (Rodier et al., 2009).
- Application : Indicateur fondamental de l'équilibre chimique de l'eau.

4.1.4. Conductivité électrique

- But : Mesurer la concentration en ions dissous.
- Principe : Mesure de la capacité de l'eau à conduire l'électricité. (Rodier et al., 2009).
- Application : Estimation de la salinité et des sels dissous.

4.1.5. Teneur en oxygène dissous

- But : Évaluer l'oxygène disponible pour les organismes vivants.
- Principe : Mesure directe par sonde ou méthode de Winkler. (OMS, 1989).
- Application : Évaluation écologique de la qualité de l'eau.

4.1.6. Turbidité

- But : Mesurer la clarté de l'eau.
- Principe : Mesure de la dispersion de la lumière. (AFNOR, 2010).
- Application : Suivi de l'efficacité des traitements physiques.

4.1.7. Demande Biologique en Oxygène sur 5 jours (DBO₅)

- But : Mesurer l'oxygène nécessaire aux micro-organismes pour dégrader la matière organique biodégradable.
- Principe : Incubation des échantillons à 20°C pendant 5 jours à l'obscurité. (Rodier et al., 2009).
- Norme : NF T90-103.
- Application : Évaluation de la biodégradabilité des eaux traitées.

4.1.8. Solides en Suspension Totaux (SST)

- But : Déterminer la concentration de matières solides non dissoutes.
- Principe : Filtration d'un volume d'eau sur filtre en fibre de verre, séchage à 105°C et pesée du résidu. (Rodier et al., 2009).
- Norme : NF T90-105.
- Application : Indicateur de la performance des étapes de traitement primaire et secondaire.

4.2. Techniques analytiques

4.2.1. Spectroscopie infrarouge FTIR

- But : Identifier les groupes fonctionnels de molécules organiques.
- Principe : Analyse des vibrations moléculaires induites par l'absorption IR. (Rodier et al., 2009).
- Application : Caractérisation des substances organiques dans les eaux usées ou boues.

4.2.2. Chromatographie en phase gazeuse (GC)

- But : Identifier et quantifier les composés organiques volatils (COV).
- Principe : Séparation des composés volatils par volatilisation puis détection par un détecteur spécifique. (Rodier et al., 2009).
- Application : Détection des solvants, hydrocarbures, pesticides.

4.2.3. Spectrophotométrie UV-Visible

- But : Analyser les concentrations en nitrates et phosphates.
- Principe : Cette technique repose sur l'absorption de la lumière par les composés chimiques à des longueurs d'onde spécifiques 220 nm pour les nitrates, 880 nm pour les phosphates. (Rodier et al ; 2009).
- Norme : NF EN ISO 7890-1 pour les nitrates ; NF T90-023 pour les phosphates.
- Application : Surveillance de la pollution nutritive (azotée et phosphorée) dans les eaux traitées.

4.2.4. Spectrométrie d'Absorption Atomique (SAA)

- But : Déterminer les concentrations de métaux lourds (plomb, zinc, cadmium...).
- Principe : Mesure de l'absorption de la lumière par des atomes dans une flamme ou un four graphite. (Rodier et al., 2009).
- Norme : NF EN ISO 11885.
- Application : Contrôle des micropolluants métalliques dans les eaux industrielles ou usées domestiques.

4.2.5. Filtration sur membrane (analyse bactériologique)

- But : Détecter et dénombrer des bactéries indicatrices (E. coli, coliformes).
- Principe : L'eau est filtrée à travers une membrane, puis la membrane est incubée sur un milieu nutritif sélectif pour faire apparaître les colonies. (ISO, 2000).
- Norme : NF EN ISO 9308-1
- Application : Contrôle de la qualité microbiologique des eaux usées destinées à la réutilisation.

Conclusion

L'évaluation de la qualité des eaux usées en vue de leur réutilisation, notamment en agriculture, est cruciale pour la santé publique et la protection de l'environnement. Elle repose sur l'analyse de paramètres physico-chimiques (température, pH, conductivité, oxygène dissous), des nutriments (nitrates, phosphates, potassium), ainsi qu'un contrôle bactériologique (présence d'E. coli) et la détection de polluants toxiques comme les métaux lourds, afin de garantir leur conformité aux normes et une utilisation sûre.

Chapitre III :

Cadre naturel et technique de la STEP de

Hamadi Krouma

Introduction

La valorisation des eaux usées épurées de la STEP de Hamadi Krouma nécessite une analyse des caractéristiques physiques et climatiques de la région de Skikda dans le nord-est de l'Algérie. Ce chapitre présente un aperçu des conditions environnementales influençant l'irrigation et la gestion de l'eau dans cette zone.

Région méditerranéenne, la basse plaine d'El Hadaïek connaît des étés chauds et secs et des hivers doux et humides, ce qui impacte directement les pratiques agricoles locales. Une bonne compréhension de ces facteurs est indispensable pour évaluer l'utilisation des eaux traitées en irrigation, en tenant compte des besoins hydriques des cultures.

Nous examinerons ici la géographie, la topographie et le climat de la zone, tout en identifiant les défis et opportunités liés à la réutilisation des eaux épurées. Cette analyse servira de base pour évaluer la viabilité et la durabilité de cette pratique dans le contexte de la basse plaine d'El Hadaïek.

En définissant ce cadre environnemental, nous pourrions proposer des solutions adaptées pour une gestion optimale des ressources en eau, favorisant ainsi une agriculture durable dans la région.

1. Présentation de la région de Skikda

La région de Skikda fait partie des bassins côtiers constantinois au nord-est de l'Algérie, couvrant une superficie de 4 137 km². Elle abrite une population d'environ 1 115 380 habitants, soit une densité de 271 habitants par km² (ONS, 2020). Située au nord-est de l'Algérie, la wilaya de Skikda est délimitée au sud par la chaîne numidienne, qui coïncide avec la limite administrative de la wilaya de Constantine. Au nord, elle est bordée par la mer Méditerranée, à l'Est par le massif de l'Edough (wilaya d'Annaba), et à l'ouest par la wilaya de Jijel. (A. Bouhedja, 2024).

Au cœur de la wilaya s'étend la basse plaine du bassin du Saf-Saf, englobant six communes : Skikda, Bouchetata, El Hadaïek, Hamadi Hrouma, Beni Béchir et Ramdane Djamel. Grâce à leur position géographique stratégique, ces localités disposent de conditions favorables au développement socio-économique, notamment dans les secteurs de l'agriculture et de l'irrigation.

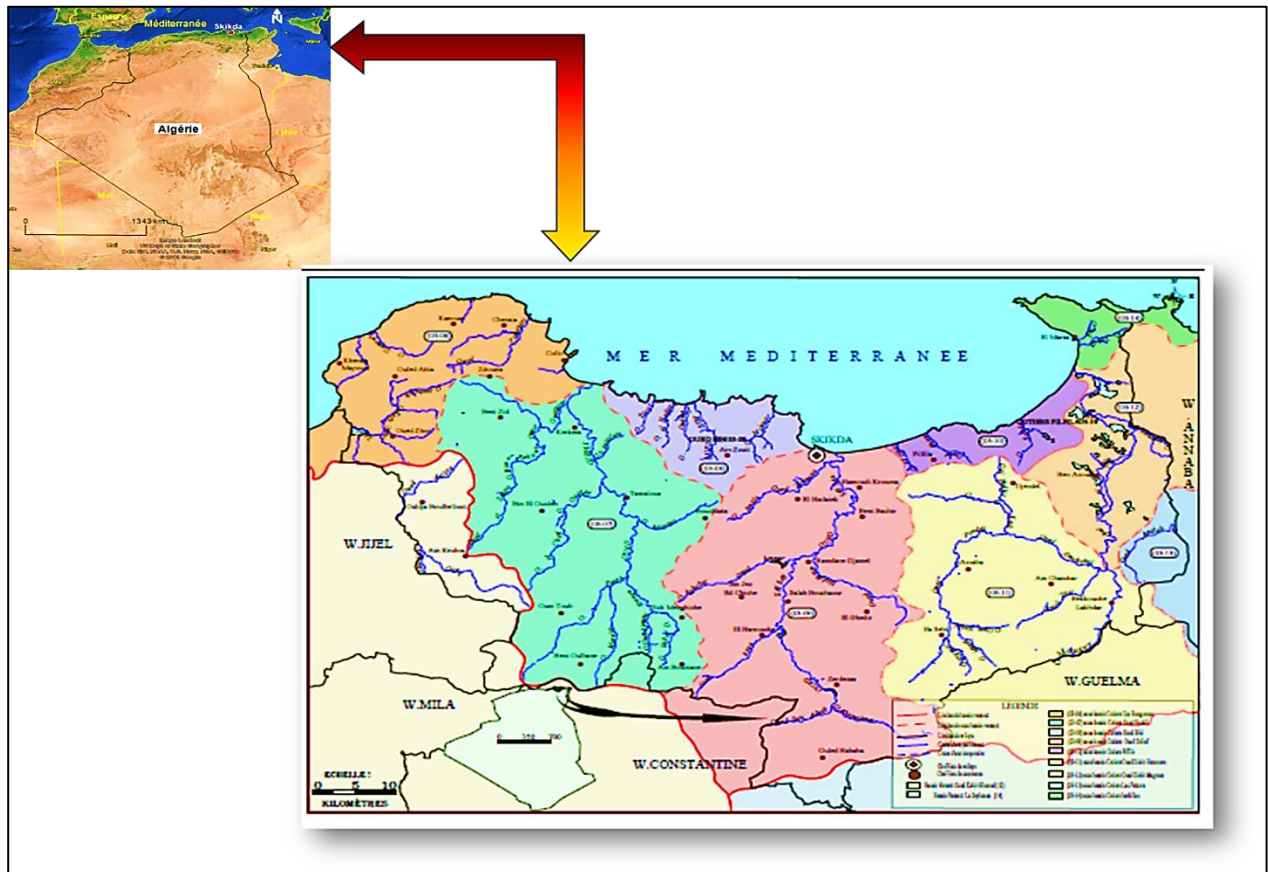


Figure III.1. Situation géographique de la région de Skikda. (Bouhedja A., 2024).

2. Caractéristiques climatiques

Les facteurs climatiques tels que les précipitations, la température, l'évapotranspiration et l'humidité jouent un rôle primordial dans le comportement hydrologique des bassins versants. Les variations de température et d'humidité provoquent des expansions et contractions des roches, dues au gel-dégel alterné ou aux variations de la teneur en eau. L'objectif principal de cette étude hydro climatique est d'analyser les paramètres suivants : précipitations, évaporation, infiltration et ruissellement. En utilisant les données météorologiques disponibles et en appliquant les méthodes appropriées à la région, cette étude vise à établir un bilan hydrique précis. (Ghomrani NH et Medjrab N., 2021).

2.1. Station de mesure

L'analyse climatologique repose sur les données enregistrées à la station météorologique de Skikda (nouveau port). Cette étude hydroclimatique couvre une période de 22 cycle hydrologique, s'étalant de (1996 /97-2018/19). Les coordonnées géographiques de cette station sont présentées dans le tableau suivant. (Ghomrani N.H. et Medjrab N., 2021).

Tableau III.1. Caractéristiques de la station utilisées dans l'étude.

Station	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Période d'observation
SKIKDA	6°54 E	36°53 N	1.3	(1996 /97-2018/19)

(Ghomrani NH, et Medjrab N., 2021)

2.2. Les paramètres météorologiques déterminants

2.2.1. Les précipitations

La répartition géographique des précipitations dans la région d'étude révèle une tendance générale à la baisse du nord vers le sud et de l'est vers l'ouest, traduisant une diminution progressive des quantités de pluie à mesure que l'on s'éloigne des zones côtières et orientales.

Les données pluviométriques, résumées dans le tableau précédent et couvrant une période de 22 ans, sont essentielles pour l'analyse des variations saisonnières et interannuelles des précipitations dans la région. Elles constituent une base indispensable pour la mise en place de stratégies de gestion durable des ressources en eau, notamment dans un contexte de changement climatique et de pression croissante sur les besoins en irrigation.

Tableau III.2. Précipitations moyennes mensuelles à la station de Skikda. (1996 /97-2018/19).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moy-annuelle
P (mm)	49.71	67.05	115.45	130.46	121.46	104.83	72.07	47.78	39.14	13,44	2,17	13.78	777.3

(Ghomrani NH, et Medjrab N., 2021)

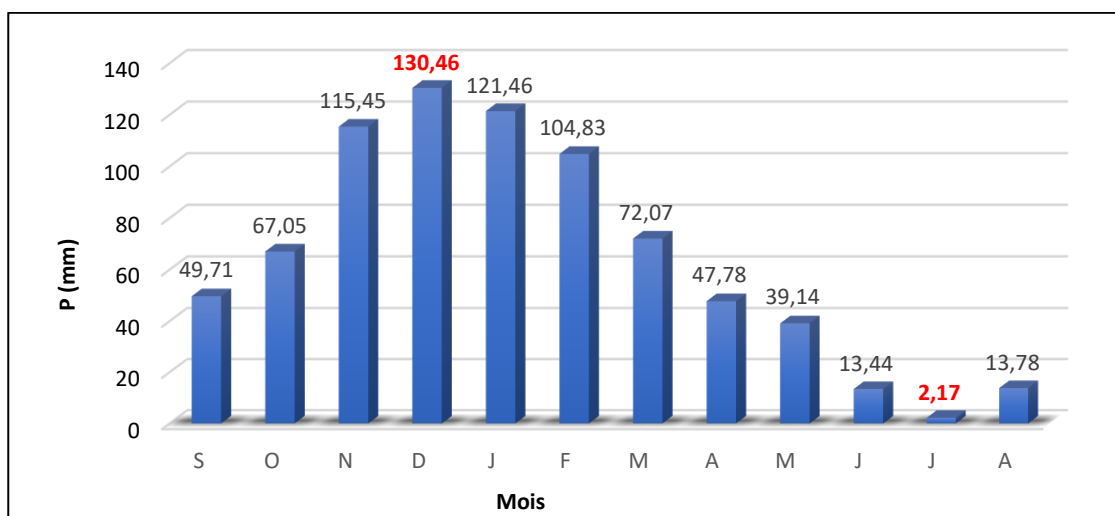


Figure III.2. Distribution des précipitations mensuelles dans la zone d'étude. (1996 /97-2018/19).

Les données issues du tableau et de l'histogramme des précipitations mensuelles moyennes sur une période de 22 ans (1996/97–2018/19) révèlent une forte saisonnalité des pluies dans la région. Décembre est le mois le plus arrosé avec une moyenne de 130,46 mm, tandis que juillet enregistre le minimum avec seulement 2,17 mm. L'hiver apparaît comme la saison la plus humide, totalisant en moyenne 356,75 mm (45,90 % des précipitations annuelles), contre 29,35 mm en été (3,77 %).

Ces variations marquées témoignent du caractère méditerranéen du climat local et soulignent l'importance de ces données pour une gestion efficace des ressources en eau. Elles permettent d'orienter les pratiques agricoles et les stratégies d'irrigation en fonction des périodes de disponibilité hydrique.

2.2.2. Les températures

La température est un facteur clé du bilan hydrique, car elle influence directement le déficit de ruissellement, défini comme la différence entre les précipitations reçues et l'eau réellement disponible en surface. Des températures élevées favorisent l'évapotranspiration, ce qui accentue ce déficit et réduit les apports en eau aux rivières et aux nappes phréatiques. Elle joue ainsi un rôle essentiel dans la disponibilité des ressources en eau, notamment dans les zones à climat chaud et sec.

Tableau III.3. Températures moyennes mensuelles à la station de Skikda.

(1996 /97-2018/19)

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars.	Avr.	Mai.	Jun.	Juil.	Aout.	Moy-
T (°C)	24,35	21,6	16,8	14,1	12,4	13,0	14,6	17,0	19,5	23,1	25,0	26,8	19,02

(Ghomrani NH, et Medjrab N., 2021)

Les données thermiques reflètent bien le climat méditerranéen de la région, avec une température moyenne annuelle de 19,02 °C. Le mois de janvier enregistre la moyenne mensuelle la plus basse, soit 12,37 °C, tandis qu'août se distingue comme le mois le plus chaud, atteignant 26,81 °C. L'évolution des températures suit une tendance saisonnière marquée : une baisse progressive de septembre à janvier, suivie d'une remontée continue jusqu'au pic estival en août.

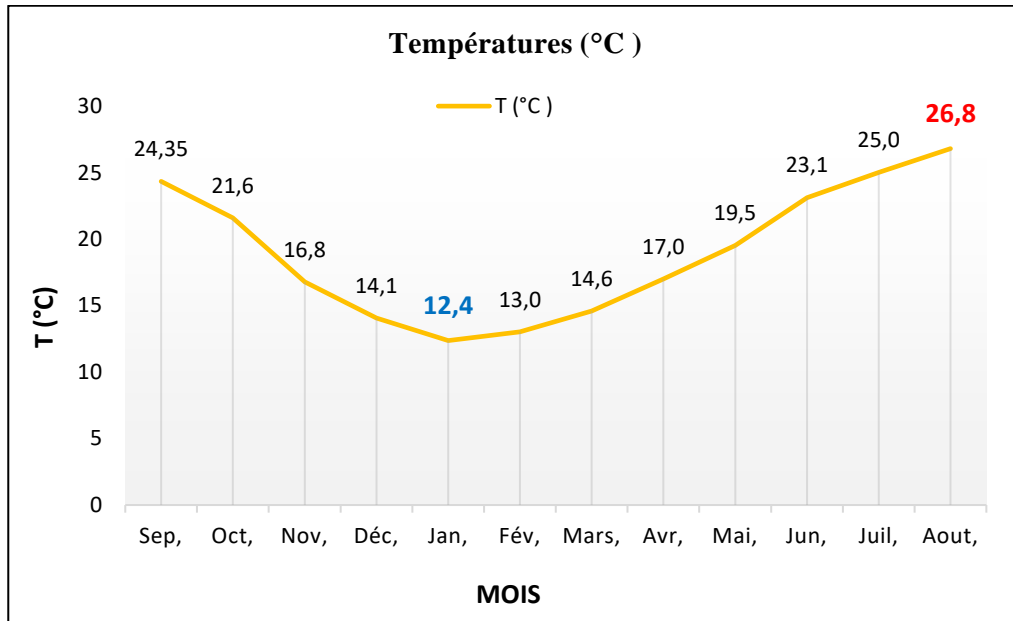


Figure III.3. Températures moyennes mensuelles dans la zone d'étude. (1996 /97-2018/19).

2.3. La relation entre les précipitations et la température : (Courbe de Gaussen)

La courbe de Gaussen est un outil utilisé pour identifier les périodes humides et sèches en fonction des précipitations et des températures. Selon cette méthode :

- Une saison est considérée comme sèche si la somme des précipitations est égale ou inférieure au double de la température moyenne du mois ($P \leq 2T$).
- Une saison est considérée comme humide si la somme des précipitations est égale au double de la température moyenne du mois ($P = 2T$).

Cette relation permet de caractériser de manière précise les périodes de sécheresse et d'humidité au cours de l'année.

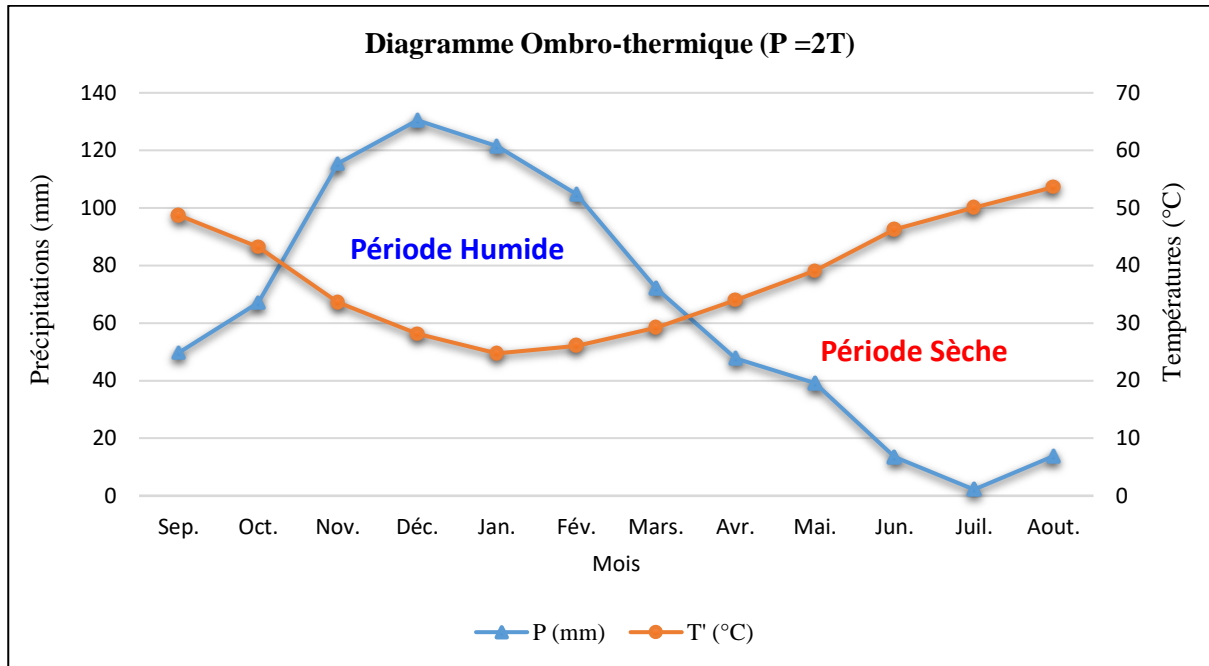


Figure III.4. Diagramme ombro-thermique dans la station de Skikda (1996 /97-2018/19).

Il est intéressant de noter l'inversement des tendances entre les températures et les précipitations. Lorsque les températures augmentent, les précipitations diminuent, et vice versa. Cela est typique des climats méditerranéens où les étés sont chauds et secs, et les hivers sont doux et humides.

Selon le diagramme ombro-thermique, on observe une alternance entre une saison sèche et une période humide :

- *Période sèche* : La saison sèche s'étend du début d'Avril à la fin d'Octobre. Durant cette période, les précipitations sont relativement faibles, atteignant un minimum en juillet. Cette période correspond également à des températures élevées, culminant en août.
- *Période humide* : La période humide s'étend de début de Novembre jusqu'à la fin de Mars. Pendant ces mois, les précipitations augmentent de manière significative, avec un maximum en décembre. Les températures sont plus basses pendant cette période, surtout en janvier et février.

3. Présentation de la station d'épuration de Hamadi Krouma

La station d'épuration de Skikda se situe au nord de la ville sur la route de la zone industrielle Hamrouch Hamoudi, Elle occupe une superficie globale de 11 Hectares.

Cette station est l'une des infrastructures de protection environnementale de la wilaya. Les travaux de construction ont été achevés et réceptionnés le 11 décembre 2011, date à laquelle l'exploitation a également commencé, pour une période initiale de deux ans. La station traite les

eaux usées provenant de la ville de Skikda, ainsi que des localités de Hamadi Krouma, Ramdane Djamel et Béni Béchir, avec une capacité de traitement de 46 000 m³ par jour, soit environ 16,8 millions de mètres cubes par an.

Les eaux usées sont principalement acheminées par un collecteur de diamètre nominal DN 1000, alimenté par les stations de relevage gérées par l'Office National de l'Assainissement. (ONA, 2024).

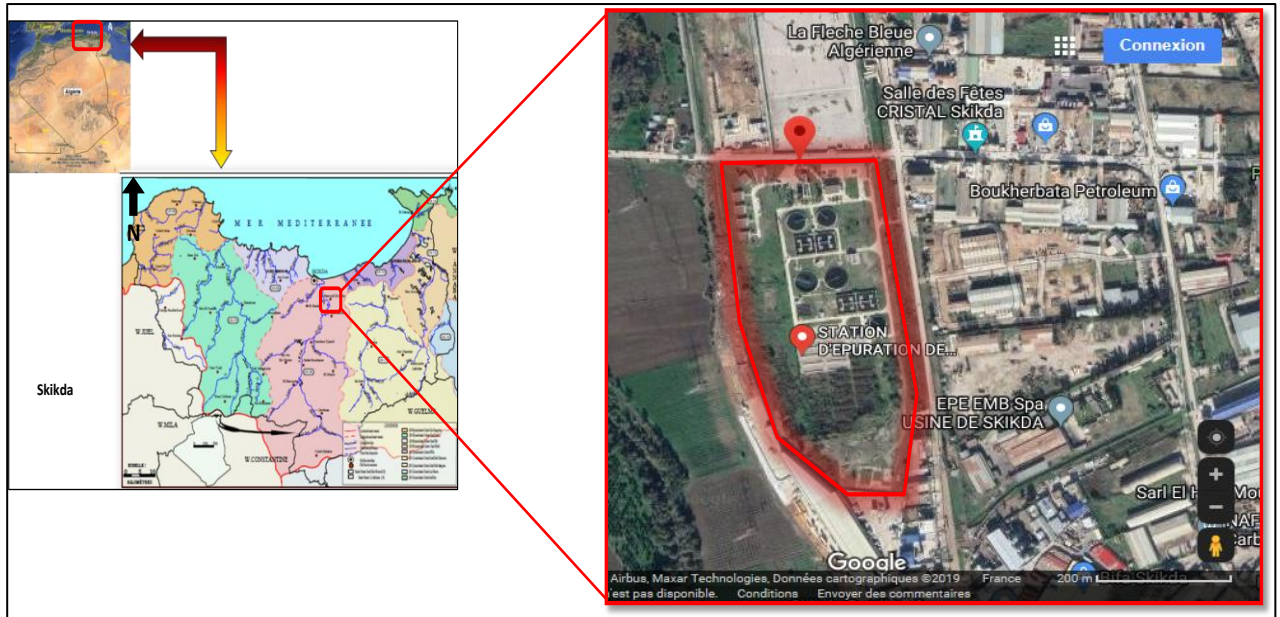


Figure III.5. Situation géographique de la STEP de Hamadi Krouma.

3.1. Objectif de traitement des eaux usées par la STEP de Hamadi Krouma

Le rôle principal de la station de traitement des eaux usées est de minimiser la charge polluante des eaux usées domestiques afin d'obtenir les eaux traitées compatible avec la qualité dans les normes idéales. (OMS, 2024).

La station d'épuration permet de respecter l'environnement et de produire des boues qui seront utilisées comme substances fertilisantes en agriculture.

3.2. Dimensionnement de la station d'épuration

Le dimensionnement de la station d'épuration a été basé sur :

- **Type de réseau** : Unitaire.
- **Nature des eaux usées** : Eaux domestiques et pluviales.
- **Population** : Pour la détermination de la capacité de la station, nous avons adopté les données de la DHW de Skikda dont Le taux d'accroissement moyen considéré aux

différents Horizons, est de 2.31 %. En appliquant la formule d'accroissement exponentiel :

$$P = P_0 (1 + T)^N$$

où :

P₀ : Population actuelle

T : Taux d'accroissement annuel

N : Nombre d'années

Tableau 3.5. Population aux différents horizons

Années	Population (habitants)
2002	194 090
2004	203 160
2006	212 655
2008	222 593
2013	249 518
2015	261 177
2018	279 700
2019	286 161
2020	292 771
2023	313 533
2025	328 183

(A. Bouhedja., 2024)

3.3. Caractéristiques de la station d'épuration

La consommation en eau potable est calculée en se basant sur une dotation moyenne de 200 litres par jour par habitant, en tenant compte des ressources actuelles et futures en eau potable, ainsi que de la consommation totale de la population et des équipements. L'estimation du débit des eaux usées à épurer est effectuée en fonction du taux de canalisation et du taux de réduction des eaux usées. De plus, le nombre d'équipements par habitant est pris en compte pour une évaluation précise. La charge polluante, évaluée par deux paramètres de pollution que sont la demande biochimique en oxygène (DBO₅) et les matières en suspension (MES), joue un rôle crucial. Le réseau d'assainissement de la Wilaya de Skikda est de type séparatif, et la station de traitement est alimentée en eaux brutes par des stations de relevage situées sur le réseau.

Tableau III.4. Les normes des paramètres de pollution retenues

Paramètres		Normes
DBO₅	Demande biochimique en Oxygène	65 g/hab/j
DCO	Demande Chimique en Oxygène	DCO / DBO₅ = 2.3
NTK	Azote Total Kjeldahl	DBO₅ / NTK ≥ 6
MES	Matière en Suspension	75 g/hab/j

(ONA, 2024)

4. Qualité des eaux traitées et possibilités de réutilisation

Les eaux usées traitées sont rejetées dans l'Oued Saf-Saf. La concentration de l'effluent traité en matières polluantes doit être inférieure aux valeurs suivant :

Tableau III.5. Concentration de l'effluent traité en matières polluantes

Paramètre	Concentration maximal (mg/l)
MES	30 mg/l en moyen sur 24 heures
DBO₅	30 mg/l en moyen sur 24 heures Ne dépasse pas 40 mg/l en 05 jours à 20°
DCO	90 mg/l en moyen sur 24 heures 120 mg/l en moyen sur 02 heures
NTK	40 mg/l en moyen sur 24 heures 50 mg/l en moyen sur 02 heures

(ONA, 2025)

5. Caractéristiques techniques de la STEP de Hamadi Krouma

La station d'épuration de la ville de Skikda est une infrastructure essentielle contribuant à la protection de l'environnement par le traitement des eaux usées avant leur rejet dans le milieu naturel. Cette station vise à réduire la pollution générée par les eaux usées, qu'elles soient domestiques ou industrielles, ce qui permet de préserver les ressources en eau et la santé publique. Le processus de traitement comprend plusieurs étapes, allant du prétraitement au traitement biologique, jusqu'au traitement des boues, afin de garantir

une qualité des eaux traitées conforme aux normes environnementales en vigueur. (Abbas .K, Batallah.K, 2018) .



Figure III.6. Présentation de la station d'épuration de Skikda. (ONA, 2025)

5.1. Processus de traitement des eaux usées

5.1.1. Les étapes de traitement

La station d'épuration est structurée en deux lignes principales de traitement : l'une dédiée aux eaux usées, l'autre au traitement des boues :

a. Bassin de réception

L'ouvrage d'entrée du bassin de réception est muni d'une grille à entrefer de 50 mm, nettoyée manuellement, servant à protéger l'installation contre l'introduction accidentelle de gros objets susceptibles de perturber les étapes suivantes du traitement.



Figure III.7. Bassin de réception des eaux usées.

b. Prétraitement

Le prétraitement constitue la première étape essentielle du processus d'épuration des eaux usées. Il vise à éliminer les éléments solides grossiers et les matières flottantes susceptibles d'endommager ou d'encrasser les installations situées en aval. Cette phase permet d'améliorer l'efficacité globale de la station en allégeant la charge des étapes ultérieures de traitement.

- ❖ **Dégrillage** : Parmi les opérations de prétraitement, le dégrillage joue un rôle fondamental. Il consiste à intercepter les déchets grossiers (plastiques, textiles, bois, etc.) transportés par les eaux brutes.

- **Pré dégrillage ou dégrillage grossier**

Une grille grossière droite à nettoyage manuel est installée en amont du système de prétraitement, en aval de la bêche de réception des eaux brutes, en tête de station, à une cote de 11 m NGA. Dotée d'un entrefer de 50 mm, cette grille permet de retenir les objets volumineux transportés par le collecteur, assurant ainsi la protection des équipements situés en aval.

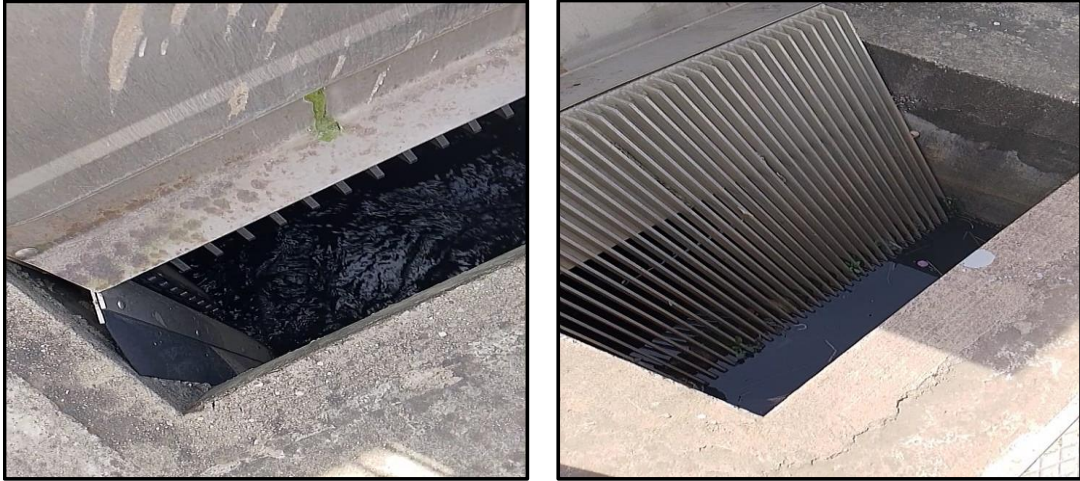


Figure III.8. Dégrillage grossier manuel.

➤ **Dégrillage fin**

Le dégrillage s'effectue dans un canal en béton armé équipé d'une grille droite à nettoyage mécanique. Un second caniveau, servant de dérivation de secours (bypass), est pourvu d'une grille à nettoyage manuel.



Figure III.9. Dégrillage fin Manuel Et Automatique.

❖ Dessablage-Déshuilage

Malgré un réseau séparatif, des sables, matières minérales et huiles peuvent être présents dans les eaux usées. Le traitement est réalisé par deux dessaleurs-déshuileurs longitudinaux et aérés, équipés de racleurs de fond pour les sables et de racleurs de surface pour les graisses.

L'aération permet de séparer efficacement les sables ($\geq 0,20$ mm) et favorise la flottation des graisses. Les sables décantés sont acheminés vers des trémies, repris par des pompes, égouttés dans un classificateur puis stockés dans deux bennes de 10m^3 . Les graisses sont récupérées en surface, stockées dans un puisard, puis évacuées par camion hydro cureur pour traitement ou recyclage



Figure III.10. Dessaleur-Déshuileur plein.

c. Traitement primaire (Décantation primaire)

Dans le processus de traitement des eaux usées, la première étape consiste à éliminer les déchets présents dans l'eau dès son arrivée à la station, tels que le bois, les vêtements, le plastique, le verre, le métal, le sable ou encore le gravier. Cette phase correspond au traitement préliminaire.

Par la suite, les eaux sont dirigées vers un grand bassin de décantation où elles sont retenues pendant plusieurs heures. Ce délai permet aux matières solides de se déposer au fond, formant une couche de boues. Les éléments plus légers, comme les graisses, les huiles et autres matières

flottantes, remontent à la surface et forment un chapeau de boues. Ces boues, qu'elles soient au fond ou en surface, sont ensuite extraites pour être traitées séparément.

Les eaux décantées poursuivent ensuite leur parcours vers l'étape suivante du traitement. Si le traitement primaire constitue l'unique niveau de traitement appliqué, les eaux sont désinfectées avant d'être rejetées dans le milieu naturel. Dans le cas d'un traitement primaire amélioré, des agents chimiques sont ajoutés dans les bassins de décantation. Ces produits favorisent l'agglomération des particules, facilitant ainsi leur sédimentation. La figure 2 illustre les procédés classiques du traitement primaire.



Figure III.11. Décanteur primaire.

d. Traitement biologique

Le traitement secondaire correspond à une épuration biologique des eaux usées ayant déjà subi un traitement primaire. Certaines stations de traitement secondaire peuvent néanmoins se passer de cette première étape.

Durant ce processus, les bactéries naturellement présentes dans l'eau dégradent la matière organique polluante. Parallèlement, certaines particules solides se déposent. Ces particules peuvent être soit réintroduites dans le processus biologique, soit extraites pour être traitées séparément avant leur élimination.

Lorsque le traitement secondaire constitue la dernière étape de la filière, les eaux ainsi traitées sont désinfectées avant d'être rejetées dans le milieu naturel.



Figure III.12. Décanteurs Secondaires.

❖ Bassins d'aération

La station dispose de deux bassins d'aération de forme rectangulaire, alimentés en eaux usées prétraitées. Ces eaux sont ensuite brassées à l'aide d'aérateurs de surface.

Chaque bassin est équipé de quatre aérateurs de surface à axe vertical, installés sur une passerelle en béton armé (ou éventuellement sur une passerelle flottante, sous réserve de confirmation avec le fournisseur de traitement d'eau).



Figure III.13. Bassin d'aération.

❖ Bassins de décantation secondaire (ou bassins de clarification)

La liqueur mixte maintenue en suspension dans les bassins d'aération est dirigée vers deux bassins de décantation secondaire de forme circulaire, où elle subit une séparation gravitaire. Ce processus permet d'obtenir un surnageant clair et limpide, apte à être évacué vers le milieu récepteur après désinfection.

L'alimentation de ces bassins se fait par une conduite en siphon disposée au centre de la structure. Les boues (ou floccs) se déposent au fond du bassin (radier), tandis que l'eau clarifiée s'écoule par des surverses situées dans une goutte périphérique, en direction du bassin de contact pour la phase de désinfection.



Figure III.14. Bassins de clarification.

❖ Poste de recirculation et d'extraction des boues

Une partie des boues récupérées à la sortie des décanteurs secondaires est recyclée en amont des bassins biologiques, afin de maintenir l'activité biologique du procédé. Les boues excédentaires, quant à elles, sont acheminées vers la filière de traitement des boues.



Figure III.15. Poste de recirculation et extraction des boues.

❖ Désinfection des eaux épurées

L'eau clarifiée provenant des décanteurs secondaires est dirigée vers un bassin de contact rectangulaire en béton armé, de type à chicanes, conçu pour favoriser un mélange optimal entre l'eau épurée et la solution d'hypochlorite de sodium utilisée pour la désinfection.

Après cette étape, les eaux désinfectées sont rejetées dans l'Oued Gara.



Figure III.16. Bassin De Contact



Figure III.17. Poste De Désinfection

❖ Principe des boues activées

Le procédé des boues activées repose sur l'observation suivante : lorsqu'une eau usée est convenablement aérée, elle favorise le développement rapide d'une flore bactérienne capable de dégrader les matières organiques polluantes.

Dans des conditions optimales d'aération, les micro-organismes présents dans l'eau usée prolifèrent et forment des floccs biologiques. Une fois l'agitation arrêtée, ces floccs se déposent facilement par décantation. Cette séparation entre la phase liquide et les boues a lieu dans le clarificateur.

Une partie des boues décantées est recyclée vers le bassin d'aération afin de maintenir une concentration suffisante en micro-organismes (réensemencement). L'excédent de boues, quant à lui, est évacué et doit être traité séparément.

Le cœur du procédé consiste donc à favoriser la formation de floccs bactériens dans un bassin d'aération alimenté en eaux usées. Pour empêcher la sédimentation prématurée des floccs dans ce bassin, un brassage intense et continu est indispensable. (Mokhbi N., Grimed M., Kaouane N., 2018).



Figure III.18. Structure du traitement des boues.

❖ Les by-pass

Afin de faciliter l'exploitation et les travaux d'entretien, il est prévu les by-pass suivants : - By-pass du dégrillage mécanique fin, - By-pass permettant de court circuiter le traitement biologique, - By-pass de la décantation secondaire, - By-pass général.



Figure III.19. By-pass



Figure III.20. Schéma d'un By-pass.

e. Traitement tertiaire

Le traitement tertiaire constitue une étape avancée destinée à améliorer davantage la qualité des effluents. Il fait appel à divers procédés physiques (comme la filtration), biologiques ou chimiques, en fonction des polluants ciblés.

Cette phase permet de réduire efficacement la concentration en matières organiques, nutriments (azote, phosphore), agents pathogènes et particules en suspension résiduelles dans l'eau traitée.

Elle devient indispensable lorsque les eaux usées doivent atteindre un niveau de dépollution très élevé, notamment en vue de leur rejet dans des milieux sensibles tels que les cours d'eau douce.

❖ Déshydratation par lits de séchage

Le procédé de déshydratation par lits de séchage consiste à étaler les boues épaissies sur des lits filtrants composés de plastique, graviers et sable. L'eau est évacuée par percolation et évaporation, atteignant une siccité d'environ 40 %. Après séchage, les boues sont curées et mises en décharge, tandis que les jus de percolation sont réinjectés en amont du traitement.



Figure III.21. Lits de séchage.

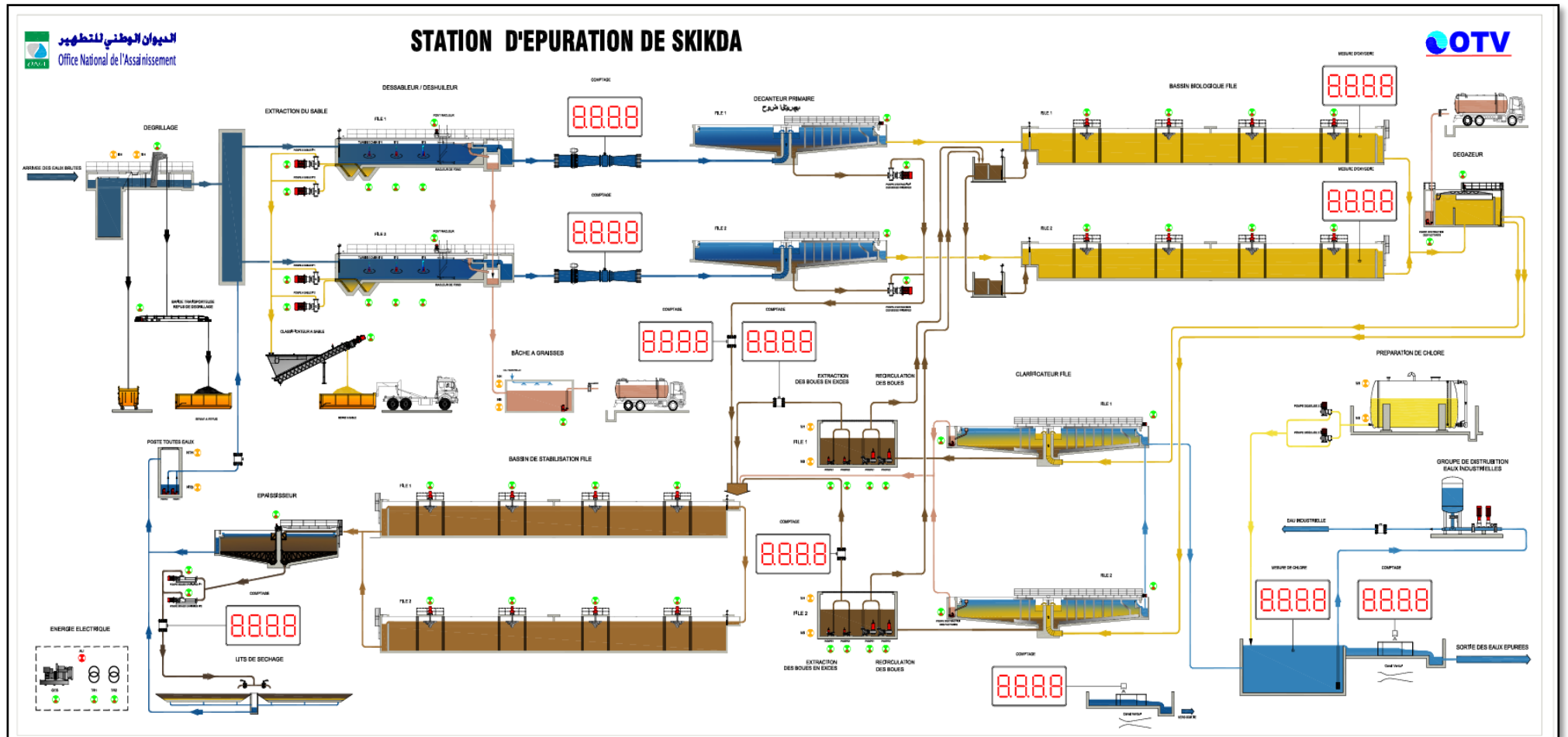


Figure III.22. Plan de la station d'épuration de Hamadi Krouma.

5.2. Méthodes d'analyses des eaux usées

5.2.1. Détermination de la demande biologique en oxygène (DBO₅)

La demande biologique en oxygène (DBO₅) représente la quantité d'oxygène dissous nécessaire aux micro-organismes pour oxyder les matières organiques dans l'eau, dans des conditions standardisées. Son dosage requiert des équipements spécifiques, tels qu'un DBO-mètre, un incubateur et des flacons opaques dédiés à cette analyse.

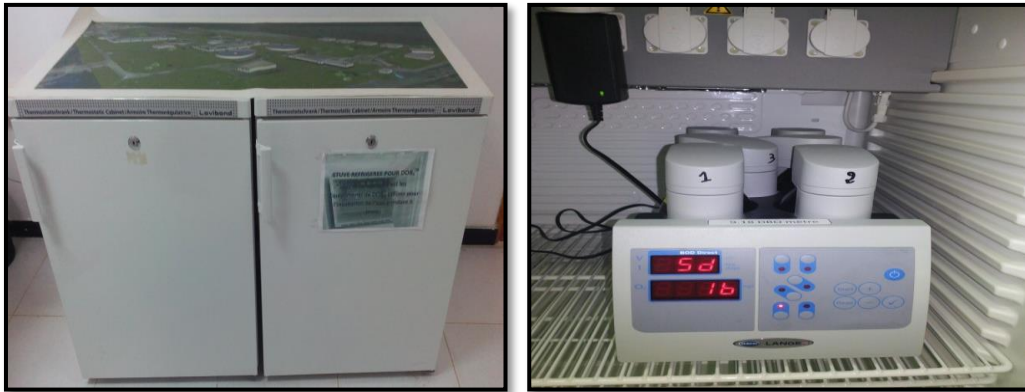


Figure III.23. Incubateur

❖ Mode Opérateur

L'évaluation de la plage de mesure d'un échantillon et la sélection du volume adéquat (selon le tableau 3.10) se déroulent en plusieurs étapes. On commence par ajuster le pH de l'échantillon, puis on mesure avec précision le volume requis à l'aide d'un ballon de débordement, que l'on transfère ensuite dans un flacon DBO à l'aide d'un entonnoir. Conformément au tableau III.6, un inhibiteur de nitrification est ajouté.

Un barreau aimanté est introduit pour homogénéiser la solution, après quoi le joint en caoutchouc, contenant quelques gouttes de solution de KOH, est inséré dans le flacon. La sonde DBO est ensuite fixée, et l'ensemble est placé sur un support prévu à cet effet. L'incubation de l'échantillon est réalisée à 20°C conformément à la norme DBO₅. Ce protocole rigoureux permet d'assurer des conditions standardisées et des résultats fiables pour la mesure de l'oxygène dissous.

Tableau III.6. Volume et dosage de l'échantillon pour la DBO₅

Plage de mesure DBO (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

(ONA, 2024)

5.2.2. Détermination de la demande chimique en oxygène (DCO)

La Demande Chimique en Oxygène (DCO) désigne la quantité d'oxygène, exprimée en mg/L, requise pour oxyder chimiquement l'ensemble des matières organiques contenues dans un échantillon d'eau. Il s'agit d'un paramètre fondamental pour évaluer le niveau de pollution des effluents urbains.

L'analyse de la DCO repose sur l'utilisation d'équipements spécifiques : un thermostat, indispensable pour assurer une température stable durant la réaction, un spectrophotomètre, permettant de mesurer l'absorbance des échantillons à différentes longueurs d'onde, et une micropipette, utilisée pour doser avec précision les volumes d'échantillons et de réactifs.

Ces outils garantissent une évaluation fiable de la charge organique, essentielle pour le suivi, le traitement et la gestion des eaux usées.



Figure III.24. Thermostat.



Figure III.25. Spectrophotomètre et l'hôte.

❖ Mode opératoire

a. Entrée :

Pour déterminer la Demande Chimique en Oxygène (DCO) à l'entrée, ouvrez deux cuvettes de réaction. Remplissez la première avec 2 ml d'eau déminéralisée (cuvette étalon) et la seconde avec 2 ml de l'échantillon à analyser (cuvette échantillon). Refermez soigneusement les cuvettes, agitez doucement puis placez-les dans un réacteur thermique préchauffé à 150 °C pendant 2 heures.

Après chauffage, laissez-les refroidir à environ 60 °C, mélangez de nouveau, puis laissez-les revenir à température ambiante. Pour la lecture, insérez la cuvette étalon dans le photomètre, appuyez sur ZÉRO, puis remplacez-la par la cuvette échantillon et appuyez sur TEST. La concentration en DCO (mg/l) s'affiche.

b. Sortie

Le protocole est identique à celui de l'entrée. Préparez une cuvette étalon avec 2 ml d'eau déminéralisée et une cuvette échantillon avec 2 ml de l'eau traitée. Après un chauffage à 150 °C durant 2 heures, laissez refroidir, homogénéisez, puis mesurez selon les mêmes étapes. Le résultat obtenu indique la DCO résiduelle en sortie. (A. Bouhedja, 2024)

5.2.3. Détermination du potentiel d'hydrogène pH

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.

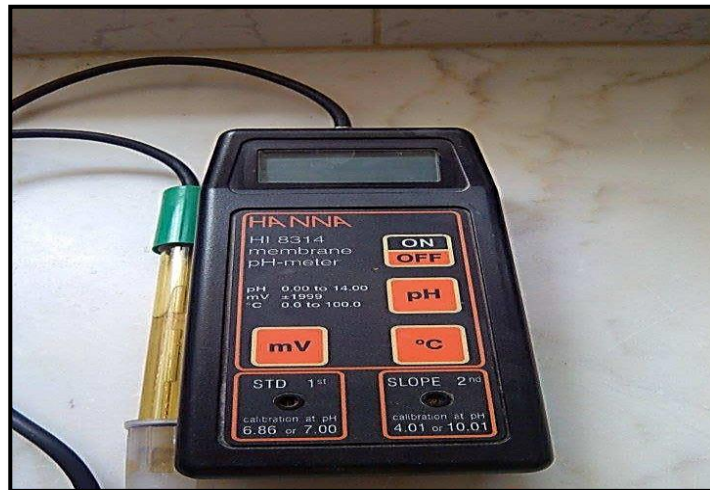


Figure III.26. Le pH Mètre

Pour l'étalonnage du pH-mètre, commencez par allumer l'appareil et rincer l'électrode avec de l'eau distillée. Préparez une solution tampon de pH 7 dans un bécher, agitez-la bien, puis plongez l'électrode dans la solution. Attendez que l'appareil se stabilise sur le standard 2. Ensuite, rincez l'électrode et répétez le processus avec des solutions tampons de pH 10 et pH 4, rinçant l'électrode abondamment à l'eau distillée entre chaque solution.

Pour le dosage de l'échantillon, prenez environ 100 ml d'eau à analyser et agitez bien la solution. Plongez l'électrode dans le bécher, laissez stabiliser, puis notez le pH.

5.2.4. Mesure d'oxygène dissous dans l'eau

L'oxygène est toujours présent dans l'eau, mais sa concentration varie en fonction de plusieurs facteurs, notamment la température, la pression partielle d'oxygène dans l'atmosphère et la salinité. Sa solubilité diminue avec l'augmentation de la température et de la salinité. L'oxygène dissous conserve ses propriétés oxydantes, intervenant dans des réactions chimiques ou électrochimiques, ce qui en fait un acteur clé dans les phénomènes de corrosion. En général, la teneur en oxygène dissous dans l'eau ne dépasse pas 10 mg/l, et dépend essentiellement de son origine (eaux naturelles, traitées ou usées).



Figure III.27. Oxymètre.

Afin de mesurer la concentration en oxygène, commencez par allumer l'oxymètre et rincer l'électrode avec de l'eau distillée. Prélevez environ 100 ml d'eau à analyser, puis plongez l'électrode dans le bécher contenant l'échantillon. Laissez stabiliser un moment avant de noter la concentration d'oxygène.

5.2.5. Détermination de la température

Il est essentiel de mesurer la température de l'eau avec précision, car elle influence plusieurs propriétés physico-chimiques importantes. En effet, la température affecte la solubilité des sels et des gaz, la dissociation des sels dissous, ainsi que la conductivité électrique de l'eau. Elle joue également un rôle déterminant dans la mesure du pH. Par ailleurs, la solubilité de l'oxygène dans l'eau est inversement proportionnelle à la température : plus l'eau est froide, plus elle peut dissoudre d'oxygène. La mesure de la température sur le site de prélèvement constitue donc une étape fondamentale dans le processus d'analyse des eaux. Elle est généralement réalisée en même temps que la mesure du pH, à l'aide d'un pH-mètre équipé d'un capteur de température.

5.2.6. La conductivité électrique CE

L'eau possède une conductivité électrique, liée à la présence d'ions mobiles sous l'effet d'un champ électrique. Cette propriété dépend de la nature et de la concentration des ions en solution. La conductivité augmente avec la température, car celle-ci accroît la mobilité ionique. Ainsi, elle reflète la capacité de l'eau à conduire le courant électrique.

Sa mesure s'effectue à l'aide d'un conductimètre à électrodes, composé d'une cellule de mesure plongée dans un échantillon d'eau à analyser.



Figure III.28. Conductimètre à électrodes.

Le protocole pour mesurer la conductivité électrique débute par un rinçage répété de l'électrode de l'appareil avec de l'eau distillée. Par la suite, l'électrode est complètement immergée dans le récipient contenant l'eau à analyser, et l'appareil est laissé stabiliser pendant un certain laps de temps. Une fois la stabilisation atteinte, la conductivité de l'eau est enregistrée.

5.2.7. Détermination des matières en suspension (MES)

Deux méthodes peuvent être utilisées pour déterminer la teneur en matières en suspension aux eaux usées : la filtration du matériau à faible charge plus syndrôme et la filtration en masse pour les eaux à charge élevée coercitive. La centrifugation est basée sur le même principe que la filtration quoi que son mode opératoire soit similaire. Néanmoins, elle utilise d'une centrifugeuse et de coupelles anaérobies, contrairement à la filtration ou une pompe à vide standard est utilisée, accompagnée de filtres. Il convient de noter que la filtration est largement utilisée que La centrifugation, nous passerons donc sous le principe et le compte est fourni pour la filtration sous vide.



Figure III.29. Centrifugeuse.



Figure III.30. Etuve.

▪ Mode opératoire

Le mode opératoire commence par humidifier le filtre avec de l'eau distillée. Ensuite, le filtre est placé sur des verres de montre et séché dans une étuve à 105°C pendant au moins deux heures. Après le séchage, les filtres sont refroidis dans un dessiccateur ou à l'air libre près de la balance pour éviter toute contamination par la poussière. Ensuite, le filtre est pesé sur une balance de précision pour obtenir la masse initiale (m_0 en mg). Le filtre est ensuite placé dans le système de filtration où un volume donné de l'échantillon (par exemple 100 ml) est filtré, suivi d'un rinçage de l'éprouvette graduée avec environ 20 ml d'eau distillée. Le filtre est récupéré à l'aide de pinces et remis dans son verre de montre, puis placé à nouveau dans l'étuve à 105°C pendant 2 heures. Après cette étape, le filtre est retiré de l'étuve et laissé à température ambiante pour s'équilibrer. Enfin, le filtre est pesé à nouveau sur la balance de précision pour obtenir la masse finale (m_1 en mg).

Le calcul des matières en suspension (MES) est effectué selon la formule :

$$\text{MES (mg/l)} = (m_1 - m_0) * 1000 / V, \text{ où :}$$

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.

6.Capacité et performances opérationnelles de la STEP de Hamadi Krouma

La station d'épuration de Hamadi Krouma est conçue pour assurer le traitement des eaux usées domestiques et industrielles de la ville de Skikda et de ses environs. Sa capacité nominale

permet de traiter un débit de 40 000 m³/jour, ce qui correspond à une population équivalente d'environ 250 000 équivalents-habitants (EH).

6.1. Capacité de traitement

- **Débit nominal** : 40 000 m³/j
- **Population desservie** : environ 250 000 EH
- **Type de traitement** : traitement biologique par boues activées avec nitrification/dénitrification et traitement tertiaire par désinfection.

6.2. Performances épuratoires

La station affiche de bonnes performances épuratoires, conformes aux normes algériennes de rejet dans le milieu naturel.

Tableau III.7. Les garanties de traitement à l'entrée et la sortie du STEP

Paramètre	Entrée (mg /L)	Sortie (mg/L)	Rendement (%)
DBO₅	325	30	91.12
DCO	747	90 et en plein charge 120	82
MES	375	30	93.15
NTK	54	40 et en plain charge 50	

(ONA, 2025)

6.3. Suivi et contrôle

Un laboratoire interne effectue des analyses quotidiennes pour suivre les paramètres physico-chimiques et microbiologiques. Des campagnes de suivi sont également réalisées par l'Agence de Bassin Hydrographique (ABH) et d'autres organismes de contrôle.

7. Contraintes techniques et environnementales de la station d'épuration

7.1. Contraintes techniques

La station d'épuration fait face à plusieurs difficultés techniques affectant son fonctionnement et son efficacité globale, notamment :

- **Vétusté des équipements** : Les installations utilisées ont dépassé leur durée de vie utile, ce qui entraîne des pannes fréquentes et des difficultés d'approvisionnement en pièces de rechange.

- **Absence de maintenance préventive** : Les interventions se font généralement après les pannes, ce qui aggrave les dysfonctionnements et interrompt le processus de traitement.
- **Dépendance totale à l'électricité** : Les coupures fréquentes du courant provoquent l'arrêt de systèmes essentiels comme l'aération et le pompage, réduisant ainsi l'efficacité du traitement biologique.
- **Manque de formation technique** : Le personnel souffre d'un déficit en formation spécialisée, rendant les interventions techniques complexes plus difficiles.
- **Variabilité de la qualité des eaux entrantes** : Les variations, notamment dues aux rejets industriels, nuisent à l'efficacité du traitement biologique.

7.2. Contraintes environnementales

D'un point de vue environnemental, la station rencontre des problèmes susceptibles de perturber l'équilibre écologique local, notamment :

- **Accumulation des résidus organiques** : L'absence de traitement efficace entraîne leur accumulation, générant des odeurs désagréables et des risques sanitaires et environnementaux.
- **Non-conformité des rejets** : En cas de panne ou d'urgence, les eaux peuvent être rejetées sans respecter les normes environnementales, affectant les cours d'eau récepteurs.
- **Proximité des zones habitées** : La présence de la station à proximité des quartiers résidentiels génère des plaintes liées aux nuisances olfactives et à la prolifération des insectes.
- **Émissions non contrôlées** : Certaines bassins ne sont pas correctement couverts, ce qui favorise l'émission de gaz désagréables, en particulier en période chaude, et dégrade les conditions de travail.

Conclusion

Ce chapitre présente une analyse des paramètres climatologiques de la région de Skikda sur une période de 22 ans (1996–2019), en se concentrant principalement sur les précipitations et les températures. Les résultats révèlent une pluviométrie annuelle moyenne de 777,3 mm et une température moyenne mensuelle de 19,02 °C, ce qui caractérise un climat de type sub-humide, avec des variations saisonnières marquées.

Par ailleurs, l'étude s'est également intéressée à la station d'épuration de Hamadi Krouma, infrastructure clé pour le traitement des eaux usées dans la région. Conçue pour une capacité de 22 000 m³/jour sur une superficie de 2,665 hectares, elle repose sur des technologies

performantes assurant un traitement de qualité conforme aux normes, permettant ainsi la réutilisation des eaux traitées en agriculture. La station comprend plusieurs étapes (prétraitement, traitement primaire, secondaire et tertiaire) et un système de relevage des eaux usées. Malgré son efficacité, la station fait face à des contraintes techniques liées à l'entretien des équipements et à l'usure des infrastructures, nécessitant une gestion rigoureuse pour garantir un service durable.

Chapitre IV :

Qualité des eaux traitées et stratégie de réutilisation en irrigation

Introduction

L'agriculture est un secteur clé pour l'économie et la sécurité alimentaire en Algérie. La basse plaine d'El Hadaiek est une région agricole importante qui dépend fortement des ressources en eau pour l'irrigation des cultures. Cependant, les ressources en eau douce deviennent de plus en plus limitées en raison des changements climatiques, de la croissance démographique et des besoins croissants en eau pour divers usages. Dans ce contexte, la réutilisation des eaux usées épurées apparaît comme une solution viable pour pallier le déficit hydrique et soutenir l'agriculture.

La station d'épuration des eaux usées (STEP) de Hamadi Krouma, située dans la wilaya de Skikda, joue un rôle essentiel dans la gestion durable de l'eau en assurant le traitement des eaux usées domestiques, en vue de leur réutilisation, notamment à des fins agricoles dans la basse plaine d'El Hadaiek. Ce dispositif constitue un levier stratégique pour faire face à la raréfaction des ressources hydriques et promouvoir l'agriculture durable.

L'objectif principal de ce chapitre est de discuter les résultats des analyses physico-chimiques et bactériologiques des eaux usées traitées par la STEP, à travers une comparaison entre les données mesurées à l'entrée (eaux brutes) et à la sortie (eaux traitées) de la station.

Concernant les paramètres physico-chimiques, les données exploitées sont celles enregistrées par la STEP tout au long de l'année 2024. Elles permettent d'évaluer la variation saisonnière et mensuelle des caractéristiques des eaux usées, et ainsi de mieux comprendre les dynamiques de traitement au fil du temps.

Dans le cadre de l'évaluation bactériologique, une campagne de prélèvements ciblée a été menée afin de caractériser la qualité microbiologique des eaux usées à différentes étapes du processus de traitement. Au total, six échantillons ont été collectés : quatre au niveau de points stratégiques situés en amont et en aval de la station d'épuration, ainsi que deux autres directement prélevés sur les eaux brutes (à l'entrée) et sur les eaux traitées (à la sortie) de la STEP de Hamadi Krouma. L'ensemble des analyses bactériologiques a été réalisé au laboratoire de l'ONAB (Office National de l'Alimentation du Bétail) d'El Harrouch. Ces analyses ont permis d'évaluer l'efficacité des procédés biologiques et hygiéniques appliqués au sein de la station, en particulier la capacité du système à éliminer les microorganismes pathogènes, ce qui constitue un indicateur clé pour juger de la conformité sanitaire des eaux destinées à une éventuelle réutilisation agricole.

L'analyse conjointe de ces résultats permet de juger de la performance globale de la station en matière de dépollution, de diagnostiquer les éventuelles faiblesses du système de traitement, et de proposer des pistes d'amélioration. À cet effet, des recommandations seront formulées concernant l'optimisation des procédés de traitement, l'introduction de technologies plus performantes (notamment pour le traitement tertiaire et la désinfection), ainsi que le renforcement des capacités de gestion et de maintenance. Ces propositions visent à garantir la qualité des eaux réutilisées et à sécuriser leur emploi dans l'irrigation, tout en contribuant à une meilleure préservation de l'environnement et des ressources en eau locales.

1. Evolution des paramètres physico-chimiques des eaux usées (Années 2024)

Les stations d'épuration doivent respecter des normes de rejet spécifiques pour divers polluants présents dans les eaux usées, tels que les matières carbonées, les matières azotées, le pH, et la conductivité. Les eaux usées collectées dans les réseaux urbains ou émises par les industries ne peuvent être rejetées dans un milieu récepteur naturel (rivière, lac, littoral marin, ou terrain d'épandage) qu'après avoir été traitées pour répondre à des normes fixées par voie réglementaire.

Le tableau suivant présente les différentes normes de rejet ainsi que les normes admises au niveau de la station d'épuration (STEP) de Hamadi Krouma.

Tableau IV.1. Normes de rejets des effluents industriels et urbains de la STEP de Hamadi Krouma.

Paramètres	Unités	Normes (*)	méthodes
Température	°C	25	Multi-Paramètres
pH	/	6.5-9	
Conductivité	µs/cm	2800	
Salinité	‰	/	
Oxygène dissous	%	30	
Matière en suspension(MES)	mg/	25	
Demande chimique en oxygène (DCO)	mg/l	30	ISO 6060:1989
Demande biochimique en oxygène (DBO₅)	mg/l	7	ISO5815-1:2003
Nitrites (NO₂⁻)	mg/l	0.1	NF T 90-013
Ammonium	mg/l	4	

(Bouhedja A., 2024)

(*) : Norme Algérienne Décret exécutif n° 11-219 du 10 Rajab 1432 correspondant au 12 juin 2011 fixant les objectifs de qualité des eaux superficielles et souterraines destinées à l'alimentation en eau des populations

1.1. La matière en suspension (MES)

L'analyse des matières en suspension (MES) est essentielle pour évaluer la qualité des eaux usées et l'efficacité des stations d'épuration. Les MES, comprenant des particules organiques et inorganiques, indiquent le niveau de pollution. Un suivi rigoureux des MES permet d'assurer le respect des normes réglementaires et de détecter les variations saisonnières, les surcharges ou les inefficacités du traitement, afin d'améliorer continuellement la qualité des eaux traitées.

Le graphe présente l'évolution des concentrations en Matières en Suspension (MES) dans les eaux usées brutes (E Brutes) et épurées de la Station d'Épuration des Eaux Usées (STEP) de Skikda durant l'année 2024. Les concentrations sont exprimées en milligrammes par litre (mg/L), et la norme de rejet est de 25 mg/L pour les MES. (Bouhedja A.,2024).

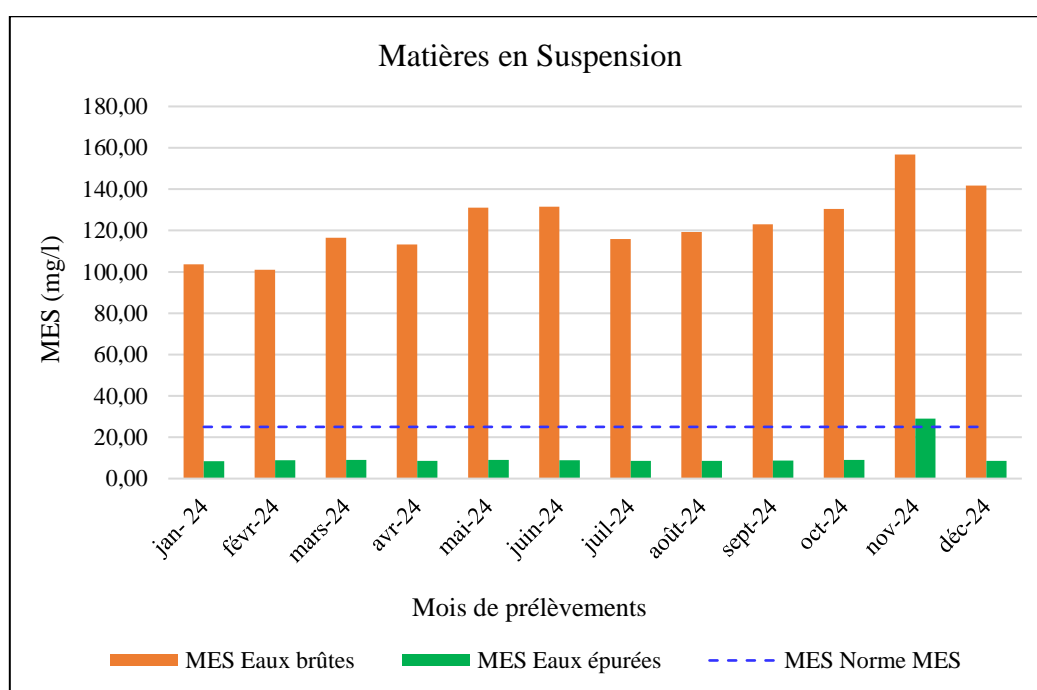


Figure IV.1. Variations moyennes mensuelles de la Matière en Suspension (MES) des eaux usées brutes et épurées de la STEP de Hamadi Krouma (2024).

Le graphique ci-dessus présente l'évolution mensuelle des concentrations en MES dans les eaux usées à l'entrée et à la sortie de la station d'épuration de Hamadi Krouma, tout au long de l'année 2024.

Les résultats montrent que les concentrations en MES à l'entrée de la station varient entre environ 101 mg/l et 156,7 mg/l, ce qui traduit une charge polluante relativement constante et significative. Un pic est particulièrement observé au mois de novembre 2024 (156,75 mg/l), période durant laquelle la charge en matières en suspension atteint son maximum.

En revanche, les concentrations en MES à la sortie de la station sont nettement plus faibles, généralement inférieures à 25 mg/l, ce qui témoigne d'une bonne efficacité du processus de traitement dans la réduction des matières en suspension. Toutefois, une exception est notée en novembre 2024, où la valeur de MES à la sortie atteint environ 25 mg/l, dépassant légèrement la norme réglementaire.

1.2. La demande chimique en oxygène (DCO)

L'analyse des concentrations en Demande Chimique en Oxygène (DCO) est un indicateur crucial pour évaluer la charge polluante des eaux usées et l'efficacité des stations d'épuration. La DCO mesure la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder chimiquement les matières organiques et inorganiques présentes dans l'eau. Une concentration élevée en DCO signale une pollution importante qui peut nuire aux milieux récepteurs naturels. (Chadli B., 2017).

Le graphique relatif à l'évolution des concentrations en demande chimique en oxygène (DCO) au sein de la station d'épuration de Hamadi Krouma pour l'année 2024 permet d'évaluer l'efficacité du traitement des eaux usées vis-à-vis de la pollution organique.

Durant toute l'année, les valeurs de DCO à l'entrée de la STEP sont relativement élevées, oscillant entre 114 mg/l et 265 mg/l, ce qui reflète une importante charge organique dans les eaux usées brutes. Une baisse exceptionnelle est toutefois observée au mois de novembre, où la DCO à l'entrée chute à environ 114 mg/l. Cette diminution pourrait s'expliquer par une dilution des effluents (par exemple, en période de pluies) ou une variation dans les apports domestiques.

Concernant les valeurs de DCO à la sortie de la station, la majorité des résultats mensuels dépasse la norme de 30 mg/l, atteignant souvent des concentrations avoisinant les 39 à 44,5 mg/l. Cette situation suggère que, bien que la STEP parvienne à réduire significativement la charge organique, le traitement demeure insuffisant pour satisfaire pleinement les exigences

réglementaires. Le mois de novembre constitue une exception positive : la DCO en sortie y est largement inférieure à la norme, ce qui coïncide avec la plus faible DCO mesurée en entrée. Cela laisse penser que la performance du traitement est également influencée par la charge initiale.

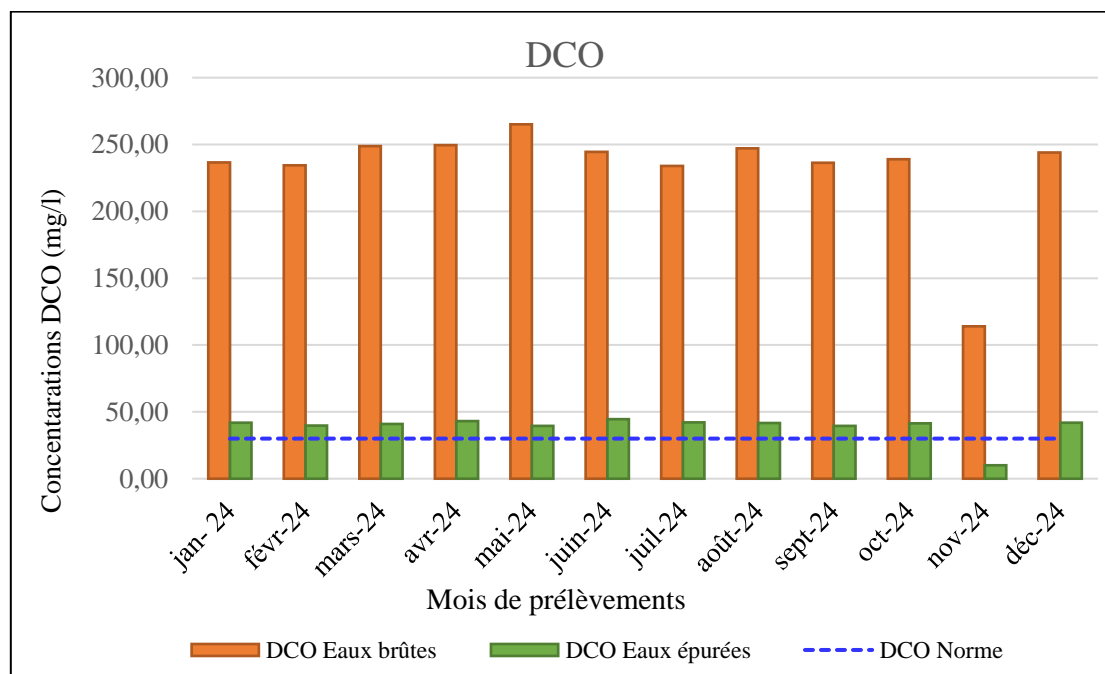


Figure IV.2. Variations moyennes mensuelles de la DCO des eaux usées brutes et épurées de la STEP Hamadi Krouma (2024).

1.3. Le pH

D'une manière générale, les valeurs du pH à l'entrée oscillent entre 7,28 et 7,43, ce qui reflète une eau légèrement basique. Cette relative stabilité suggère que les effluents domestiques ou industriels alimentant la station ne présentent pas de grandes fluctuations en termes d'acidité ou d'alcalinité. À la sortie, les valeurs de pH sont globalement plus faibles, allant de 7,20 à 7,29, ce qui reste toutefois dans une plage de neutralité.

Le traitement effectué par la station semble avoir un effet léger de réduction du pH, probablement en lien avec les processus biologiques ou physico-chimiques mis en œuvre. Aucun dépassement de la norme minimale (7,00) n'a été observé durant l'année, ni à l'entrée ni à la sortie. Cette conformité régulière est le signe d'un équilibre chimique maîtrisé tout au long du processus de traitement.

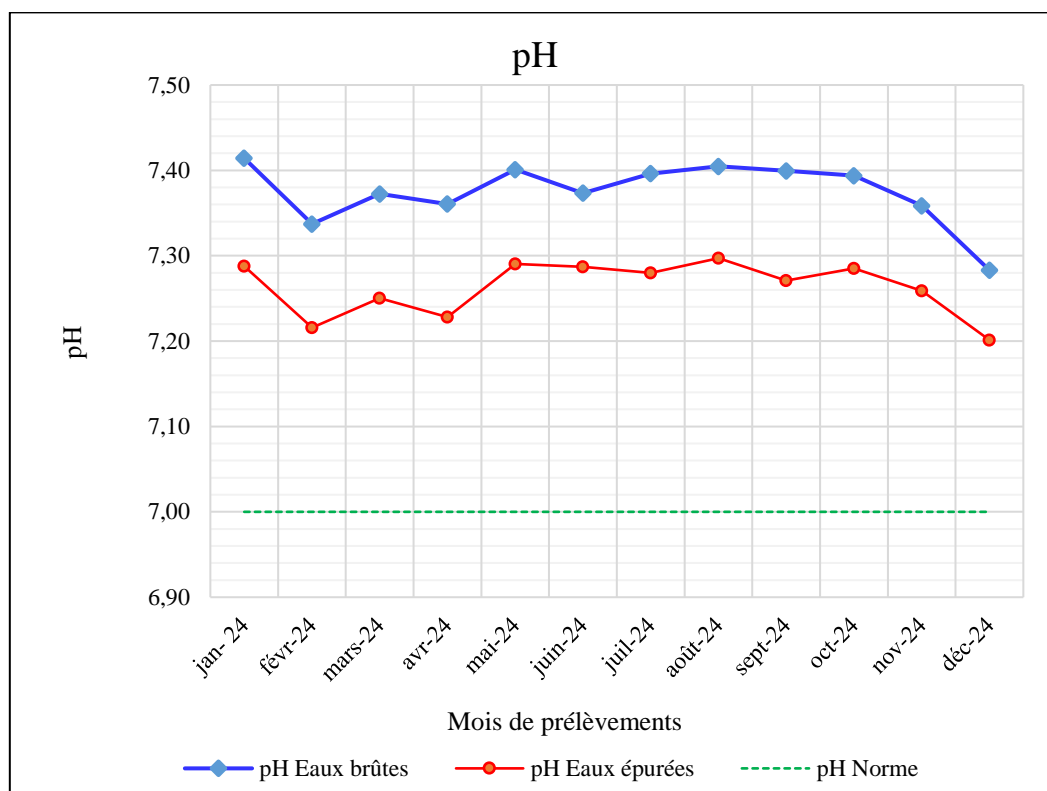


Figure IV.3. Variations moyennes mensuelles du pH dans les eaux usées brutes et épurées de la STEP de Hamadi Krouma (2024).

La station d'épuration de Hamadi Krouma donc assure un bon maintien de la neutralité du pH dans ses rejets, respectant ainsi les exigences environnementales en vigueur. Il n'y a pas de fluctuations préoccupantes, ce qui témoigne d'un fonctionnement stable du système de traitement sur ce paramètre spécifique.

1.4. La conductivité électrique (CE)

Le graphique présenté illustre l'évolution mensuelle de la conductivité électrique (CE) des eaux usées brutes et traitées à la station d'épuration de Hamadi Krouma sur l'année 2024, de janvier à décembre.

Les résultats montrent que la conductivité des eaux usées brutes reste globalement stable tout au long de l'année. Les valeurs fluctuent entre environ 1080 et 1168 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec de légères hausses observées en février, avril et juillet, et des baisses en janvier et novembre. Ces variations, bien que perceptibles, se maintiennent dans une plage relativement étroite, traduisant une stabilité de la charge minérale des eaux entrantes.

En ce qui concerne les eaux traitées, la conductivité suit une tendance similaire à celle des eaux brutes, mais avec des valeurs légèrement inférieures, comprises entre 966 et 1017

$\mu\text{S}/\text{cm}$. Cette réduction modeste suggère que le processus de traitement appliqué à la station de Hamadi Krouma permet une certaine diminution des sels dissous, probablement par dilution ou élimination partielle des ions présents. Les fluctuations mensuelles de la CE en sortie sont également synchrones avec celles de l'entrée, bien que légèrement atténuées.

La norme de conductivité adoptée comme référence pour les eaux usées traitées est de $2800 \mu\text{S}/\text{cm}$ (normes algériennes). Ce seuil constitue une limite réglementaire ou indicative pour les rejets ou la réutilisation des eaux usées. Il est important de noter que les valeurs mesurées, tant pour les eaux brutes que pour les eaux traitées, restent largement en deçà de cette limite tout au long de l'année.

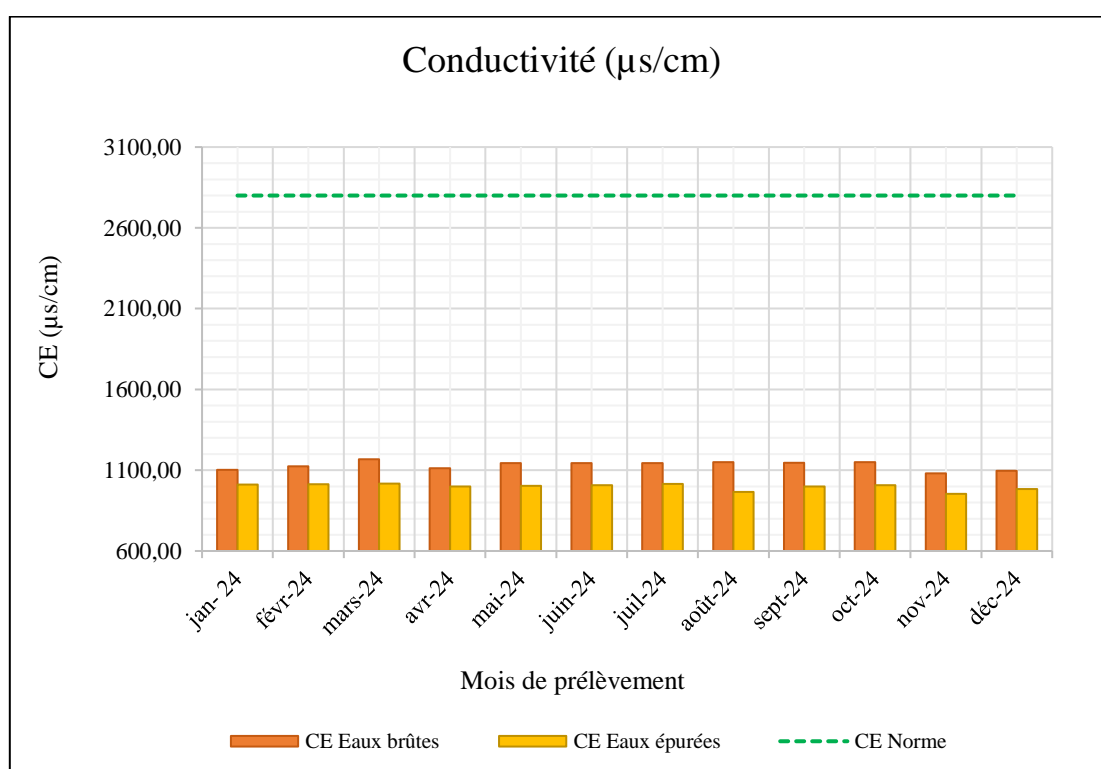


Figure IV.4. Variations moyennes mensuelles des conductivités dans les eaux usées brutes et épurées de la STEP de Hamadi Krouma (2024).

La conductivité des eaux usées à la station de Hamadi Krouma présente une stabilité notable sur l'ensemble de l'année 2024. Le traitement mis en œuvre y contribue à une légère amélioration de la qualité de l'eau en réduisant la charge saline. Surtout, les résultats révèlent un respect constant de la norme de conductivité, témoignant de l'efficacité globale du système de traitement sur cet indicateur physico-chimique essentiel.

2. Analyse des paramètres physicochimiques et bactériologique des eaux usées et des eaux de surface

Dans le cadre de la présente étude, réalisée au niveau de la station d'épuration de Hamadi Krouma (wilaya de Skikda), une comparaison a été effectuée entre les eaux usées brutes, à l'entrée de la station, et les eaux traitées, à leur sortie. Cette démarche vise à évaluer les performances de la STEP en matière d'élimination des indicateurs microbiologiques de pollution fécale.

Par ailleurs, afin d'élargir l'analyse à l'impact environnemental, deux prélèvements complémentaires ont été réalisés dans l'oued Saf-Saf : un premier point en amont de la station (point P3), permettant de caractériser l'état initial de la rivière avant tout rejet, et un second en aval, après la confluence avec les eaux traitées issues de la STEP. Ces résultats offrent une vision intégrée des effets du rejet sur le milieu naturel.



Figure. IV.5. Carte de répartition des points de prélèvements.

2.1. Analyse des paramètres physicochimiques *in-situ*

Dans le cadre de cette étude, une série de mesures physico-chimiques a été réalisée directement sur le terrain afin d'évaluer la qualité des eaux usées et de surface en lien avec la station d'épuration de Skikda et l'oued Saf-Saf. Ces données sont essentielles pour juger de la conformité des eaux analysées aux normes environnementales et pour en estimer la possibilité de réutilisation, notamment en irrigation.

Le tableau suivant présente les principales caractéristiques physico-chimiques mesurées *in situ* à l'aide d'un multi paramètre portable de marque (**PCE**). Les prélèvements ont été effectués en quatre points : les eaux brutes (P1), les eaux traitées de la STEP (P2), l'amont (P3) et l'aval (P4) de l'oued Saf-Saf. Ces résultats sont confrontés aux normes de rejets de l'OMS ainsi qu'aux recommandations de l'OMS/FAO pour l'irrigation, afin d'évaluer la qualité des eaux et leur potentiel de réutilisation agricole.

Tableau IV.2. Caractéristiques physico-chimiques des eaux échantillonnées au niveau de la STEP de Hamadi Krouma et de l'oued Saf-Saf (Mars 2025)

Paramètre Points de prélèvement	T° (°C)	pH	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	TDS (mg/L)	Salinité (mg/L)	ORP (mV)
P1 (Eaux brutes)	20,7	7,37	1767	1187	891	-253
P2 (Eaux traitées)	20,8	7,54	1581	1055	788	95
P3 (Amont Oued Saf-Saf)	20,4	7,67	1479	991	739	166
P4 (Aval Oued Saf-Saf)	20,6	7,60	1498	1005	747	218
Normes de rejets (OMS)	—	6,5–8,5	< 2000	< 1500	< 1000	> +100
Normes d'irrigation (OMS/FAO)	20–30	6,5–8,4	< 3000	< 2000	< 1000	> +100

2.1.1. Les températures (T°)

Les températures enregistrées lors des prélèvements varient légèrement entre 20,4 °C (P3) et 20,8 °C (P2). Ces valeurs, relativement stables, restent bien en deçà du seuil maximal recommandé pour l'irrigation (30 °C) selon les normes de l'OMS/FAO. Elles ne présentent donc aucun risque thermique pour la faune aquatique ni pour les cultures irriguées, ce qui traduit une situation thermique globalement favorable à la réutilisation agricole de ces eaux.

2.1.2. Le potentiel d'Hydrogène (pH)

Le pH mesuré dans les différents points de prélèvement oscille entre 7,37 et 7,67. Ces valeurs sont toutes compatibles avec les normes de rejet de l'OMS (6,5–8,5) ainsi qu'avec les recommandations pour l'irrigation (6,5–8,4). Cela indique un équilibre acido-basique adéquat, sans tendance à l'acidification ou à l'alcalinisation, ce qui est essentiel pour préserver la structure des sols et la disponibilité des nutriments pour les plantes.

2.1.3. La conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique (CE), indicateur clé de la salinité globale de l'eau, montre des valeurs relativement élevées, allant de 1479 µS/cm (P3) à 1767 µS/cm (P1). Bien que toutes les valeurs restent inférieures à la limite de 2000 µS/cm fixée par l'OMS pour les rejets et très en deçà du seuil critique de 3000 µS/cm pour l'irrigation, elles traduisent une charge saline non négligeable. On note une baisse de la CE après traitement (P2 : 1581 µS/cm), signe d'une certaine efficacité de la station d'épuration. Toutefois, les niveaux mesurés en aval (P3 et P4) révèlent une persistance du signal salin, traduisant une influence durable du rejet dans l'oued Saf-Saf. Cette situation pourrait, à terme, entraîner une salinisation progressive des sols irrigués, notamment en cas d'utilisation répétée sans alternance avec des eaux de meilleure qualité.

2.1.4. Les solides dissous totaux (TDS)

Les solides dissous totaux (TDS) présentent des valeurs comprises entre 991 et 1187 mg/L. Bien que ces concentrations soient inférieures aux seuils OMS pour les rejets (1500 mg/L) et aux normes d'irrigation de la FAO (2000 mg/L), elles dépassent les 1000 mg/L dans la majorité des cas. Ce niveau modérément élevé peut engendrer une accumulation de sels dans les sols, surtout en présence de sols argileux ou peu perméables, ce qui affecterait la productivité des cultures à moyen ou long terme.

2.1.5. La salinité

En ce qui concerne la salinité, les valeurs varient entre 739 et 891 mg/L. Elles sont toutes inférieures au seuil critique de 1000 mg/L, mais restent relativement élevées pour une utilisation en irrigation. Une telle concentration en sels dissous souligne un risque de salinisation des terres agricoles si l'eau est utilisée de manière régulière sans pratiques d'atténuation telles que le drainage ou l'alternance avec des eaux douces.

2.1.6. Le potentiel d'oxydoréduction (ORP)

Le potentiel d'oxydoréduction (ORP) reflète l'état redox des eaux. À P1, l'ORP est négatif (-253 mV), indiquant un milieu réducteur typique des eaux fortement chargées en matière organique, caractéristique d'une mauvaise qualité initiale. Après traitement, une nette amélioration est observée : l'ORP passe à +95 mV à P2, puis à +166 mV et +218 mV aux points P3 et P4. Ces valeurs positives traduisent une meilleure oxygénation, favorable aux processus de dégradation biologique. Selon l'OMS, un ORP supérieur à +100 mV est souhaitable pour assurer une désinfection efficace, ce qui n'est pleinement atteint qu'aux points situés dans l'oued Saf-Saf, en aval du rejet.

En conclusion, l'ensemble des paramètres physico-chimiques mesurés sur le terrain indique que les eaux traitées respectent globalement les normes de rejet et les seuils d'acceptabilité pour l'irrigation. Toutefois, certains indicateurs, comme la conductivité électrique, la salinité et les TDS, révèlent une charge saline modérée susceptible d'affecter la qualité des sols à long terme. Une surveillance régulière ainsi que l'adoption de bonnes pratiques agricoles sont donc nécessaires pour garantir une réutilisation durable de ces eaux dans l'irrigation.

2.2. Analyse des paramètres bactériologiques des eaux usées et des eaux de surface

L'analyse bactériologique constitue une étape essentielle dans l'évaluation de la qualité des eaux usées, qu'elles soient brutes ou traitées. Elle permet de détecter la présence de micro-organismes pathogènes susceptibles de représenter un risque pour la santé publique et l'environnement, notamment dans le cas d'une réutilisation potentielle à des fins agricoles. Ce type d'analyse est également un indicateur fiable de l'efficacité des procédés de traitement mis en œuvre dans une station d'épuration.

Les eaux traitées de la STEP de Hamadi Krouma sont actuellement destinées au rejet dans le milieu récepteur. Toutefois, des projets sont envisagés à moyen terme pour leur réutilisation dans l'irrigation du périmètre agricole de la plaine d'El Hadaeik. Dans cette perspective, la maîtrise de la qualité bactériologique constitue un enjeu prioritaire.

Les résultats détaillés de ces analyses sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau IV. 3. Analyses bactériologiques et normes de rejets et d'irrigation (Mars 2025).

Paramètre Points de prélèvement	Coliformes totaux (UFC/100 ml)	E. coli (UFC/100 ml)	Streptocoques (UFC/100 ml)	Clostridium (Spores/100 ml)
P1 (Eaux brutes)	$1,1 \times 10^6$	$1,50 \times 10^6$	$1,90 \times 10^6$	$1,40 \times 10^4$
P2 (Eaux traitées)	$1,52 \times 10^5$	$1,85 \times 10^5$	$4,00 \times 10^5$	$5,00 \times 10^3$
P3 (Amont Oued Saf-Saf)	$1,89 \times 10^5$	$1,67 \times 10^5$	$5,40 \times 10^5$	$1,30 \times 10^4$
P4 (Aval Oued Saf-Saf)	$1,63 \times 10^6$	$1,70 \times 10^6$	$1,50 \times 10^6$	$2,40 \times 10^4$
Normes de rejets (OMS)	$\leq 10^3 - 10^4$	$\leq 10^3$	$\leq 10^2 - 10^3$	$\leq 10^2$
Normes d'irrigation (OMS/FAO)	≤ 1000	$\leq 100 - 1000$	≤ 100	$\leq 10 - 100$

2.2.1. Les Coliformes totaux

Les coliformes totaux sont des indicateurs de contamination générale, d'origine fécale ou environnementale. Ils ne sont pas toujours pathogènes mais révèlent une présence possible d'autres agents pathogènes.

Les analyses bactériologiques des coliformes totaux montrent que l'eau brute (point P1) contient une charge microbienne très élevée, atteignant $1,1 \times 10^6$ UFC/100 ml. Après traitement au sein de la station d'épuration (point P2), cette concentration diminue pour atteindre $1,52 \times 10^5$ UFC/100 ml, soit une réduction d'environ un facteur 7,2. Toutefois, cette diminution reste insuffisante au regard des normes sanitaires. De plus, l'eau prélevée en amont de l'oued (P3) présente déjà une pollution non négligeable avec $1,89 \times 10^5$ UFC/100 ml, ce qui témoigne d'une contamination antérieure indépendante de la STEP. En aval (P4),

la concentration atteint un pic alarmant de $1,63 \times 10^6$ UFC/100 ml, dépassant même celle mesurée dans l'eau brute. Cette augmentation met en évidence un impact négatif direct du rejet des eaux usées sur le milieu récepteur.

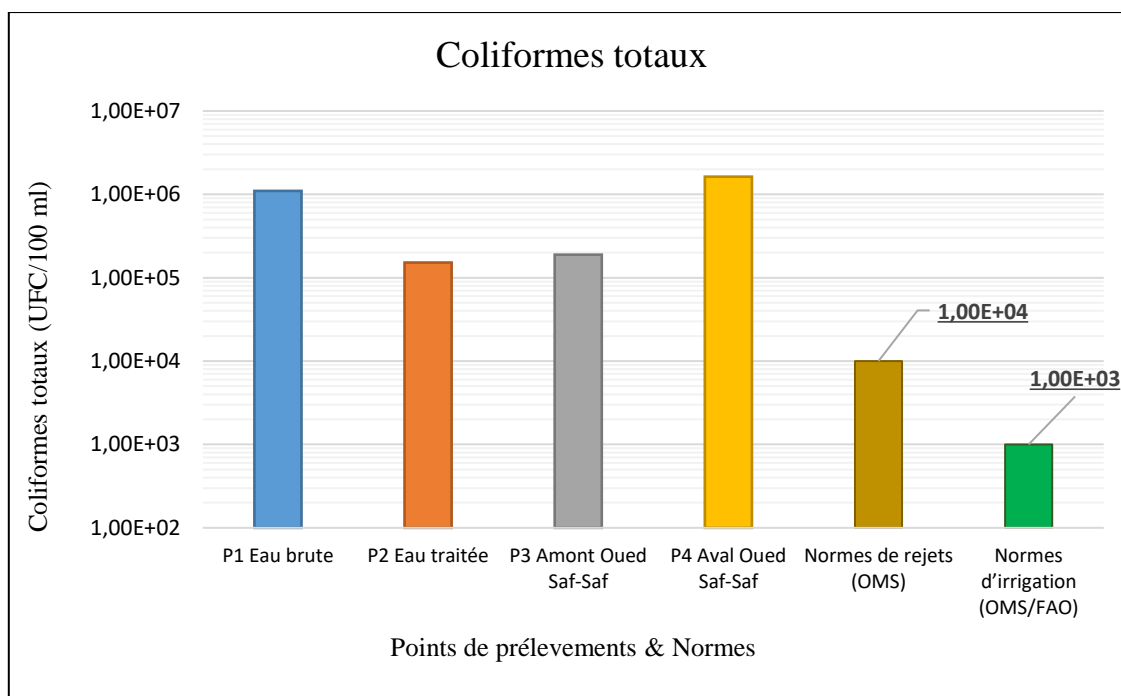


Figure IV.6. Comparaison des niveaux de contamination en coliformes totaux aux quatre sites de prélèvement par rapport aux normes en vigueur (mars 2025).

Sur le plan technique, le traitement mis en œuvre (probablement primaire et secondaire) ne permet pas de respecter les normes de rejet en vigueur, qui recommandent des concentrations inférieures à 10^3 à 10^4 UFC/100 ml. La charge bactérienne mesurée après traitement excède les seuils fixés pour la réutilisation en irrigation de plus de 1500 fois, ce qui rend l'eau impropre à tout usage agricole sans désinfection supplémentaire. L'augmentation de la charge bactérienne en aval de l'oued est particulièrement préoccupante. Elle révèle non seulement un échec du processus de dilution naturel, mais également une contamination persistante du cours d'eau, susceptible d'avoir des répercussions graves sur l'environnement. Cette situation menace directement la faune aquatique, altère la qualité des sols et constitue un risque majeur pour la santé publique, notamment en cas d'infiltration et de contamination des nappes phréatiques.

2.2.2. L'Escherichia coli

L'Escherichia coli est un indicateur spécifique de pollution fécale récente, elles peuvent provoquer des infections graves (diarrhées sanglantes, insuffisance rénale...).

Les résultats obtenus montrent une concentration très élevée d'E. coli dans l'eau brute (P1), atteignant $1,5 \times 10^6$ UFC/100 ml, ce qui témoigne d'une forte pollution d'origine fécale. Après traitement (P2), cette concentration est réduite à $1,85 \times 10^5$ UFC/100 ml. Bien qu'il y ait une baisse notable, celle-ci reste modeste et insuffisante au regard des exigences sanitaires. Les prélèvements effectués en amont de l'oued (P3) révèlent une pollution persistante avec $1,67 \times 10^5$ UFC/100 ml, tandis qu'en aval (P4), la concentration repart à la hausse pour atteindre $1,70 \times 10^6$ UFC/100 ml, soit une augmentation significative par rapport à l'amont. Cela indique un impact net du rejet des eaux traitées sur la qualité du milieu aquatique récepteur.

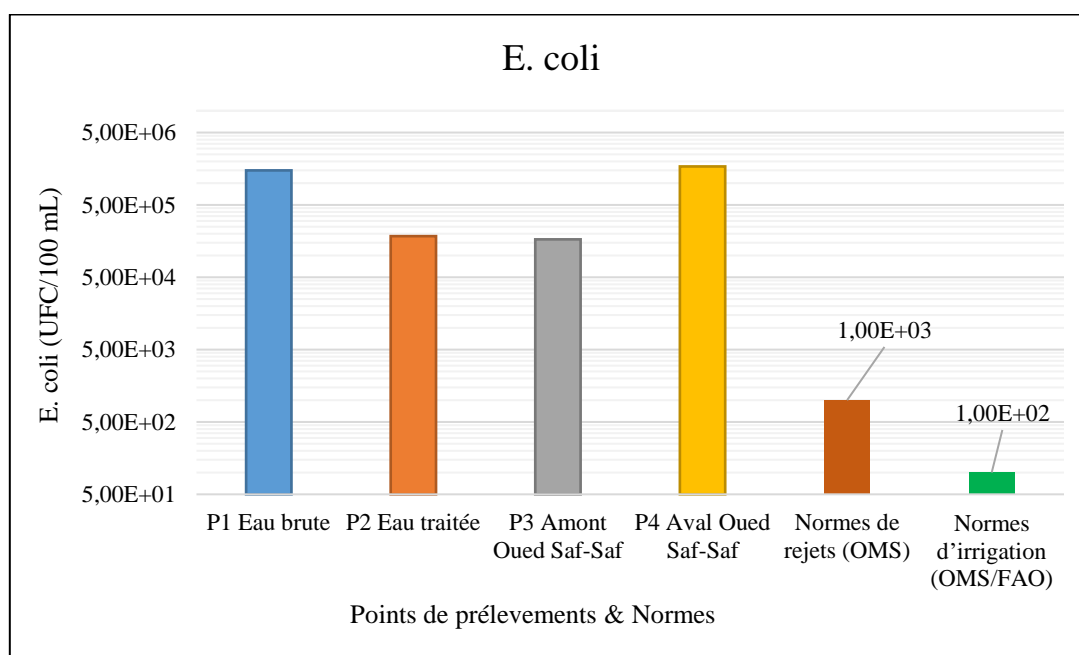


Figure IV.7. Comparaison des niveaux de contamination en E-coli aux quatre sites de prélèvement par rapport aux normes en vigueur (mars 2025).

D'un point de vue technique et sanitaire, l'efficacité du traitement appliqué dans la station d'épuration de Hamadi Krouma s'avère nettement insuffisante pour abaisser la concentration en *E. coli* en dessous des seuils critiques. Les niveaux enregistrés après traitement dépassent d'environ 185 fois les normes de rejet fixées par l'OMS ($\leq 10^3$ UFC/100 ml), et jusqu'à 1850 fois les limites recommandées pour l'irrigation agricole selon l'OMS/FAO (≤ 100 – 1000 UFC/100 ml). Ce niveau extrêmement élevé révèle une contamination fécale massive, source de risques graves pour la santé publique. Les populations rurales vivant en aval, notamment les agriculteurs utilisant ces eaux pour irriguer leurs cultures, sont directement exposées. Il existe un danger réel de contamination des produits agricoles, augmentant le risque d'intoxications alimentaires. Les enfants et les personnes immunodéprimées, particulièrement vulnérables, sont les plus à risque.

Face à cette situation alarmante, il devient indispensable de renforcer le traitement tertiaire des eaux usées, en intégrant notamment des procédés de désinfection plus performants comme les rayons ultraviolets (UV) ou l'ozonation, afin de garantir une qualité bactériologique compatible avec une éventuelle réutilisation agricole.

2.2.3. Les Streptocoques fécaux (Entérocoques)

Ils sont plus résistants que *E. coli* dans l'environnement, et leur présence atteste souvent d'une pollution fécale persistante et ancienne. Ce sont aussi des pathogènes opportunistes.

L'analyse des concentrations en streptocoques fécaux révèle des niveaux extrêmement élevés tout au long du processus. L'eau brute (P1) affiche une valeur de $1,9 \times 10^6$ UFC/100 ml. Après traitement par la station d'épuration de Hamadi Krouma (P2), une réduction est observée avec une concentration descendue à 4×10^5 UFC/100 ml. Toutefois, cette diminution reste insuffisante au regard des normes sanitaires. En amont de l'oued (P3), la charge bactérienne reste importante, atteignant $5,4 \times 10^5$ UFC/100 ml, ce qui révèle une contamination existante, probablement liée à d'autres sources de pollution. En aval (P4), après le rejet des eaux traitées, la concentration remonte à $1,5 \times 10^6$ UFC/100 ml, ce qui démontre une aggravation nette de la pollution microbiologique du milieu récepteur.

Sur le plan de l'interprétation, bien que le traitement ait permis de réduire la charge bactérienne, les concentrations demeurent alarmantes. Les niveaux mesurés sont 4000 à 15 000 fois supérieurs aux normes recommandées par l'OMS et la FAO pour une réutilisation en irrigation (≤ 100 UFC/100 ml). La forte présence de streptocoques fécaux en amont (P3)

indique une pollution chronique antérieure, indépendante des rejets de la STEP, et témoigne d'une dégradation générale du bassin versant. Cependant, l'élévation marquée des concentrations en aval (P4) confirme que les rejets de la STEP aggravent fortement la situation, rendant le processus naturel d'auto-épuration du cours d'eau manifestement inefficace.

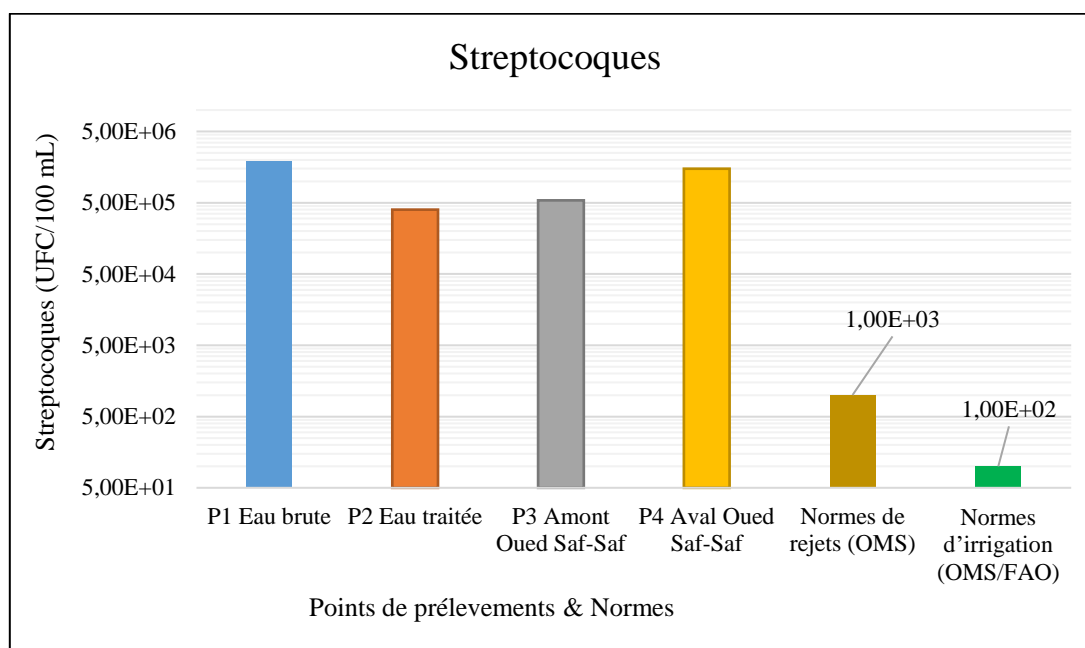


Figure IV.8. Comparaison des niveaux de contamination en Streptocoques aux quatre sites de prélèvement par rapport aux normes en vigueur (mars 2025).

Sur le plan sanitaire, cette situation représente un danger notable. Les streptocoques fécaux sont des indicateurs de contamination fécale récente et peuvent être à l'origine de pathologies graves telles que des infections urinaires, des endocardites ou des septicémies, particulièrement chez les personnes vulnérables comme les enfants, les personnes âgées ou immunodéprimées. Ces résultats plaident pour une révision urgente du dispositif de traitement en vigueur, ainsi qu'un suivi rigoureux de la qualité des rejets, afin de limiter les risques sanitaires et de préserver la qualité écologique du milieu naturel.

2.2.4. Clostridium perfringens (formes sporulées)

Clostridium perfringens sont des bactérie anaérobie stricte, formant des spores très résistantes (au chlore, UV, chaleur), indicateur de contamination fécale ancienne. Peut provoquer des gastro-entérites, infections graves chez l'immunodéprimé.

Les résultats relatifs aux spores de *Clostridium* révèlent une persistance préoccupante de ces micro-organismes tout au long de la filière de traitement et dans l'environnement récepteur. L'eau brute (P1) contient $1,4 \times 10^4$ spores/100 ml, tandis qu'après traitement (P2), la concentration ne baisse que modestement à 5×10^3 spores/100 ml. En amont de l'oued (P3), la valeur mesurée est de $1,3 \times 10^4$ spores/100 ml, indiquant une contamination déjà présente dans le milieu naturel. Toutefois, la situation se dégrade en aval (P4), où la concentration atteint $2,4 \times 10^4$ spores/100 ml, soit une valeur supérieure à celle observée dans les eaux usées brutes.

Cette persistance s'explique par la nature très résistante des spores de *Clostridium*, connues pour leur capacité à survivre aux conditions défavorables, y compris aux traitements biologiques conventionnels. Même après épuration, les concentrations restent très élevées – près de 50 fois supérieures à la limite fixée par les normes de l'OMS pour la réutilisation agricole (≤ 100 spores/100 ml). Ce constat met en évidence non seulement l'inefficacité des procédés actuellement en place à la STEP de Hamadi Krouma pour éliminer ce type de contaminants, mais aussi leur impact direct sur la qualité microbiologique de l'oued Saf-Saf.

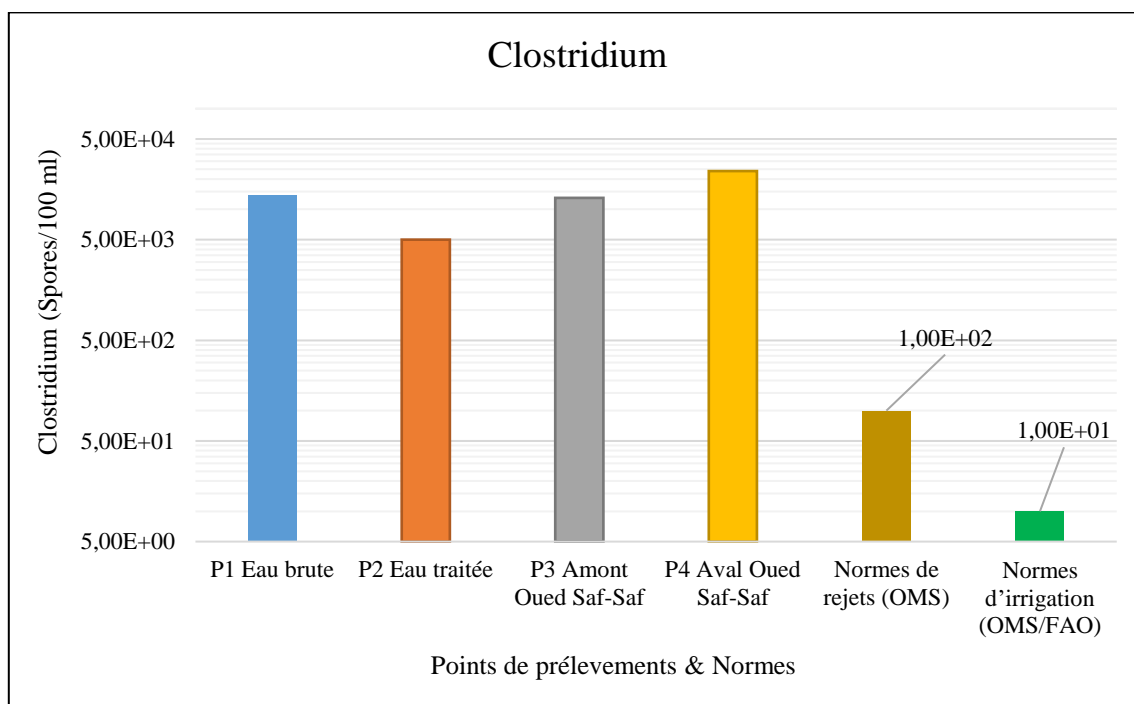


Figure IV.9. Comparaison des niveaux de contamination en Clostridium aux quatre sites de prélèvement par rapport aux normes en vigueur (mars 2025).

D'un point de vue environnemental et sanitaire, cette situation représente un risque significatif. Les spores peuvent persister dans les sols, résister à la dessiccation et contaminer les cultures irriguées, menaçant ainsi la chaîne alimentaire. Leur présence en forte quantité dans les eaux de surface constitue une source potentielle d'infections entériques, notamment pour les populations en contact avec l'eau ou les produits agricoles issus de parcelles irriguées par ces effluents.

En conclusion, face à la résistance intrinsèque des spores de Clostridium, des traitements plus poussés et ciblés sont nécessaires. Des procédés de désinfection avancée, tels que l'ozonation, les rayons UV haute intensité ou la filtration membranaire (ultrafiltration), devraient être envisagés pour garantir une élimination efficace et sécuriser toute forme de réutilisation agricole future.

L'analyse bactériologique des eaux usées réalisée à la station d'épuration de Hamadi Krouma (Skikda) visait à évaluer la performance du traitement en place et son impact sur le milieu récepteur, l'oued Saf-Saf. Quatre points de prélèvement ont été étudiés : eau brute (P1), eau

traitée (P2), amont de l'oued (P3), et aval (P4). Les paramètres analysés incluent les coliformes totaux, *Escherichia coli*, les streptocoques fécaux et *Clostridium perfringens*.

Conclusion

Les résultats ont montré une forte contamination initiale des eaux usées brutes, et bien que le traitement en STEP permette une réduction partielle des charges bactériennes, les concentrations mesurées restent très au-dessus des seuils recommandés par l'OMS et la FAO, aussi bien pour les rejets que pour la réutilisation en irrigation. De plus, une dégradation marquée de la qualité bactériologique du cours d'eau a été observée en aval des rejets de la STEP, soulignant un impact négatif significatif sur le milieu récepteur.

L'évaluation bactériologique met en évidence les limites du système de traitement actuel de la station de Hamadi Krouma, incapable de réduire efficacement les charges microbiologiques à des niveaux conformes aux normes internationales. La persistance des coliformes, d'*E. coli*, de streptocoques fécaux et de spores de *Clostridium* dans les eaux traitées, ainsi que leur recrudescence en aval, posent de sérieux risques sanitaires et environnementaux, notamment dans la perspective d'une réutilisation en irrigation agricole. Cette situation impose la mise en place urgente de traitements tertiaires performants et un renforcement du suivi de la qualité des rejets, pour protéger à la fois la santé publique et l'équilibre écologique de l'oued Saf-Saf.

3. Situation actuelle de l'approvisionnement en eau dans le périmètre irrigué du Saf-Saf

Les eaux usées traitées représentent une alternative prometteuse pour renforcer les ressources en eau dédiées à l'irrigation agricole. Dans ce cadre, l'objectif est d'étudier la faisabilité de la réutilisation des eaux épurées issues de la station d'épuration de Hamadi Krouma, pour irriguer un périmètre agricole (secteur I du périmètre irrigué).

Parmi les périmètres existants, celui du Saf-Saf se distingue par sa proximité géographique immédiate avec la STEP, ce qui en fait un candidat idéal pour une expérimentation ou une mise en œuvre à plus grande échelle.

3.1. Présentation du périmètre du Saf-Saf

3.1.1. Situation géographique

Le périmètre du Saf-Saf est situé dans la wilaya de Skikda, il couvre les communes de Skikda, Hammadi Krouma, Ramdane Djamel, Salah Bouchaour, Emdjez-Edchiche et EL-Harrouch, sur une superficie totale de 5654 ha.

L'étude agro-pédologique du périmètre Saf-Saf est réalisée par l'entreprise espagnole INTECSA en 1976. Ce périmètre a été réalisé par la même entreprise en Novembre 1981. (M. Otmane, A. Bouhedja, L. Saad Djaballah, 2005).

3.1.2. Répartition du périmètre

Le périmètre du Saf-Saf est réparti en quatre (04) secteurs :

Tableau IV.4. Répartition du périmètre par localisation.

Secteurs	Superficie (ha)		Localisation	Mise en service (Exploitation)
	Equipé	Irrigable		
Secteur I	1720	1600	R. Djamel / Skikda	/
Secteur II	1591	1428	Salah Bouchaour	2004
Secteur III	1023	832	El Harrouch	1996
Secteur IV	1320	1240	Emdjez Edchiche	1991
Total	5654	5100		

(Bilan Annuel ONID, 2023)

3.2. Ressources en eau du périmètre

L'alimentation en eau d'irrigation du périmètre est assurée à partir des barrages de Guénitra et de Zardezas dont les besoins en eau sont mentionnés dans le tableau suivant :

Tableau IV.5. Ressources et besoin en eau du périmètre

Barrage	Irrigation (Hm ³)				Total (Hm ³)
	Secteur I	Secteur II	Secteur III	Secteur IV	
Guénitra	/	7,50	/	8,15	15,65
Zardezas	10,50	2,10	5,40	/	18

Source : (Bilan Annuel ONID, 2023)

3.3. Architecture du système d'irrigation au niveau du périmètre

L'eau des deux barrages est refoulée à partir des stations de pompage vers les réservoirs de stockage au niveau de chaque secteur du périmètre puis la distribution par canalisation vers les zones à irriguer dont la gestion est assurée par l'ADE (Algérienne Des Eaux) et l'ONID.

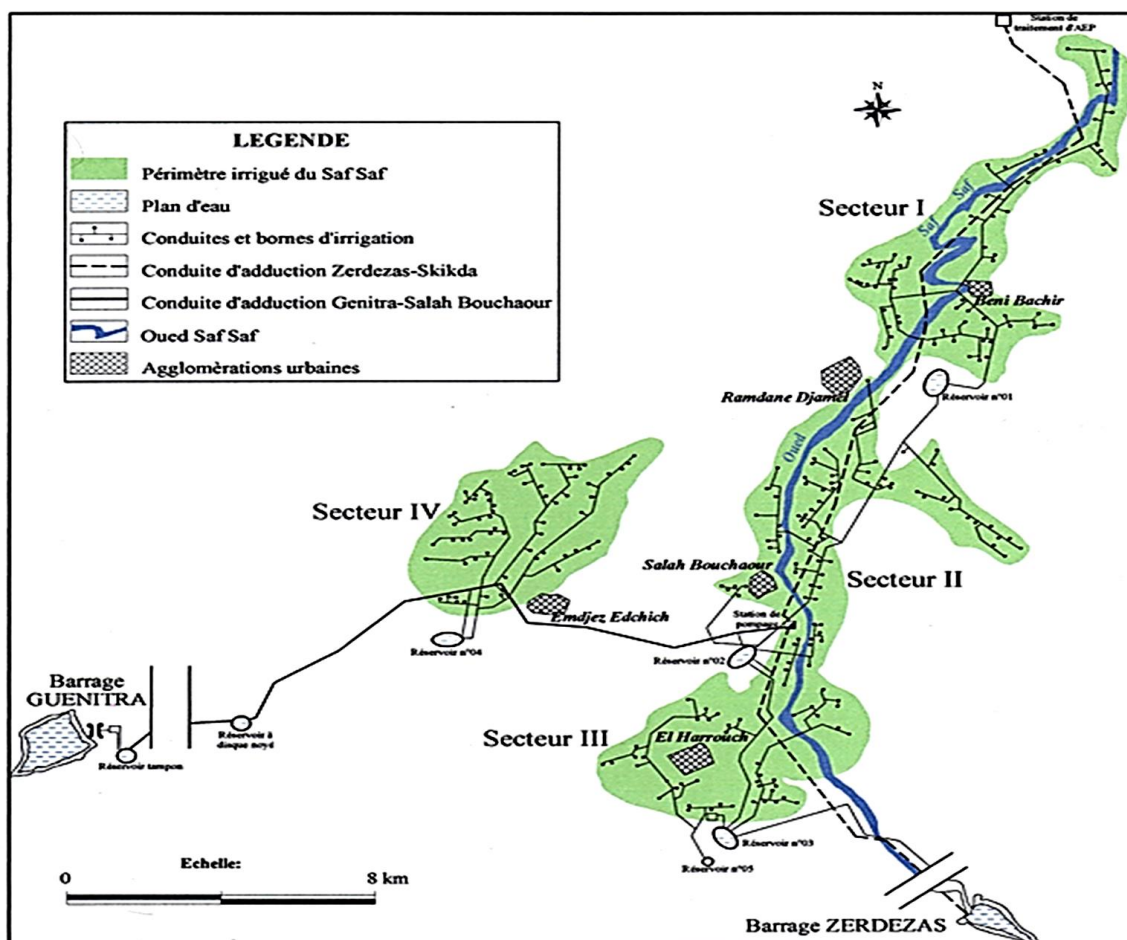


Figure IV.10. Architecture du périmètre Saf-Saf.

3.4. Bilan des irrigations et bilan agricole

L'irrigation et l'agriculture sont des piliers essentiels pour le développement économique et la sécurité alimentaire de toute région. Dans le cadre du périmètre du Saf-Saf, une évaluation approfondie des bilans d'irrigation et agricole permet de mieux comprendre les défis et les opportunités liés à la gestion des ressources en eau et à la production agricole.

Tableau IV.6. Bilan d'irrigation dans le périmètre du Saf-Saf (2016-2023).

Année	Périmètre	Superficie irriguée (ha)	Volume distribué (Hm ³)	Nombre des irrigants
2016	Saf-Saf	1184.13	6.693	/
2017		386.13	3.238	335
2018		539.99	3.706	432
2019		388.85	1.341	80
2020		293.50	0.354	153
2021		323.94	2.443	331
2022		721.11	4.976	/
2023		558.95	3.609	506

(Bilan Annuel ONID, 2023)

3.4.1. Evolution Bilan des superficies irriguées du périmètre Saf-Saf

La surface irriguée dans le périmètre du Saf-Saf a connu une baisse remarquable au cours de la période étudiée, passant de 1184 ha en 2016 à 559 ha en 2023. Cela représente une diminution de 52,5 % en sept ans.

La baisse la plus importante a été observée entre 2020 et 2021, avec une chute de 26,5 %.

L'année 2023 a été marquée par la surface irriguée la plus basse de la période, avec seulement 559 ha.

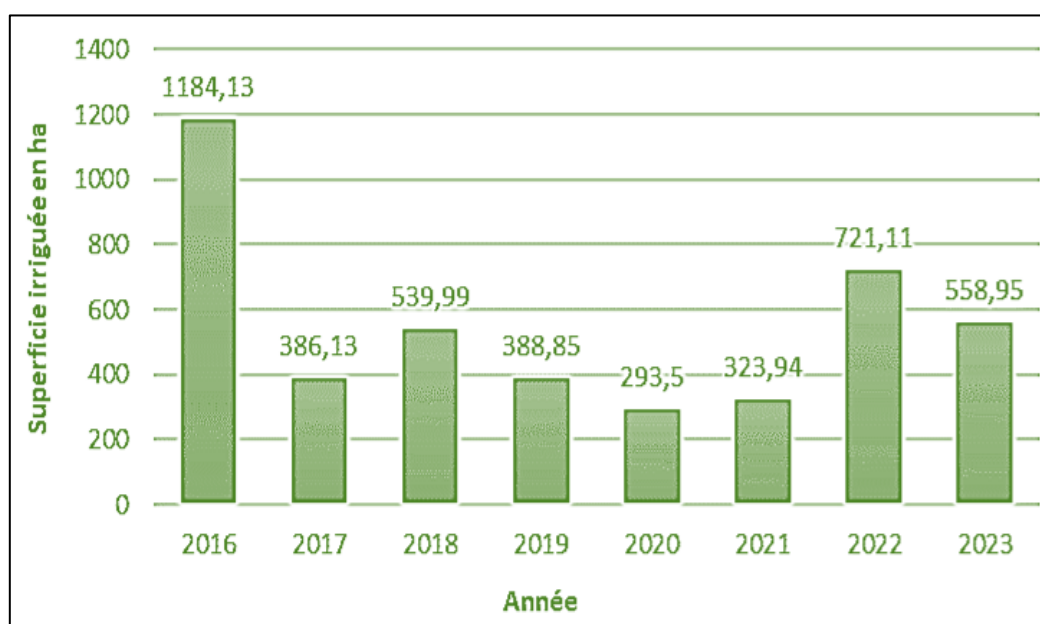


Figure IV.11. Bilan des superficies irriguées du périmètre Saf-Saf. (ONID, 2023).

Plusieurs facteurs peuvent expliquer la baisse de la surface irriguée dans le périmètre du Saf-Saf :

- *Manque d'eau* : La région du Saf-Saf est confrontée à une sécheresse persistante depuis plusieurs années. Cela a entraîné une diminution des ressources en eau disponibles pour l'irrigation, ce qui a contraint les agriculteurs à réduire leurs surfaces irriguées.
- *Changement climatique* : L'augmentation des températures et la diminution des précipitations, notamment pendant les périodes estivales, ont aggravé la situation de sécheresse dans la région.
- *Mauvaises pratiques d'irrigation* : L'utilisation de techniques d'irrigation inefficaces a contribué au gaspillage d'eau et à la dégradation des sols.

La baisse de la surface irriguée dans le périmètre du Saf-Saf est un problème complexe qui menace la sécurité alimentaire et le développement durable de la région. Il est important de prendre des mesures urgentes pour remédier à cette situation en mettant en place des stratégies de gestion de l'eau durables et en encourageant l'adoption de pratiques agricoles respectueuses de l'environnement.

3.4.2. Bilan des superficies irriguées dans le périmètre du Saf-Saf par secteur (2023)

Le graphique représentant le bilan des superficies irriguées dans le périmètre du Saf-Saf par secteur du 2016 au 2023. On constate que :

- La surface irriguée totale dans le périmètre du Saf-Saf en 2023 est de 559 ha.
- Le secteur 1 est non opérationnel par manque d'eau.
- Les secteurs 2, 3 et 4 ont des surfaces irriguées respectives de 200 ha, 180 ha et 179 ha.
- Le secteur 2 est le secteur irrigué le plus important, suivi des secteurs 3 et 4.

La situation du secteur 1 est préoccupante car elle met en évidence les conséquences graves du manque d'eau dans le périmètre du Saf-Saf. La non-exploitation de ce secteur signifie une perte de production agricole et une source de revenus potentiels pour les agriculteurs locaux.

Les secteurs 2, 3 et 4, bien que fonctionnels, ont également connu une baisse de leurs surfaces irriguées par rapport aux années précédentes. Cela indique que la pénurie d'eau affecte l'ensemble du périmètre du Saf-Saf et que des mesures doivent être prises pour gérer efficacement les ressources en eau disponibles.

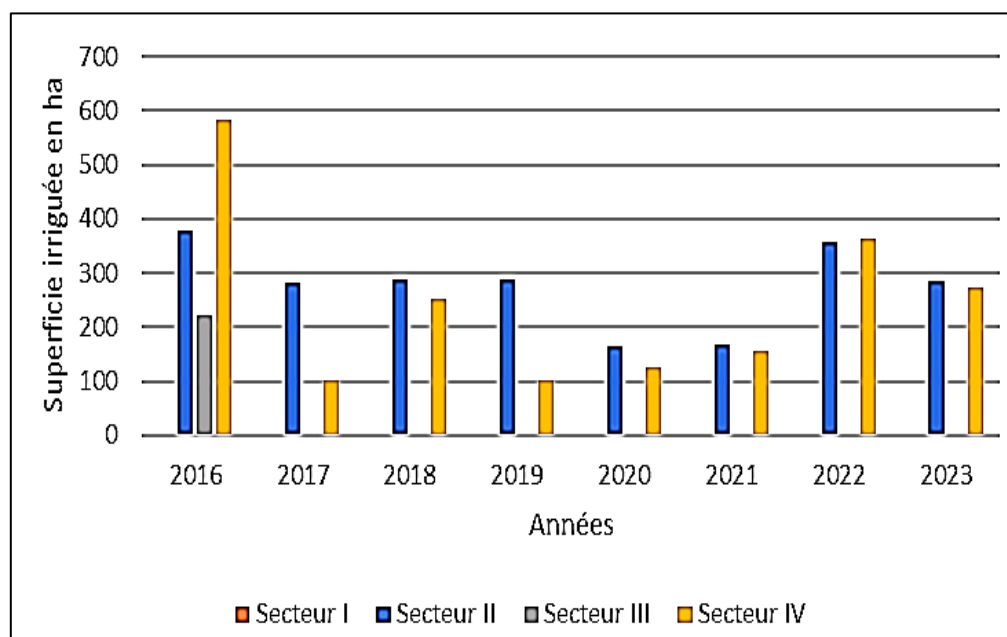


Figure IV.12. Bilan des superficies irriguées par secteur (ONID, 2023).

Le secteur 1 pourrait ne pas être exploité en raison de plusieurs facteurs, notamment le manque d'infrastructures d'irrigation adéquates comme les canaux et les systèmes de pompage et la priorité donnée à d'autres secteurs pour l'allocation des ressources en eau. Pour remédier à cette situation, il est recommandé de mener une étude approfondie pour évaluer les besoins en eau de chaque secteur, d'investir dans l'amélioration des infrastructures d'irrigation, de mettre en place une gestion équitable de l'eau, de promouvoir des pratiques agricoles durables comme l'irrigation au goutte-à-goutte et la rotation des cultures.

Le recours aux ressources en eau non conventionnelles comme la réutilisation des eaux usées de la STEP de Skikda, peut aussi contribuer à l'approvisionnement de ce secteur.

En prenant ces mesures concrètes, il est possible de relancer l'activité agricole dans le secteur 1, contribuant ainsi à la sécurité alimentaire dans la région.

3.5. Volume d'eau distribué dans le périmètre irrigué du Saf-Saf (2016-2023)

Le graphique présenté montre l'évolution du volume d'eau distribué dans le périmètre irrigué du Saf-Saf entre 2016 et 2023.

Le volume d'eau distribué dans le périmètre du Saf-Saf a connu une baisse remarquable au cours de la période étudiée, passant de 6,693 Hm³ en 2016 à 3,609 Hm³ en 2023.

La baisse la plus importante a été observée entre 2019 et 2020, avec 0,354 Hm³ en 2020.

La baisse du volume d'eau distribué dans le périmètre du Saf-Saf a des conséquences importantes sur l'agriculture et les populations locales.

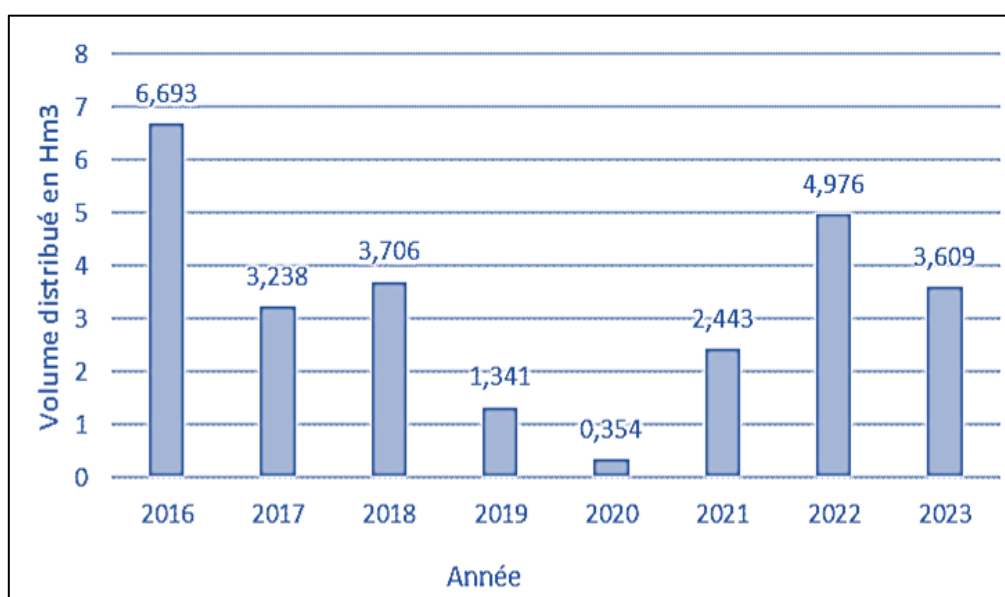


Figure IV.13. Bilan des volumes d'eau distribués sur périmètre Saf-Saf

4. Contraintes de gestion du périmètre et opportunités de valorisation des eaux traitées

La gestion du périmètre irrigué du Saf-Saf fait face à de nombreuses contraintes qui limitent son efficacité et son développement. Ces contraintes, qui varient selon les secteurs, concernent principalement la disponibilité en eau, l'état des infrastructures et certaines pratiques agricoles peu adaptées. Une analyse approfondie de ces obstacles est essentielle pour mettre en place des solutions durables et améliorer la valorisation des ressources existantes.

Le secteur I (Skikda - Hammadi Krouma - Ramdane Djamel) est à l'arrêt depuis 2009, principalement en raison du tarissement de l'approvisionnement en eau du barrage de Zardezas. À cela s'ajoute la complexité de la gestion de la conduite mixte utilisée à la fois pour l'alimentation en eau potable (AEP) et pour l'irrigation, placée sous la responsabilité de l'ADE (Algérienne des Eaux), ce qui complique l'allocation efficace de l'eau.

Dans ce contexte, la proximité de la station d'épuration (STEP) de Hamadi Krouma représente une opportunité stratégique. La réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation pourrait constituer une solution durable et immédiatement mobilisable pour

relancer ce secteur agricole à fort potentiel. Cette approche permettrait non seulement de pallier le déficit en eau, mais aussi de sécuriser les besoins en irrigation tout en préservant les ressources conventionnelles.

Par ailleurs, l'ensemble du périmètre souffre de problèmes structurels généralisés : un réseau d'irrigation vétuste nécessitant une réhabilitation urgente, des pistes agricoles fortement dégradées entravant l'accès aux parcelles, ainsi qu'une réduction des superficies agricoles disponibles à cause des travaux de l'autoroute Est-Ouest et de la pénétrante. De plus, les constructions anarchiques à proximité des infrastructures d'irrigation menacent leur bon fonctionnement.

Face à ces défis, une approche intégrée est indispensable. Elle doit combiner la réhabilitation des infrastructures, une meilleure gouvernance de l'eau, la promotion de pratiques agricoles plus durables et, surtout, la mise en œuvre d'un programme structuré de réutilisation des eaux usées traitées. Cette démarche permettra de redynamiser le périmètre irrigué du Saf-Saf, notamment le secteur I, et d'en faire un levier important pour le développement agricole régional.

5. Scénarios d'amélioration pour une meilleure qualité de traitement

La station d'épuration de Hamadi Krouma, bien qu'elle remplisse en partie sa mission de traitement des eaux usées urbaines, présente encore certaines limites quant à la qualité des eaux traitées, notamment en matière de charge bactérienne résiduelle, de salinité et de conductivité. Afin d'assurer une réutilisation durable de ces eaux dans le domaine agricole, il est crucial d'envisager des pistes d'amélioration ciblées et adaptées au contexte local. Deux axes majeurs sont proposés :

5.1. L'optimisation des processus de la STEP

Une première démarche consiste à améliorer le fonctionnement des infrastructures existantes, sans nécessairement procéder à des investissements lourds. Cela passe par :

- L'entretien régulier et rigoureux des installations, souvent négligé, notamment les bassins biologiques, les filtres et les équipements électromécaniques. Une maintenance préventive permet de préserver l'efficacité des traitements et d'éviter les dysfonctionnements chroniques.

- Le renforcement du suivi analytique en introduisant des campagnes de mesure plus fréquentes et élargies à davantage de paramètres physico-chimiques et microbiologiques. Cela permettrait d'ajuster les doses de réactifs et le temps de séjour en fonction de la charge entrante.
- L'amélioration de l'aération dans les bassins biologiques, essentielle pour l'élimination efficace de la matière organique et l'amélioration du potentiel redox (ORP). Une oxygénation optimisée contribue également à réduire les pathogènes et à améliorer la qualité bactériologique de l'eau traitée.
- La mise en œuvre d'un traitement tertiaire simple, basé sur la décantation finale et la désinfection par chloration contrôlée ou par rayonnement UV, notamment en période estivale où l'eau est destinée à l'irrigation.

5.2. L'intégration de nouvelles technologies

Pour aller au-delà des améliorations classiques, l'introduction de technologies plus avancées peut offrir des résultats probants :

- Les membranes de microfiltration ou d'ultrafiltration permettent de retenir les pathogènes et les matières en suspension avec une très grande efficacité, rendant l'eau apte à un usage agricole sécurisé.
- Les systèmes de traitement à base de plantes (lagunage, filtres plantés de roseaux), bien adaptés au climat méditerranéen et peu coûteux, permettent une épuration naturelle complémentaire aux traitements classiques.
- La désinfection avancée (ozonation, UV, électrolyse) peut être envisagée pour réduire davantage la contamination bactérienne et virale, notamment en prévision d'une réutilisation pour des cultures maraîchères consommées crues.
- La digitalisation et l'automatisation via des capteurs intelligents et des systèmes de contrôle en temps réel peuvent améliorer la régulation des paramètres critiques du traitement et anticiper les anomalies.

Ces scénarios d'amélioration doivent être envisagés de manière progressive et adaptés aux capacités financières, techniques et institutionnelles locales, avec un accompagnement en formation du personnel et une sensibilisation des usagers.

6. Perspectives d'utilisation durable des eaux traitées pour l'irrigation

La réutilisation des eaux usées traitées en agriculture constitue une solution prometteuse dans un contexte de stress hydrique croissant, particulièrement dans la région de Skikda où les ressources en eau sont sous pression. Toutefois, cette démarche ne peut être durable que si elle est pensée de manière intégrée et encadrée, tant sur le plan technique qu'environnemental et socio-économique.

6.1. Intérêts agronomiques et environnementaux

L'eau traitée contient des éléments nutritifs (azote, phosphore, potassium) bénéfiques pour certaines cultures, ce qui peut réduire le recours aux engrais chimiques. Cependant, leur concentration doit être maîtrisée pour éviter les déséquilibres nutritifs ou la salinisation des sols. Une analyse systématique des sols du périmètre irrigable est donc nécessaire pour ajuster les apports et prévenir la dégradation de la structure du sol.

Par ailleurs, l'utilisation d'eaux usées traitées permettrait de préserver les ressources conventionnelles, en réservant les eaux de surface ou souterraines pour d'autres usages prioritaires (eau potable, industrie). Elle contribue également à réduire les rejets directs dans l'environnement, limitant la pollution des oueds et des zones humides.

6.2. Cadre institutionnel et acceptabilité sociale

Pour assurer la durabilité de cette démarche, il est essentiel de mettre en place un cadre réglementaire clair, inspiré des recommandations de la FAO, de l'OMS et des législations de pays méditerranéens ayant déjà intégré la réutilisation des eaux traitées dans leurs politiques agricoles.

L'acceptabilité par les agriculteurs est un enjeu clé. Des campagnes de sensibilisation, appuyées par des démonstrations de terrain et des aides à l'équipement (systèmes d'irrigation localisée, filtres, protections), doivent être menées pour instaurer la confiance et encourager l'usage de cette ressource alternative.

6.3. Stratégie de mise en œuvre

Il est recommandé d'adopter une approche par étapes :

- ✓ **Phase pilote** sur une petite parcelle du périmètre de Saf-Saf, avec un suivi rigoureux de la qualité des eaux, de la croissance des cultures, de la santé des sols et de l'impact sur les rendements.
- ✓ **Élargissement progressif** selon les résultats obtenus et l'engagement des acteurs.
- ✓ **Intégration dans les plans de gestion intégrée des ressources en eau** de la Wilaya, en synergie avec les services de l'agriculture, de l'hydraulique et de l'environnement.

L'amélioration des performances de la STEP de Hamadi Krouma et la réutilisation contrôlée de ses eaux traitées en irrigation offrent une opportunité stratégique pour renforcer la sécurité hydrique agricole dans la région de Skikda. Cela nécessite néanmoins une volonté institutionnelle forte, un encadrement technique approprié et une sensibilisation des usagers. Ces deux volets – amélioration du traitement et valorisation agricole – doivent avancer conjointement pour assurer la durabilité, l'efficacité et l'acceptabilité de cette solution innovante et adaptée au contexte algérien.



Figure IV. 14. Photo aérienne de STEP de Hamadi Krouma et les emplacements proposés pour deux dispositifs pilotes.

La photo aérienne illustre la situation géographique stratégique de la station d'épuration (STEP) de Hamadi Krouma, ainsi que les emplacements proposés pour deux dispositifs pilotes dans le cadre d'une stratégie de mise en œuvre de la réutilisation des eaux usées traitées au profit du secteur I (Skikda – Hammadi Krouma – Ramdane Djamel), actuellement à l'arrêt depuis 2009 en raison du manque d'eau.

- **STEP Hamadi Krouma** constitue la source principale d'eau traitée, située à proximité immédiate de surfaces agricoles, ce qui représente un avantage logistique et économique majeur pour une réutilisation locale.

- **Pilote d'irrigation 1 (Bacs)** : Ce dispositif expérimental, à implanter à l'intérieur même de la STEP, permettrait de tester la qualité des eaux épurées et leur effet sur des cultures dans des conditions contrôlées. Il représente une première phase d'évaluation technique et agronomique.

- **Pilote de traitement** : Situé à la sortie des unités de traitement de la STEP, ce point de prélèvement permettrait d'acheminer les eaux traitées vers les dispositifs pilotes d'irrigation. Il servirait de jonction entre la production d'eau traitée et son usage agricole.

- **Pilote d'irrigation 2 (Parcelle agricole)** : Ce dispositif, à installer sur une parcelle agricole adjacente à la STEP, permettrait de tester l'irrigation réelle en conditions de terrain. Il servirait de démonstrateur pour une extension future à l'ensemble du secteur I.

Cette configuration offre une solution rationnelle et durable au redémarrage du secteur I du périmètre irrigué, en valorisant une ressource disponible mais peu exploitée : les eaux traitées de la STEP. Elle permettrait de :

- Réduire la dépendance au barrage de Zardezas, en déficit depuis plusieurs années,
- Raccourcir les distances de transport d'eau,
- Créer un modèle repliable à d'autres zones agricoles proches de STEP,
- Favoriser une gestion intégrée et circulaire des ressources en eau.

Ce schéma s'inscrit pleinement dans une démarche de transition agro-environnementale, conciliant traitement des eaux usées et relance de l'irrigation.

Conclusion

L'analyse des paramètres physico-chimiques et bactériologiques des eaux usées traitées par la STEP de Hamadi Krouma montre globalement une performance satisfaisante du système d'épuration, bien que des limites subsistent pour certains paramètres. Les résultats obtenus en 2024 révèlent une nette amélioration de la qualité des eaux entre l'entrée et la sortie de la station, notamment en matière de réduction des matières en suspension (MES) et d'abattement partiel de la demande chimique en oxygène (DCO). Le pH et la conductivité restent globalement stables et conformes aux normes réglementaires, traduisant un traitement maîtrisé au plan chimique.

Sur le plan bactériologique, les résultats obtenus lors de la campagne de prélèvement de mars 2025 confirment une diminution significative de la charge microbienne à la sortie de la STEP, tout en mettant en évidence la nécessité de renforcer les étapes de désinfection pour garantir une réutilisation sécurisée en irrigation. De plus, la comparaison des prélèvements en

amont et en aval de l'oued Saf-Saf permet d'apprécier l'impact réel du rejet sur le milieu récepteur, soulignant l'intérêt d'un suivi environnemental régulier.

Les scénarios d'amélioration envisagés pour la STEP de Hamadi Krouma mettent en lumière la nécessité d'une double approche : d'une part, l'optimisation des processus existants (maintenance renforcée, amélioration de l'aération, suivi analytique élargi, introduction d'un traitement tertiaire) et, d'autre part, l'intégration progressive de technologies avancées (filtration membranaire, systèmes naturels, désinfection moderne, digitalisation). Ces efforts visent à garantir une qualité d'eau traitée conforme aux exigences de l'irrigation agricole.

Parallèlement, les perspectives de réutilisation durable dans le périmètre irrigué du secteur I offrent un potentiel réel pour répondre aux défis du stress hydrique local. L'approche proposée repose sur une mise en œuvre progressive et encadrée, débutant par des dispositifs pilotes (à l'intérieur et en périphérie de la STEP) et accompagnée d'un cadre réglementaire clair, d'un engagement institutionnel fort et d'une acceptabilité sociale construite. Ce modèle expérimental, basé sur une ressource disponible mais encore sous-exploitée, pourrait à terme contribuer à une relance durable de l'irrigation dans la région de Skikda.

Dans l'ensemble, la STEP de Hamadi Krouma constitue un outil efficace de dépollution, mais l'optimisation de certaines phases de traitement, en particulier le traitement tertiaire, apparaît indispensable pour répondre pleinement aux exigences de qualité sanitaire et environnementale. Ces constats justifient la mise en œuvre de recommandations techniques et organisationnelles en vue d'assurer la sécurité des usages agricoles de l'eau traitée et de contribuer durablement à la préservation des ressources hydriques locales.

Conclusion Générale & Recommandations

Conclusion générale et recommandations

La gestion durable des ressources en eau constitue aujourd'hui un enjeu majeur pour l'Algérie, confrontée à un stress hydrique croissant aggravé par la variabilité climatique, l'urbanisation rapide et l'augmentation des besoins, en particulier dans le secteur agricole. Dans ce contexte tendu, la réutilisation des eaux usées traitées s'impose non seulement comme une solution complémentaire pour sécuriser les besoins en irrigation, mais également comme un levier stratégique de transition vers une gestion circulaire de l'eau.

Le présent travail s'est inscrit dans cette optique en étudiant le potentiel de réutilisation des eaux traitées par la station d'épuration de Hamadi Krouma (Skikda), à travers une évaluation rigoureuse de leur qualité physico-chimique et bactériologique. L'analyse des résultats a permis de mettre en évidence une performance acceptable des traitements primaire et secondaire, avec des concentrations des principaux paramètres physico-chimiques généralement conformes aux normes en vigueur. Toutefois, les analyses microbiologiques ont révélé des dépassements significatifs en indicateurs de contamination fécale, tels que les coliformes fécaux et les streptocoques, traduisant des insuffisances dans l'étape de désinfection finale.

Ces constats soulignent que, malgré le potentiel de réutilisation, les eaux traitées dans leur état actuel ne répondent pas encore aux exigences sanitaires nécessaires pour une utilisation sûre en irrigation, en particulier pour les cultures maraîchères à consommation crue. Une approche prudente, intégrant des barrières de traitement supplémentaires et un cadre de surveillance rigoureux, s'impose donc avant toute valorisation agricole.

À la lumière de ces résultats, plusieurs recommandations stratégiques se dégagent :

1. Renforcement des procédés de traitement : L'ajout d'un traitement tertiaire efficace (rayonnement UV, chloration, ozonation) est indispensable pour assurer une élimination suffisante de la charge pathogène.
2. Révision et application du cadre réglementaire : Il est nécessaire de mettre à jour les textes relatifs à la réutilisation des eaux usées, en les harmonisant avec les standards internationaux et en définissant clairement les usages autorisés selon la qualité de l'eau.

3. Développement de la recherche appliquée : Des études complémentaires doivent être menées pour tester l'efficacité des procédés de désinfection dans des conditions locales, et évaluer les impacts à long terme de l'irrigation avec des eaux traitées sur les sols, les cultures et la santé publique.
4. Mise en place de systèmes de suivi et de contrôle : Un dispositif de surveillance continue de la qualité des eaux réutilisées, couplé à des protocoles d'alerte en cas de dépassements, est essentiel pour garantir la sécurité sanitaire.
5. Sensibilisation et formation des acteurs : La réussite de toute stratégie de réutilisation repose sur l'adhésion et la bonne compréhension des agriculteurs et gestionnaires. Il convient donc de renforcer les actions de formation et d'accompagnement technique.

En fin, ce travail met en évidence l'intérêt de valoriser les eaux usées traitées comme ressource alternative dans un contexte de pénurie hydrique, tout en soulignant les conditions strictes nécessaires à leur réutilisation sûre et durable. Il appelle à une vision intégrée, conjuguant innovation technologique, cadre institutionnel renforcé et engagement des parties prenantes pour faire de la réutilisation un véritable pilier de la résilience hydrique en Algérie.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

1. **Abbas K., Batallah K. (2018).** Suivi et simulation des performances épuratoires de la STEP de Skikda. Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar, Annaba. 89 p.
2. **Agence de protection de l'environnement des États-Unis (EPA) (2012).** Lignes directrices pour la réutilisation de l'eau (EPA/600/R-12/618). Office of Research and Development, Washington D.C.
3. **Angelakis et al. (2018).** Water reuse : from the ancient to modern times and the future. *Frontiers in Environmental Science – Wastewater Management*, 6.
4. **Asano (1998).** Wastewater reclamation and reuse. Water Quality Management Library, 1475 p. Technomic Publishing Co.
5. **Az-Eldin E. (2022).** Le rôle de la fertilisation dans l'augmentation de la production agricole. Khartoum : Ministère de l'Agriculture – Direction de l'orientation agricole.
6. **Baumont et al. (2004).** Réutilisation des eaux usées : risques sanitaires et fiabilité en Île-de-France. Rapport ORS, 220 p.
7. **Batouaf N., (2012).** Réutilisation des eaux usées dans l'agriculture urbaine et périurbaine au Maghreb arabe : avantages et inconvénients. Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen. 78 p.
8. **Belaid 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. Thèse de Doctorat, École Nationale d'Ingénieurs de Sfax. 188 p.
9. **Ben Kouider S., Nechadi S. (2024).** Traitement des eaux usées par procédé boues activées : cas d'étude STEP Boudouaou. Mémoire de Master, Université de Blida I. 47 p.
10. **Benbouchta F. (2021).** L'utilisation des eaux usées traitées dans le secteur agricole. Mémoire de Master, Université Belhadj Bouchaib – Ain Temouchent. 71 p.
11. **Bliefert C., Perraud R. (2001).** Chimie de l'environnement : air, eau, sols, déchets. de Boeck Université, Bruxelles.

12. **Bouhedja A. (2024).** Valorisation des eaux usées épurées de la STEP de Skikda pour améliorer l'irrigation dans le périmètre du Saf-Saf. Mémoire de Master, Université 20 Août 1955 – Skikda. 79 p.
13. **Boukhari H. (2020).** Étude physico-chimique des eaux usées traitées de la STEP de Draa El Mizan pour valorisation agricole. Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. 32 p.
14. **Bouziani (2000).** L'eau (de la pénurie aux maladies). Éd. Ibn Khaldoun.
15. **Chadli B. (2017).** Étude de la réutilisation des eaux usées traitées en agriculture dans le Nord de l'Algérie. Mémoire de Master, Université de Blida.
16. **Demarquest G., Aouriri I. (2023).** Reconnaître les symptômes d'une carence ou d'un excès en azote dans les cultures agricoles. Ngenesis.
17. **Décret exécutif n° 07-149 (2007).** Fixant les conditions de réutilisation des eaux usées traitées. Journal Officiel de la République Algérienne n° 35, pp. 6–12.
18. **FAO (2002).** Drainage Water Management in Arid and Semi-Arid Areas. FAO Irrigation & Drainage 61 p.
19. **FAO (2003).** Fertilizer Use by Crop in Cuba. Rome, tableaux 17–19, pp. 15–16.
20. **FAO (2017).** Une bonne utilisation des eaux usées en agriculture peut répondre aux défis liés à la pénurie d'eau.
21. **FAO (2020).** The State of Food and Agriculture. Overcoming Water Challenges in Agriculture.
22. **Ghomrani N., Medjrab N. (2021).** Étude hydrogéologique du sous-bassin versant de l'Oued Zeramna (Skikda). Mémoire de Master, Université de Constantine. 65 p.
23. **Lofrano G., Brown J. (2010).** Gestion des eaux usées à travers les âges : une histoire de l'humanité. The Science of the Total Environment, 5254 p.
24. **Mansouri F., (2012).** Contribution à l'étude d'extension de la station d'épuration Tizi-Ouzou Ouest (Boukhalfa). Mémoire d'Ingénieur, Université de Tizi-Ouzou. 77 p.

25. **Mohammed M., (2012).** Élimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées traitées, cas de la STEP Est de Tizi-Ouzou. Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. 172 p.
26. **ONA (2024, 2025).** Bilans annuels.
27. **ONID (2023, 2024, 2025).** Bilans annuels.
28. **Ouanouki B., Abdeliaoui N., Ait Abdallah N. (2009).** Application in Agriculture of Treated Wastewater and Sludge from a Treatment Station. *European Journal of Scientific Research*, pp. 60–619.
29. **Qadir M., Sharma B.R., Bruggeman A., Choukr-Allah R. & Karajeh F., (2007).** Nonconventional water resources and opportunities for water augmentation to achieve food security in water-scarce countries. *Agricultural Water Management*, 87.
30. **Qasem N.A., Mohammed R.H. & Lawal D.U. (2021).** Removal of heavy metal ions from wastewater: a comprehensive and critical review. *npj Clean Water*, 4:36.
31. **Radcliffe J.C. (2004).** Role of water reuse in management of urban water resources. *Water Quality in Desalination and Water Resources Encyclopedia*, CSIRO Australia.
32. **Remal I., Guessabi D. (2017).** L'évolution de la matière volatile sèche dans les étapes de traitement de la station d'épuration de Bouira. Mémoire de Master, Université de Bouira.
33. **Rejsek F., (2002).** Analyse des eaux : aspects réglementaires et techniques. SCÉREN–CRDP Aquitaine.
34. **Rodier J., Legube B., Merlet N. (2009).** L'analyse de l'eau : eaux naturelles, résiduaires, etc. (9^{ème} édition.). Dunod, 1579 p.
35. **Salgot M., Huertas E., Weber S., Dott W., Hollender J. (2006).** Wastewater Reuse and Risk: Definition of Key Objectives. *Desalination*, 187.
36. **Shelef G., (1991).** Récupération des eaux usées et gestion des ressources en eau. *Journal of Water Science and Technology*.
37. **Soudani S., (2016).** Évaluation et caractérisation de l'eau potable dans différents quartiers de Biskra. Mémoire de Master, Université Mohamed Khider – Biskra. 94 p.

38. **Tolba F.Z., Kherrab I., (2019).** Étude de l'effet d'une fertilisation chimique (engrais NPK) sur le blé dur. Mémoire de Master, Université Frères Mentouri Constantine 1. 41 p.
39. **Tortajada C., (2006).** Water Management in Singapore. Water Resources Development, 22 :227-240.
40. **U.S. EPA & USAID (2012).** Lignes directrices pour la réutilisation de l'eau (EPA/600/R-12/618).
41. **Union européenne (2020).** Règlement (UE) 2020/741 relatif aux exigences minimales pour la réutilisation de l'eau. JOUE, L 177, 5 juin 2020.
42. **World Health Organization (WHO) (2006).** Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Volume 2, Genève.

Webographie

- <https://www.echoroukonline.com>
- <https://www.facebook.com/apoce.algerie/photos/296176976105217>
- <https://www.almasryalyoum.com/news/details/3153197>
- <https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/sciences/1-echelle-de-ph-et-les-indicateurs-acidobasiques-s1038>
- <https://blog-crop-news.extension.umn.edu/2021/06/scouting-for-nutrient-deficiencies-in.html>
- <https://www.yavuzertarim.com.tr/blog>
- https://id.pngtree.com/freebackground/teak-leaves-exhibiting-yellowing-and-dried-patches-due-to-inadequate-plant-nutrition-photo_10689977.html
- <https://images.app.goo.gl/3NJzrfxgqyKQgb8f6>
- http://wikhydro.developpementdurable.gouv.fr/index.php/Coliforme_fécal_%28HU%29
- <https://images.app.goo.gl/9mDKvj2KEzLDS1>
- <https://www.eaufrance.fr/les-substances-polluantes-des-milieus-aquatiques>

Nom et Prénom : BOUDEFFA Amina
Nom et Prénom : KECHROUD Rayane
Nom et Prénom : ZAHI Manar

Titre : Caractérisation physico-chimique et bactériologique des eaux usées traitées de la station d'épuration de Hamadi Krouma (Skikda) : Perspectives de réutilisation en irrigation agricole.

Résumé : Dans un contexte de stress hydrique croissant en Algérie, aggravé par les changements climatiques et l'augmentation continue de la demande, notamment dans le secteur agricole, la réutilisation des eaux usées traitées s'impose comme une alternative stratégique et durable. La présente étude s'inscrit dans cette dynamique en portant son attention sur la station d'épuration de Hamadi Krouma (Skikda). Son objectif principal est d'évaluer la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux traitées, en vue d'une éventuelle réutilisation dans l'irrigation agricole.

Les résultats révèlent que, d'un point de vue physico-chimique, les eaux traitées présentent une qualité globalement acceptable, traduisant l'efficacité des procédés de traitement mis en œuvre. Toutefois, la présence d'indicateurs microbiologiques de contamination fécale souligne des insuffisances au niveau de la désinfection finale, ce qui constitue un frein à une utilisation sécurisée en irrigation, notamment pour les cultures à consommation crue.

En réponse à ces constats, cette étude recommande un ensemble de mesures visant à optimiser la qualité des eaux usées traitées en vue de leur réutilisation sécurisée en irrigation. Il s'agit notamment de renforcer les étapes du traitement, en intégrant des procédés tertiaires plus performants tels que la désinfection par rayonnement ultraviolet ou la chloration, d'actualiser le cadre réglementaire pour mieux encadrer les pratiques de réutilisation.

Ce travail ambitionne ainsi de contribuer à une gestion plus durable de l'eau en valorisant les eaux usées traitées comme ressource complémentaire, sous réserve d'un contrôle rigoureux et d'un encadrement adapté.

Mots clés : Réutilisation, eaux usées, station d'épuration, Hamadi Krouma, analyse bactériologique, irrigation, sécurité sanitaire.

ملخص

في ظل تفاقم الإجهاد المائي في الجزائر، نتيجة التغيرات المناخية والطلب المتزايد باستمرار، خاصة في القطاع الزراعي، تبرز إعادة استخدام المياه العادمة المعالجة كخيار استراتيجي ومستدام. تندرج هذه الدراسة ضمن هذا التوجه، حيث ركزت على محطة تطهير "حمادي كرومة" (سكيكدة)، بهدف رئيسي يتمثل في تقييم الجودة الفيزيائية-الكيميائية والبكتريولوجية للمياه المعالجة، بغرض إمكانية إعادة استخدامها في الري الزراعي.

أظهرت النتائج أن المياه المعالجة تتمتع بجودة مقبولة من الناحية الفيزيائية-الكيميائية، مما يعكس فعالية العمليات المعتمدة في المعالجة. إلا أن وجود مؤشرات ميكروبيولوجية للتلوث البرازي يبرز أوجه القصور في مرحلة التطهير النهائي، وهو ما يُشكل عائقاً أمام استخدامها الآمن في الري، خصوصاً مع المحاصيل التي تُستهلك نيئة.

استجابةً لهذه الملاحظات، توصي الدراسة بمجموعة من الإجراءات لتحسين جودة المياه المعالجة وضمان إعادة استخدامها بشكل آمن في الري، من بينها تعزيز مراحل المعالجة بإضافة تقنيات ثلثية أكثر كفاءة مثل التطهير بالأشعة فوق البنفسجية أو الكلورة، وتحديد الإطار التنظيمي لتأطير أفضل للممارسات.

وتسعى هذه الدراسة إلى المساهمة في تحقيق إدارة أكثر استدامة للمياه، من خلال تثمين المياه العادمة المعالجة كمورد مائي بديل، شريطة وجود رقابة صارمة وتأطير تقني وتنظيمي مناسب.

الكلمات المفتاحية : إعادة استخدام، المياه العادمة، محطة التطهير، حمادي كرومة، التحليل البكتريولوجي، الري الزراعي، السلامة الصحية.