

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHESCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AMAR TELIDJI-LAGHOUAT
FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE BIOLOGIE



Spécialité: Sciences de la Nature et de la Vie

Filière: Sciences écologiques

Option: Ecologie végétale et environnement

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Thème

Contribution à l'étude de la potentialité de réutilisation des eaux épurées dans l'irrigation agricole de deux stations d'épuration (STEP-HRM et STEP-Laghouat) dans la Wilaya de Laghouat.

Présenté par : MAHIGUIRA Wissem

BEN HORMA Achouak Romaiassa

Devant le jury

- **Président** : Pr Zohra HOUYOU
- **Rapporteur** : Dr. Mohammed Abdelmadjid BOUMEDDIENE
- **Examineur**: Dr. GHOUGALI Fayssal
- **Examineur** : Dr. BENSOUILAH Sofiane

Année Universitaire : 2024/2025

Résumé :

Cette étude vise à évaluer la conformité des eaux traitées des stations d'épuration (STEP) des communes de Laghouat et Hassi R'Mel (wilaya de Laghouat) aux normes de l'OMS et à la réglementation algérienne, en particulier pour leur réutilisation en irrigation agricole.

Des analyses physico-chimiques ont été réalisées du 1er au 18 mai 2025, portant sur plusieurs paramètres clés : température, pH, demande chimique en oxygène (DCO), demande biochimique en oxygène (DBO5), ainsi que les concentrations en nitrites, nitrates et phosphates.

Les résultats montrent que la STEP de Hassi R'Mel présente une efficacité remarquable dans l'élimination des polluants organiques et azotés, mais révèle des concentrations préoccupantes en phosphates après traitement. Quant à la STEP de Laghouat, elle démontre des performances plus limitées concernant la réduction de la DBO5 et des nitrates, bien que certains paramètres physiques comme le pH et les matières en suspension (MES) restent dans des plages acceptables. L'étude confirme ainsi le potentiel de réutilisation agricole des eaux traitées des deux stations, tout en soulignant la nécessité d'optimiser les procédés de traitement pour garantir une conformité totale aux normes et assurer une gestion durable des ressources en eau dans cette région aride.

Mots clés :

Eaux usées traitées, STEP, normes OMS, réglementation algérienne, réutilisation agricole, paramètres physico-chimiques, Laghouat, Hassi R'Mel, gestion durable de l'eau

Abstract:

This study aims to assess the compliance of treated wastewater from the sewage treatment plants (STPs) in the municipalities of Laghouat and Hassi R'Mel (Laghouat Province) with WHO standards and Algerian regulations, particularly for reuse in agricultural irrigation.

Physicochemical analyses were conducted from May 1 to 18, 2025, focusing on several key parameters: temperature, pH, chemical oxygen demand (COD), biochemical oxygen demand (BOD5), as well as nitrite, nitrate, and phosphate concentrations.

The results show that the Hassi R'Mel STP demonstrates remarkable efficiency in removing organic and nitrogenous pollutants but reveals concerning phosphate concentrations after treatment. As for the Laghouat STP, it exhibits more limited performance in reducing BOD5 and nitrates, although some physical parameters such as pH and suspended solids (TSS) remain within acceptable ranges. The study thus confirms the potential for agricultural reuse of treated water from both plants while highlighting the need to optimize treatment processes to ensure full compliance with standards and promote sustainable water resource management in this arid region.

Keywords:

Treated wastewater, sewage treatment plants (STP), WHO standards, Algerian regulations, agricultural irrigation, Laghouat, Hassi R'Mel, physicochemical analyses, water resource management.

الملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم جودة المياه المعالجة في محطتي التنقية ببلديتي الأغواط وحاسي الرمل بولاية الأغواط ومدى مطابقتها للمعايير الدولية لمنظمة الصحة العالمية والتشريعات الجزائرية، وذلك لبيان إمكانية إعادة استخدامها في الري الزراعي. تم إجراء التحاليل الفيزيوكيميائية خلال الفترة من 1 إلى 18 مايو 2025، حيث شملت قياس درجات الحرارة، والأس الهيدروجيني، والطلب الكيميائي على الأكسجين، والطلب البيوكيميائي على الأكسجين، بالإضافة إلى تراكيز النترتريت والنترات والفسفات. أظهرت النتائج أن محطة حاسي الرمل حققت كفاءة عالية في إزالة الملوثات العضوية والنيتروجينية، بينما سجلت ارتفاعاً في مستويات الفوسفات بعد المعالجة.

في المقابل، أظهرت محطة الأغواط أداءً محدوداً في خفض الطلب البيوكيميائي على الأكسجين والنترات، على الرغم من بقاء بعض المعايير الفيزيائية ضمن النطاقات المقبولة.

تؤكد الدراسة على إمكانية الاستفادة من هذه المياه في الزراعة، مع ضرورة تحسين تقنيات المعالجة لضمان الامتثال الكامل للمعايير المطلوبة، مما يساهم في تحقيق استدامة الموارد المائية في هذه المنطقة التي تعاني من شح المياه.

الكلمات المفتاحية

معايير منظمة الصحة العالمية، التشريع الجزائري، الري الزراعي، (STEP) المياه المعالجة، محطات المعالجة الأغواط، حاسي الرمل، تحاليل فيزيوكيميائية، إدارة الموارد المائية

Remerciements

*Nous remercions **ALLAH** tout puissant qui nous a donné le courage et la volonté et de nous avoir bénie pour la réalisation de ce travail. Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude à notre promoteur, **Dr BOUMEDDIENE MOHAMMED ABDELMADJID**. Pour son encadrement, Ses précieux conseils.*

*Merci également aux membres du jury de notre soutenance, professeure **Dr Zohra HOUYOU** en sa qualité de présidente, **Dr Fayssal GHOUGALI** en sa qualité d'examineur et **Dr BENSOUILAH Sofiane** en sa qualité d'examineur.*

Tous les Professeurs du département des Sciences biologiques et écologique pour leur enseignement de qualité et les connaissances qu'ils nous ont transmises durant les années d'études. Leur passion et leur dévouement. Sans oublier nos familles, pour leur soutien indéfectible. Leurs encouragements ont été notre refuge et notre motivation durant tout le parcours académique. Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Que ce soit à travers des discussions enrichissantes, des conseils ou simplement par leur présence, leur contribution a été précieuse. Ce mémoire est le fruit d'un travail collectif autant que personnel, et nous sommes profondément reconnaissants envers tous ceux qui m'ont accompagné

Dédicace

*Je dédie ce mémoire en premier lieu à ceux qui m'ont donné la vie,
qui m'ont été la source de
L'amour, de la tendresse, et du courage, qui m'ont soutenu durant 22
ans... A mes très chers parents , ma mère et mon père,
En priant Dieu jour et nuit qu'il les garde et les protège pour moi
A ceux qui n'ont jamais cessé de me chérir et me soutenir :
Mon unique frère Ahmed Yacine Fathi, mon adorable sœur Asmaa
Ainsi qu'à ma sœur Kaouthar
Ma très chère mon amie MAHIGUIRA Wissem
Et LAAKRI Sabrin LABGAA amani BOUTALEB imadedine
BOUMEGOUAS mohammed
A toutes mes amies et collègues sans exception
A tous ceux que j'aime, et à ceux qui m'aiment... de près ou de loin.*

BEN HORMA ACHOUAK ROMAÏSSA

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

*À mes très chers parents, ma mère et mon père,
pour leurs sacrifices, leur patience et leurs encouragements tout au
long de mes études.*

*À mon frère Mohamed, sa femme Zohra et leur fille Yasmín,
à ma sœur Maroua, son mari Mohamed, leur fils Adam et leur fille
Israa,
à ma sœur Rania et à mon frère Sohaib.*

*À ma chère binôme Achouak Ben Forma,
et à toutes mes amies : BENZIANE iman, GENANE radiaet
BERRZGA rofaïda. LAAKRI Sabrin LABGAA amani BOUTALEB
imadedine BOUMEGOUASSE mohamed BELKHER soraia*

À ma grand-mère bien-aimée et à toute ma famille.

À toute la promotion d'Écologie Végétale et Environnement.

Avec toute ma gratitude, mon respect et mon affection.

MAHIGUIRA WISSEM

Table des matières

Résumé	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
INTRODUCTION.....	1
GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE ISYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	4
1. Pollution de l'eau	5
1.1. Définition et caractéristiques.....	5
1.1.1. Diminution de la teneur en oxygène dissous	5
1.1.2. Présence de substances toxiques.....	5
1.1.3. Prolifération excessive d'algues (eutrophisation).....	5
1.1.4. Modifications physiques du milieu aquatique	6
1.1.5. Contamination microbiologique	6
2. Eaux usées	6
2.1. Définition et origines.....	6
2.2. Classification des polluants	8
2.3. Paramètres généraux relatifs aux eaux usées.....	10
2.3.3.2. Indice de biodégradabilité (K)	16
2.3.4. Paramètres microbiologiques.....	16
2.3.4.1. Les bactéries	17
2.4. Impact de la pollution de l'eau sur l'environnement et la santé humaine	18
2.4.1. Les impacts sur l'environnement.....	18
2.4.2. Les impacts sur la santé humaine.....	18
2.5. Les maladies d'origine bactérienne	18
2.5.4. L'épuration des eaux usées	19
3. Les étapes de traitement des eaux usées.....	21
3.1. Prétraitement.....	21
3.1.1. Dégrillage	21
3.1.2. Dessablage.....	22
3.1.3. Dégraissage-déshuilage	22
3.2.1. La décantation (processus physique)	23

3.2.2.	La flottation (processus physique).....	23
3.2.3.	La décantation associée à l'utilisation d'un coagulant- flocculant (voie physicochimique)	24
3.3.	Traitement secondaire.....	24
3.3.1.	Le traitement secondaire anaérobie	24
3.3.2.	Le traitement secondaire aérobie	25
3.4.1.	L'élimination de l'azote.....	30
3.4.2.	L'élimination du phosphore	30
1.	La réutilisation des eaux usées	32
1.2.	Définition de la réutilisation de l'eau	32
1.3.	L'histoire de la réutilisation des eaux usées	33
2.	Réutilisation des eaux usées épurées en Algérie	34
3.	Impacts de la réutilisation des eaux usées épurées.....	34
3.1.	Avantages environnementaux :.....	34
3.2.	Impacts négatifs et risques de la réutilisation des eaux usées épurées.....	35
3.2.1.	Risques environnementaux :.....	36
5.	Réutilisation des eaux usées en agriculture en Algérie :.....	37
6.	Cultures à irriguer avec les eaux usées épurées.....	38
7.	Les normes Algérienne de la réutilisation des eaux usées épurées	37
8.	Usages des eaux usées traitées	40
	CHAPITRE II MATERIEL ET METHODE	41
1.	Présentation de la wilaya de Laghouat siège de notre étude	42
1.1.	Situation géographique de Laghouat	42
1.2.	Géologie et géomorphologie.....	42
1.2.1.	Reliefs dominants :	43
1.2.2.	Hautes surfaces (glacis et terrasses) :.....	43
1.2.3.	Dépressions (Dayas) :.....	43
1.3.	Pédologie.....	43
1.4.	Hydrographie	44
1.5.	Climat et bioclimat.....	44
1.5.1.	Températures :	44
1.5.2.	Précipitations :	44
1.5.3.	Régime saisonnier :.....	45
1.5.4.	Les Paramètres bioclimatiques :	45
2.	Présentation de la STEP de Laghouat	46
3.	Présentation de la région de Hassi r'mel.....	46

3.1.	Situation géographique de Hassi R'Mel	46
3.2.	Le climat de Hassi R'Mel	47
3.3.	Situation géographique de La STEP de Hassi R'Mel :.....	47
4.	Analyse des eaux aux laboratoires	48
4.1.	Les paramètres physico-chimiques et biologiques	49
4.1.1.	La température :	49
4.1.2.	Le potentiel hydrogène (ph).....	49
4.1.3.	La conductivité électrique (CE).....	50
4.1.4.	Les matières en suspension (MES) :.....	51
4.1.5.	La demande chimique en oxygène (DCO) :	52
4.1.6.	La demande biologique en oxygène sur 5 jours (DBO ₅) :	53
4.1.7.	L'ammonium	54
4.1.8.	Nitrite :	55
4.1.10.	Phosphate.....	57
CHAPITRE III RESULTATS ET DISCUSSIONS		59
1.1.	Analyse des températures.....	60
1.2.	Analyse du ph.....	61
1.3.	Analyse de la conductivité	62
1.4.	Analyse des MES (Matières En Suspension)	63
1.5.	Analyse de la DCO (Demande Chimique en Oxygène).....	64
1.6.	Analyse de la DBO ₅ (demande biologique en oxygène)	65
1.7.	Analyse de l'ammonium	66
1.8.	Analyse des nitrites	67
1.9.	Analyse des Nitrates.....	68
1.10.	Analyse des phosphates.....	69
2.1	La température et la réutilisation agricole.....	71
2.2	Le ph et la réutilisation agricole.....	72
2.3	La conductivité et la réutilisation de l'eau pour l'agriculture	73
2.4	La MES et impact sur la réutilisation agricole.....	73
2.5	La DCO et la réutilisation de l'eau pour l'agriculture.....	74
2.6	La DBO ₅ et la réutilisation de l'eau pour l'agriculture	75
2.7	l'ammonium et la réutilisation Agricole.....	76
2.8	Les nitrites et risques pour l'irrigation.....	77
2.9	Les nitrates et risques pour la réutilisation agricole.....	78
2.10	Les phosphates et la réutilisation agricole	79

CONCLUSION	81
REFERENCESBIBLIOGRAPHIQUES	Erreur ! Signet non défini.
REFERENCE ELECTRONIQUES :	93
ANNEXES :	94

Liste des figures

Fig 1.Filière d'épuration (zahir 2007).....	20
Fig 2 . le dégrillage STEP de Laghouat (Original, 2025)	21
Fig 3 . le dégrillage STEP de HRM (Original, 2025)	21
Fig 4. déssableur et déshuileur Laghouat (Original, 2025).....	22
Fig 5 . déshuileur HRM (Original, 2025)	22
Fig 6. La décantation STEP de Laghouat (Original, 2025)	23
Fig 7 . La décantation STEP de HRM (Original, 2025)	23
Fig 8. Le bassin d'aération de la STEP de Laghouat (Original, 2025)	25
Fig 9. Le bassin d'aération de la STEP de et HRM (Original, 2025).....	25
Fig 10.Schéma simplifié du système à lit bactérien.....	26
Fig 11. Schéma simplifié du procédé à disques biologiques	27
Fig 12. Schéma simplifié d'une station de lagunage naturel	28
Fig 13.Schéma simplifié d'un système à boues activées	29
Fig14. Système d'injection de chlore pour le traitement des eaux usées	31
Fig15.Carte de la wilaya de Laghouat	42
Fig 16 . Diagramme ombrothermique de BAGNOLS et GAUSSEN de la de la région de Laghouat.	45
Fig17. Localisation de la STEP-Laghouat (Google Earth, 2025).....	46
Fig 18. Diagramme ombrothermique de BAGNOLS et GAUSSEN de de la région de Hassi R'mel.....	47
Fig 19. Localisation de la STEP-HRM (Google Earth, 2025).....	48
Fig 20. L'étage bioclimatique des régions de Laghouat et Hassi R'mel	48
Fig 21. Mesure la température (Originale, 2025)	49
Fig 22. Mesure de pH (Originale, 2025).....	50
Fig 23.Mesure la conductivité (Originale, 2025).....	51
Fig 24. Incinération les papiers filtre (Original, 2025)	52
Fig 25.Estimation des matières en suspension (Original, 2025).....	52
Fig26.Estimation de la DCO (Original, 2025).....	53
Fig 27.Estimation de DBO ₅ (Original, 2025)	54
Fig28.Estimation de l'ammonium (Original, 2025)	55
Fig 29.Estimation de Nitrite (Original, 2025).....	55
Fig 30.Estimation Nitrate (Original, 2025).....	56

Fig 31. Estimation de (NO_3) et (NO_2) par Spectrophotomètre (Original, 2025).....	57
Fig 32. Estimation des nitrites et nitrates (Original, 2025).....	57
Fig 33. Estimation de Phosphate (Original, 2025).....	58
Fig34. Evolution de la température dans les deux stations (STEP-HRM et STEP-Laghoutat)...	61
Fig 35. Evolution de pH dans les deux stations (STEP-HRM et STEP-Laghoutat).....	62
Fig 36. Evolution de la conductivité dans les deux stations (STEP-HRM et STEP-Laghoutat) ..	63
Fig 37. Evolution de la Matière En Suspension dans les deux stations (STEP-HRM et STEP-Laghoutat).....	64
Fig 38. Evolution de DCO dans les deux stations (STEP-HRM et STEP-Laghoutat)	65
Fig 39. Evolution de le DBO_5 dans les deux stations (STEP-HRM et STEP-Laghoutat).....	66
Fig 40. Evolution de la Ammonium dans les deux stations (STEP-HRM et STEP-Laghoutat) ..	67
Fig41. Evolution des nitrites dans les deux stations (STEP-HRM et STEP-Laghoutat)	68
Fig 42. Evolution des nitrates dans les deux stations (STEP-HRM et STEP-Laghoutat)	69
Fig 43. Evolution des phosphates dans les deux stations (STEP-HRM et STEP-Laghoutat)	70

Liste des tableaux

Tab 1. Caractère de l'effluent déterminé par le ratio (K) et la fraction de DBO5.....	16
Tab 2. Les normes algériennes de la réutilisation des eaux usées épurées en agriculture.....	39
Tab 3. Normes nationales de la réutilisation des eaux usées épurées (JORA, 2006).	38
Tab 1 . Résultats des analyses physico-chimiques des eaux usées avant et après épuration.....	60

Liste des abréviations

AGV : D'acides gras volatils

CE : Conductivité Électrique

DBO : Demande Biochimique en Oxygène

DCO : Demande Chimique en Oxygène

DMRE : Direction de la Mobilisation des Ressources en Eau /MRE

ETM : Éléments Traces Métalliques

EUT : des eaux usées traitées

FAO: Food and Agriculture organisation

L'ONU : l'Organisation des Nations Unies

MES : Matières En Suspension

NaOH : l'hydroxyde de sodium

NTU : Nephelometric Turbidity Units

OMS: Organisation Mondiale de Santé

ONA : Office National d'Assainissement

ONM : Office National de Météorologie

pH : potentiel d'Hydrogène

PNUE : Programme des Nations Unies pour l'environnement

REUE : Réutilisation des eaux usées épurées

STEP: Station d'épuration

UNESCO : Organisation des Nations Unies pour l'Enfance et la Culture

UNICEF : Fonds des Nations Unies pour l'enfance

UV : Ultraviolets

INTRODUCTION

GÉNÉRALE

Introduction

L'eau ressource vitale et indispensable à la vie, doit être préservée et rendue accessible à tous, constituant un défi majeur pour l'avenir de l'humanité (Mahamat et *al*, 2004). Face à l'urbanisation croissante et à l'évolution des modes de consommation, les ressources en eau potable diminuent tandis que les rejets d'eaux usées non traitées augmentent, posant un risque sanitaire et écologique important (Benhdid et Harrouz., 2011). Pour y faire face, une politique d'assainissement reposant sur la collecte, l'épuration et l'élimination sécurisée des eaux usées a été mise en place dès le début du siècle. Cependant, le rejet massif des eaux traitées dans les milieux naturels, comme la mer ou les zones humides, peut encore engendrer des nuisances, soulignant la nécessité d'améliorer les techniques d'épuration et de promouvoir la réutilisation durable de ces eaux (NADER A., 2015).

L'eau joue un rôle fondamental dans le maintien des écosystèmes, agissant comme solvant universel, transporteur de nutriments et régulateur thermique naturel, contribuant ainsi à la stabilité climatique et au développement de la vie (Ngö, 2008 ; Andreae, 1970). Cependant le stress hydrique, défini par le rapport entre la consommation d'eau et les ressources disponibles, touche aujourd'hui plus de 2 milliards de personnes dans le monde (ONU, 2018). Plusieurs grands aquifères sont surexploités, notamment à cause de l'irrigation, principale cause d'épuisement des eaux souterraines (Richey et *al*, 2015 ; Burek et *al*, 2016).

En Afrique, la crise hydrique est accentuée par une répartition inégale des ressources : six pays concentrent plus de la moitié des eaux du continent, tandis que 27 pays en disposent de moins de 10 % (UNESCO, 2020). Cette disparité s'accompagne d'un accès limité à l'eau potable, 73 % de la population subsaharienne étant privée de services sécurisés en 2017 (OMS/UNICEF, 2019). Vingt-cinq pays africains risquent des pénuries sévères, freinant leur développement (PNUE, 2002).

L'Algérie est particulièrement vulnérable, avec une disponibilité moyenne d'eau de 500 m³/habitant/an en théorie, mais seulement 383 m³/habitant/an en réalité, bien en dessous du seuil de pénurie fixé à 1 000 m³/habitant/an par la Banque mondiale (Maliki.B, 2006). La réutilisation des eaux usées traitées, définie comme une action planifiée pour combler les déficits hydriques (Vairon, 1983), reste embryonnaire dans le pays. En 2013, seulement 2 % des

eaux épurées étaient réemployées, principalement en agriculture (DMRE, 2013), alors que ce potentiel est largement sous-exploité.

À l'échelle mondiale, la réutilisation connaît une croissance rapide, avec des taux annuels entre 10 % et 29 % dans plusieurs pays développés, et des volumes traités atteignant jusqu'à 1,7 million de m³ par jour dans des régions comme la Californie et la Chine (Lazarova et Brissaud, 2007). En Afrique du Nord, la recharge artificielle des aquifères est une pratique émergente pour lutter contre l'intrusion marine (AFED, 2010). Cependant, dans certains pays comme Djibouti, la réutilisation reste très limitée (FAO, 2005).

Les eaux usées traitées ont de nombreuses applications : irrigation agricole, arrosage urbain, lutte contre les incendies, usage industriel pour le refroidissement, recharge des nappes phréatiques, et mise en valeur sylvicole (BRL, 2011). Ces usages contribuent à économiser l'eau potable et à préserver les ressources naturelles.

Enfin, les sols des zones arides, caractérisés par une faible teneur en humus, une structure fragile et une faible profondeur, sont fortement influencés par le climat aride, avec des précipitations faibles et une évaporation intense (Houyou, 2015). La délimitation précise des domaines pédologiques dans des régions comme la wilaya de Laghouat reste cependant difficile.

Dans le cadre du programme gouvernemental lancé en novembre 2023, qui vise à porter à 60 % le taux de valorisation des eaux usées traitées d'ici 2026, des actions telles que la réhabilitation des stations d'épuration et le développement de réseaux d'irrigation, notamment à travers des projets comme le Barrage vert, ont été engagées, de ce fait, notre travail d'étude s'inscrit dans cette optique et vise à évaluer la qualité des eaux usées après leur traitement dans deux stations d'épuration dans la wilaya de Laghouat, notamment celle de la commune de Laghouat et celle de la commune de Hassi R'Mel.

Notre mémoire s'organise comme suit :

- Une introduction qui expose le contexte général et la problématique de cette étude.
- Un premier chapitre qui expose une synthèse bibliographique relative à la pollution de l'eau, le traitement d'épuration des eaux usées et la réutilisation.
- Un deuxième chapitre présentant les sites étudiés, les méthodes d'études adoptées et les protocoles d'analyses utilisés.

- Un troisième chapitre présentant les résultats et les discussions.
- Et enfin nous clôturons avec une conclusion et des perspectives.

CHAPITRE I

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Pollution de l'eau

1.1. Définition et caractéristiques

La pollution de l'eau se définit comme une altération de sa qualité physique, chimique ou biologique, qui rend son utilisation dangereuse pour l'homme et les écosystèmes, en particulier les milieux aquatiques. Elle peut affecter aussi bien les eaux superficielles (rivières, lacs) que les eaux souterraines (Soudi et *al.* 2009).

Les principales manifestations de la pollution de l'eau, notamment dans les eaux de surface, sont :

1.1.1. Diminution de la teneur en oxygène dissous

Une surcharge en matières organiques, souvent issues des rejets d'eaux usées domestiques ou de sous-produits industriels (industrie laitière, industrie de la viande), peut entraîner une forte consommation d'oxygène par les micro-organismes, provoquant l'asphyxie de la faune aquatique.

1.1.2. Présence de substances toxiques

Ces polluants, souvent d'origine industrielle ou agricole, peuvent avoir des effets aigus (mort rapide des organismes) ou chroniques (accumulation lente dans les tissus biologiques), affectant la biodiversité aquatique. Ils proviennent notamment de l'industrie chimique, de la métallurgie, des pesticides agricoles ou des décharges sauvages.

1.1.3. Prolifération excessive d'algues (eutrophisation)

Bien que les algues produisent de l'oxygène, une croissance excessive due à une surcharge en nutriments (azote, phosphore) perturbe l'équilibre de l'écosystème et peut générer des zones mortes.

1.1.4. Modifications physiques du milieu aquatique

La pollution peut aussi se manifester par une augmentation de la turbidité (due par exemple au lavage de matériaux), une modification de la salinité (eaux salines issues de mines), ou une élévation de la température (rejets thermiques des centrales).

1.1.5. Contamination microbiologique

Les eaux usées domestiques, hospitalières ou issues d'élevages peuvent contenir des agents pathogènes (bactéries, virus) susceptibles de représenter un danger sanitaire (Soudi et *al.* 2009).

2. Eaux usées

2.1. Définition et origines

2.1.1. Définition

Selon Ramade (2000), les eaux usées sont des eaux ayant été altérées après usage domestique, industriel ou agricole. Elles deviennent alors des effluents pollués nécessitant un traitement avant rejet dans le milieu naturel.

Bliefert et Perraud (2001) précisent que ces eaux englobent non seulement les eaux usées issues de l'activité humaine (ménages, industries, agriculture), mais également les eaux pluviales collectées dans les mêmes canalisations.

Enfin, Franck (2002) souligne que ces eaux sont chargées en polluants divers (organiques, chimiques, biologiques), liés principalement aux activités anthropiques.

2.1.2. Origines des eaux usées

Quelle que soit leur origine, les eaux usées sont généralement chargées en polluants susceptibles de représenter un danger pour les milieux récepteurs ainsi que pour la santé humaine. La caractérisation qualitative et quantitative de ces effluents constitue une étape préalable indispensable à la conception de tout procédé de traitement efficace.

On distingue principalement trois grandes origines des eaux usées :

2.1.2.1. Les eaux usées domestiques

Les eaux usées domestiques regroupent :

- **Les eaux ménagères** : provenant des douches, lavabos, machines à laver, cuisines...
- **Les eaux vannes** : contenant les urines et les matières fécales (issues des toilettes).

Ce type d'effluent, courant dans les réseaux de type "tout à l'égout", contient des matières minérales (chlorures, sulfates, phosphates...) et organiques (sucres, graisses, protéines...), ces dernières étant des composés souvent riches en carbone, hydrogène, oxygène, azote, et parfois en soufre, phosphore ou métaux tels que le fer (Vaillant, 1974 ; Baumont et *al*, 2004).

2.1.2.2. Les eaux usées industrielles

Les eaux usées industrielles sont générées par les usages non domestiques de l'eau, incluant :

- Les industries lourdes et manufacturières,
- Les activités artisanales (blanchisseries, ateliers),
- Les services commerciaux (restaurants, laboratoires...).

Ces eaux présentent une grande diversité de composition selon l'activité génératrice. Elles peuvent contenir des produits toxiques pour l'environnement et la santé humaine. On distingue :

2.1.2.2.1. Les eaux résiduaires

Eaux ayant servi au nettoyage, au refroidissement ou à la rétention de poussières, pouvant être chargées en produits chimiques utilisés dans les procédés industriels.

2.1.2.2.2. Les liquides résiduaires

Issus directement des processus de fabrication, comme les solutions chimiques ou les acides de décapage des métaux (Edline, 1979). Selon leur degré de pollution et la réglementation en vigueur, ces rejets peuvent être :

- Dirigés vers le réseau d'assainissement domestique sans traitement préalable,

- Prétraités sur site, puis évacués vers le réseau public,
- Entièrement traités sur place, avant d'être rejetés directement dans le milieu naturel (Baumont et *al.* 2004).

2.1.2.3. Les eaux usées urbaines

Les eaux usées urbaines regroupent à la fois les eaux domestiques et les eaux de ruissellement, incluant :

- Les eaux pluviales
- Les eaux issues de l'arrosage et du nettoyage des voiries,
- Les eaux de lavage des caniveaux, marchés et espaces publics.

Ces eaux, en s'écoulant sur les toitures, cours, jardins, voies publiques et espaces verts, entraînent divers types de débris et polluants :

- **Déchets minéraux** : terre, sable, limon, silt, boues...
- **Déchets organiques** : herbes, feuilles, pailles, graines, débris végétaux...
- **Micropolluants** : hydrocarbures, pesticides issus des traitements de jardin, détergents utilisés pour le lavage des surfaces, particules de caoutchouc provenant de l'usure des pneus, etc. (Desjardins, 1997).

Ainsi, les eaux usées urbaines constituent un mélange complexe de substances potentiellement polluantes, rendant leur traitement indispensable avant tout rejet dans le milieu naturel.

2.2. Classification des polluants

La classification des polluants permet d'identifier leur nature et de sélectionner les procédés de traitement adaptés. Selon Moletta (2008), les polluants des eaux usées peuvent être classés selon deux grands critères : leur composition chimique et leur état physique.

2.2.1. Polluants organiques et/ou minéraux

Matière organique : provient des êtres vivants (végétaux, animaux) ou de produits synthétiques issus de l'industrie chimique. Elle est structurée autour du carbone. On y retrouve :

- Sucres
- Protéines
- Acides organiques (lactique, acétique...)
- Acides gras
- Macromolécules (amidon, cellulose...)

Matière minérale : D'origine non organique, elle ne contient généralement pas de carbone.

Elle inclut :

- Métaux lourds (plomb, cadmium...)
- Ammoniac (NH_3)
- Nitrates (NO_3^-)
- Phosphates (PO_4^{3-})
- Dioxyde de carbone (CO_2)

Remarque : Les eaux usées contiennent pratiquement toujours une combinaison de ces deux types de polluants, dont les proportions varient selon la source de pollution.

2.2.2. Polluants solubles et/ou insolubles

Les matières polluantes, qu'elles soient organiques ou minérales, se présentent sous deux états physiques :

2.2.2.1. Matières solubles

- Dissoutes dans l'eau,
- Souvent sous forme de molécules simples ou de macromolécules (ex. : protéines, colloïdes),
- Invisibles à l'œil nu.

2.2.2.2. Matières insolubles

- En suspension sous forme de particules solides,
- Peuvent flotter ou décanter, selon leur densité.
-

2.2.3. Matières toxiques

Parmi les substances présentes dans les eaux polluées, certaines possèdent une toxicité élevée pour le vivant, même à de très faibles concentrations. Ces polluants toxiques peuvent fortement perturber l'équilibre écologique des milieux aquatiques. Par exemple : Le cyanure, même à l'état de traces, est extrêmement toxique pour la faune aquatique.

Des métaux lourds comme le cadmium et le mercure, à faibles doses, provoquent des effets biologiques dévastateurs, tels que des mutations cellulaires, des troubles neurologiques et la bioaccumulation dans les chaînes alimentaires (Moletta, 2008).

Ces substances posent un problème crucial dans le cadre du traitement des eaux usées, en raison de leur persistance et de leur capacité à contaminer durablement les milieux récepteurs.

2.2.4. Matières inertes et/ou vivantes

Les eaux usées contiennent à la fois :

Des matières inertes, c'est-à-dire des substances organiques ou minérales non vivantes, qui n'interagissent pas directement avec les processus biologiques (ex. : sable, argile, sels minéraux).

Des matières vivantes, représentées par des micro-organismes (bactéries, virus, protozoaires), dont certains sont pathogènes pour l'homme et les animaux. Leur prolifération est favorisée par la présence de matière organique dans l'eau (Rodier et *al*, 2009).

Ces organismes vivants jouent un double rôle :

- Positif dans le cadre du traitement biologique (boues activées, biofilms...),
- Négatif lorsqu'ils sont pathogènes ou responsables de pollutions microbiologiques.

2.3. Paramètres généraux relatifs aux eaux usées

La caractérisation des eaux usées repose sur un ensemble de paramètres physico-chimiques et organoleptiques permettant d'évaluer leur qualité et de déterminer les traitements à appliquer. Parmi ces paramètres figurent :

2.3.1. Paramètres organoleptiques

Ce sont les paramètres perçus par les sens humains (vue, odorat), et qui donnent une première indication de la pollution de l'eau.

2.3.1.1. La couleur

La couleur réelle d'une eau est due uniquement aux substances dissoutes. Elle est mesurée après filtration à 0,45 µm, afin d'éliminer les matières en suspension.

La couleur apparente est celle que l'on observe dans l'eau non filtrée, incluant donc les matières en suspension qui contribuent à la coloration.

Dans le cas des eaux claires ou peu turbides, les deux types de couleur (réelle et apparente) sont très proches. En revanche, dans les eaux fortement polluées, cette différence peut être significative (Rodier et *al*, 2009).

2.3.1.2. L'odeur

La présence d'odeurs dans une eau est souvent un indicateur de pollution organique, en lien avec la décomposition de matières biologiques (protéines, végétaux, excréments...).

Ces composés sont généralement en très faibles concentrations, rendant leur détection difficile par des méthodes analytiques classiques.

L'examen olfactif doit être réalisé rapidement après le prélèvement, car les composés volatils peuvent se dégrader ou s'évaporer.

Pour préserver l'échantillon, il peut être conservé à 4 °C ou 2 °C, sans contact avec des sources d'odeurs étrangères, et pendant un délai maximum de 72 heures (Rodier et *al*, 2009).

2.3.2. Paramètres physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques sont fondamentaux pour évaluer la qualité des eaux usées et déterminer les méthodes de traitement les plus appropriées. Ces paramètres influencent directement la biodégradabilité, la toxicité et l'impact environnemental des effluents.

2.3.2.1. Température

La température affecte plusieurs propriétés de l'eau, notamment :

- La solubilité des gaz (en particulier l'oxygène dissous),
- La vitesse des réactions chimiques et biochimiques,
- Le métabolisme des organismes vivants.

Une augmentation de 10 °C double voire triple les vitesses de réaction biologiques et chimiques. Toutefois, des variations brutales supérieures à 3 °C peuvent perturber les écosystèmes aquatiques, voire provoquer un choc thermique nocif pour la faune (De Villers et *al.* 2005).

2.3.2.2. Potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH mesure l'acidité ou l'alcalinité d'une eau en évaluant la concentration en ions H^+ :

- $pH = 7$: solution neutre
- $pH < 7$: eau acide
- $pH > 7$: eau basique.

Les eaux naturelles ont un pH généralement compris entre 6 et 9. Un pH acide peut libérer des métaux lourds sous des formes plus toxiques. À l'inverse, un pH alcalin augmente la concentration en ammoniac libre (NH_3), dangereux pour les poissons (De Villers et *al.* 2005).

2.3.2.3. Conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique évalue la capacité d'une eau à conduire le courant, proportionnelle à la concentration en ions dissous (sels minéraux). Elle est exprimée en $\mu S/cm$ ou mS/m .

Elle permet d'estimer la charge saline globale d'un effluent et d'évaluer son impact sur la faune aquatique. En effet, les organismes aquatiques sont très sensibles aux variations brutales de salinité, notamment causées par des rejets industriels ou domestiques (Rodier et *al.* 2009).

2.3.2.4. Turbidité

La turbidité mesure la réduction de la transparence de l'eau causée par des particules en suspension (argiles, limons, silices, matières organiques). Elle est exprimée en unités NTU (Nephelometric Turbidity Units).

Une eau très turbide réduit la pénétration de la lumière, ce qui entrave la photosynthèse des végétaux aquatiques et perturbe les chaînes trophiques (Rodier et *al*, 1996).

2.3.2.5. Matières en suspension (MES)

Les MES regroupent les matières solides non dissoutes :

D'origine organique (déchets végétaux, fécaux)

Minérale (sable, argile...).

Elles peuvent être volatiles (biodégradables) ou inertes. Les MES réduisent la transparence de l'eau, bloquent la lumière et peuvent accumuler des polluants toxiques (métaux lourds, hydrocarbures, pesticides), impactant gravement la faune aquatique (Gaïd, 1984).

2.3.2.6. Carbone organique total (COT)

Le COT désigne la concentration totale en carbone contenu dans les composés organiques présents dans l'eau. Il est un bon indicateur de la charge organique globale, sans distinction entre composés biodégradables ou non.

Le COT est souvent utilisée en complément de la DCO et de la DBO, pour obtenir une vision complète de la pollution organique (Rodier et *al*, 1996).

2.3.2.7. Demande chimique en oxygène (DCO)

La DCO (en mg/L) quantifie l'oxygène nécessaire pour oxyder chimiquement les matières organiques (et parfois inorganiques) contenues dans un échantillon d'eau, dans des conditions sévères (oxydation au dichromate de potassium par exemple).

Elle évalue notamment les composés difficilement biodégradables, tels que les hydrocarbures, les composés halogénés ou les produits pharmaceutiques. Une valeur élevée de DCO est un indicateur fort de pollution organique (Bliefertet Perraud, 2001).

2.3.2.8. Les substances nutritives

Les eaux usées contiennent des éléments nutritifs essentiels à la croissance des végétaux, ce qui en fait une ressource potentiellement valorisable en agriculture ou en aménagement paysager. Parmi ces éléments figurent notamment l'azote (N), le phosphore (P), et dans une moindre mesure, le potassium (K), ainsi que d'autres éléments secondaires comme le soufre (S), le zinc (Zn) et le bore (B) (Gaïd, 1984 ; FAO, 2003).

La matière organique présente dans ces eaux, sous forme de particules en suspension, colloïdales ou dissoutes, contribue à améliorer la fertilité des sols à long terme en stimulant l'activité biologique et en renforçant la stabilité structurale du sol.

2.3.2.9. L'azote

L'azote est présent dans les eaux usées sous plusieurs formes chimiques :

- Azote organique (issu de la dégradation de matières protéiques),
- Azote ammoniacal (NH_4^+ / NH_3),
- Nitrites (NO_2^-),
- Nitrates (NO_3^-).

L'ensemble de ces formes constitue l'azote total. Dans les stations d'épuration, la forme la plus prédominante est l'azote ammoniacal, qui résulte de la minéralisation de l'azote organique lors des processus biologiques (Koller, 2004 ; Roland, 2010). Toutefois, une concentration excessive d'azote, notamment sous forme de nitrates, peut entraîner des phénomènes d'eutrophisation dans les milieux aquatiques récepteurs (OMS, 2012).

2.3.2.10. Le phosphore

Le phosphore est un élément limitant en milieu naturel. Il est retrouvé dans les eaux usées principalement sous forme de :

- Phosphates minéraux (issus des détergents),
- Phosphore organique (déchets alimentaires, excréta).

Ses principales sources sont les rejets domestiques (produits ménagers), agricoles (engrais phosphatés) et industriels. La présence de phosphore dans les eaux souterraines est un indicateur préoccupant de contamination anthropique (Savary, 2010). Dans les eaux de surface, l'excès de phosphore est aussi un facteur majeur d'eutrophisation.

2.3.2.11. Le potassium

Le potassium est un macro-élément essentiel à la croissance des plantes. Dans les eaux usées, sa concentration est généralement faible, car il est peu présent dans les rejets organiques. En revanche, dans les sols, bien qu'il soit abondant (environ 3 % de la lithosphère), il est souvent non disponible pour les plantes car lié à des composés insolubles. Par conséquent, l'apport via les eaux usées est insuffisant pour satisfaire les besoins agricoles, mais il ne présente aucun risque environnemental connu (OMS, 2012).

2.3.2.12. Les éléments traces métalliques (ETM)

Les éléments métalliques que l'on trouve dans les eaux usées urbaines sont extrêmement nombreux (de l'ordre de quelques $\mu\text{g/l}$). Les plus abondants sont le fer, le zinc, le cuivre et le plomb. Les autres métaux (manganèse, aluminium, chrome, arsenic, sélénium, mercure, cadmium, molybdène, nickel, etc.) sont présents à l'état de traces (AMORCE, 2012).

Leur origine est multiple : ils proviennent « des produits consommés au sens large par la population, de la corrosion des matériaux des réseaux de distribution d'eau et d'assainissement, des eaux pluviales dans le cas de réseau unitaire, des activités de service (santé, automobile) et éventuellement de rejets industriels » (Cauchi et al, 1996).

2.3.3. Paramètres biologiques

2.3.3.1. La demande biochimique en oxygène (DBO)

La Demande Biochimique en Oxygène (DBO) représente la quantité d'oxygène requise pour oxyder et décomposer les matières organiques présentes dans les eaux usées, un processus réalisé avec l'action des bactéries (Gaïd, 1984). Ce paramètre permet de mesurer la

concentration de matière organique dans les eaux résiduaires, ce qui en fait l'un des critères les plus importants pour évaluer leur niveau de pollution et leur qualité globale. Ainsi, la DBO constitue un indicateur essentiel pour déterminer l'impact des rejets polluants sur les milieux aquatiques.

Matière organique + bactéries Boues + gaz + eau

Berné et Cordonnier (1991) définissent la DBO5 comme étant la quantité d'oxygène consommée par les bactéries, à 20°C à l'obscurité et pendant 5 jours d'incubation d'un échantillon préalablement ensemencé, temps qui assure l'oxydation biologique d'une fraction de matière organique carbonée.

2.3.3.2. Indice de biodégradabilité (K)

Le ratio de biodégradabilité (K) est défini par DCO/DBO5, il représente la fraction de la DCO qui est biodégradable, la valeur de K permet de déterminer le type de l'effluent étudié (Tableau 1), certains auteurs préfèrent employer le rapport DBO5 /DCO, dont la fraction DBO5 est exprimée en pourcentage.

Tab 1. Caractère de l'effluent déterminé par le ratio (K) et la fraction de DBO5

Ratio (k)	Fraction de la DBO5	Caractère de l'effluent
1,5	66,7%	Spontanément biodégradable
2 à 3	33% à 50%	Biodégradable (Effluent urbain)
Supérieur à 5	Inférieur à 20%	Non biodégradable (Effluent industriel)

Source : (Cardot, 2010)

2.3.4. Paramètres microbiologiques

L'ensemble des microorganismes et des parasites qu'on peut trouver dans les eaux usées, peut être classé en quatre grands groupes : les bactéries, les virus, les protozoaires et les helminthes.

2.3.4.1. Les bactéries

Les bactéries sont des organismes unicellulaires simples et sans noyau. Leur taille est comprise entre 0,1 et 10 μm . La quantité moyenne de bactéries dans les fèces est d'environ 10¹² bactérie/g (Asano, 1998). La majorité de ces bactéries ne sont pas pathogènes. Cependant, chez un hôte infecté, le nombre de bactéries pathogènes peut être très important. Les eaux usées contiennent en moyenne 10⁷ à 10⁸ bactérie/l. La concentration en bactéries pathogènes est de l'ordre de 10⁴ bactérie/l (Faby et Brissaud, 1997).

2.3.4.2. Les virus

Ce sont des organismes infectieux de très petite taille (10 à 350 nm) qui se reproduisent en infectant un organisme hôte, Les virus représentent une forme de pollution biologique véhiculée par les eaux usées. Dans une station d'épuration, le traitement biologique d'un effluent contaminé entraîne une réduction de la charge virale (Benyahya et al. 1998). Parmi les principaux virus que l'on peut trouver dans les eaux usées est le Virus de l'hépatite A, Virus de l'hépatite E, Rotavirus, Virus de Norwalk, Adénovirus et Entérovirus (Schwartzbrod, 2000).

2.3.4.3. Les protozoaires

Les protozoaires sont des organismes unicellulaires munis d'un noyau, plus complexes et plus gros que les bactéries. La plupart des protozoaires pathogènes sont des organismes parasites, c'est-à-dire qu'ils se développent aux dépens de leur hôte. Certains protozoaires adoptent au cours de leur cycle vital une forme de résistance, appelée kyste qui peut être véhiculé par les eaux résiduaires. Cette forme peut résister généralement aux procédés de traitements des eaux usées (Baumont et al, 2004).

2.3.4.4. Les helminthes

Les helminthes sont des vers multicellulaires, tout comme les protozoaires, ce sont majoritairement des organismes parasites. Les œufs d'helminthes sont très résistants et peuvent notamment survivre plusieurs semaines voire plusieurs mois sur les sols ou les plantes cultivées. La concentration en œufs d'helminthes dans les eaux usées est de l'ordre de 10 à 10³ œufs/l (Baumont et al, 2004).

2.4. Impact de la pollution de l'eau sur l'environnement et la santé humaine

Le respect de la santé publique et la protection des milieux naturels qui reçoivent les eaux usées sont des contraintes auxquelles doit répondre l'assainissement. Néanmoins, le développement de certaines épidémies au cours des siècles précédents, était dû à l'absence de l'épuration des eaux usées. En effet, le rejet des eaux usées peut avoir des conséquences néfastes pour le milieu récepteur, en particulier pour les organismes vivants qu'il héberge, mais également l'homme ou pour les activités qu'il réalise au niveau de ce milieu (Franck, 2002).

2.4.1. Les impacts sur l'environnement

L'impact des eaux usées sur l'environnement se traduit principalement par le phénomène d'eutrophisation, un terme signifiant « bien nourri » et désignant l'enrichissement excessif de l'eau en nutriments, notamment en azote et en phosphore. Cet apport nutritif provoque une prolifération accélérée d'algues et de végétaux aquatiques, perturbant l'équilibre des écosystèmes et dégradant la qualité de l'eau (Ramade, 2000). Les rejets d'eaux usées dans les milieux naturels ou marins favorisent également la croissance d'algues toxiques, réduisant la biodiversité et altérant les propriétés physico-chimiques de l'eau, ce qui peut affecter des secteurs comme le tourisme. De plus, les variations de température et de pH perturbent le développement de la faune et de la flore, tandis que la matière organique rejetée entraîne une surconsommation d'oxygène par les microorganismes et les poissons. Enfin, les matières en suspension peuvent obstruer les branchies des poissons, aggravant les conséquences écologiques (Ramade, 1998).

2.4.2. Les impacts sur la santé humaine

Les eaux peuvent transmettre, directement ou indirectement, de nombreux microorganismes pathogènes présents dans la nature. Ces agents pathogènes sont à l'origine de diverses maladies, que l'on peut classer en deux groupes principaux selon leur origine.

2.5. Les maladies d'origine bactérienne

2.5.1. Fièvres typhoïdes et paratyphoïdes

Dues à des salmonelles ; *salmonella typhi* et *paratyphi A, B, et C*, elles sont caractérisées par la fièvre céphalées, diarrhée, douleurs abdominales, accompagnées d'un abattement extrême (Roland, 2010).

2.5.2. Gastroentérite aigue et diarrhées

Causer par *Escherichia coli*, qui est une bactérie saprophyte du tube digestif de l'homme et des animaux qu'elle envahit dès les premières heures de la vie elle se multiplie par milliards dans la matière fécale leur extrême abondance et leur résistance dans l'eau sont telles que ces bactéries qui ont été retenues comme germe test des contaminations par matière fécale des eaux (Roland, 2010).

2.5.3. Les maladies d'origine parasitaires

- La dysenterie amibienne causée par l'amibe *Entamoeba histolytica*.
- Les crampes abdominales nausées et diarrhées causées par *Giardia Lamblia*.
- Hépatite A (hépatite infectieuse) provoquée par un virus de la famille des *Picornaviridae* (Roland, 2010).

2.5.4. L'épuration des eaux usées

L'évolution des systèmes de collecte et de traitement des eaux usées a été influencée à la fois par les transformations des modes de vie et par les avancées scientifiques au cours de l'histoire. L'urbanisation croissante et l'expansion démographique ont progressivement rendu indispensable la distribution d'une eau potable de qualité, faisant de la santé publique une priorité. Depuis des siècles, des efforts considérables ont ainsi été déployés pour assainir les eaux usées. Parallèlement, les progrès scientifiques, notamment dans la compréhension des épidémies comme le choléra, la peste ou le typhus, ont conduit au développement d'infrastructures et de techniques de traitement toujours plus élaborées, permettant de mieux contrôler ces fléaux sanitaires (Le Byaric, 2009).(figure.1)

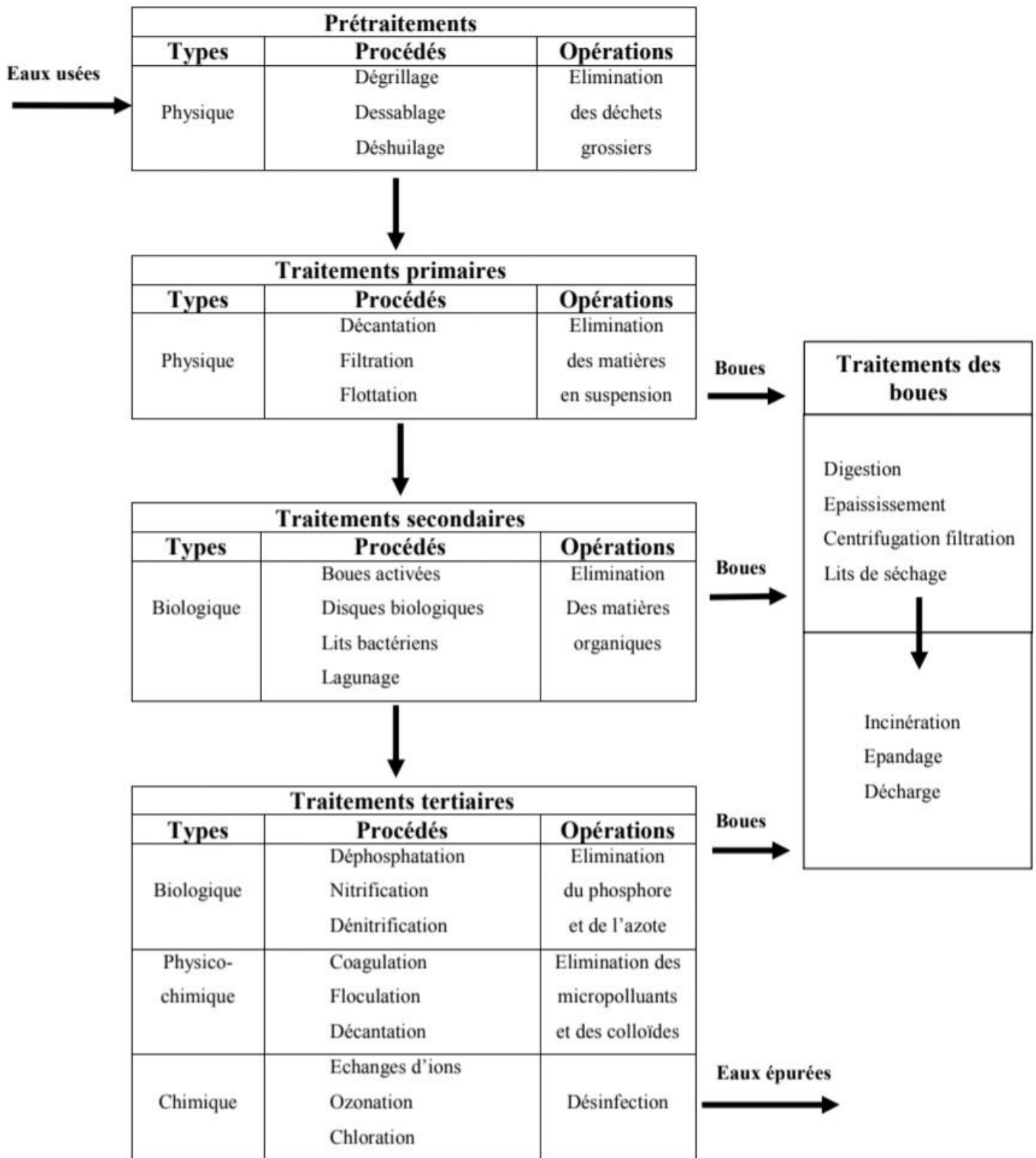


Fig1.Filière d'épuration (zahir 2007)

3. Les étapes de traitement des eaux usées

3.1. Prétraitement

Le prétraitement constitue une phase primordiale dans tout système d'épuration des eaux usées. Cette étape préliminaire, qui comprend des procédés comme le dégrillage, le dessablage, le tamisage et l'élimination des graisses, vise à extraire les matières grossières présentes dans les eaux brutes (déchets solides, débris végétaux, graviers, sables et autres particules). Son importance réside dans la protection des équipements en aval, évitant ainsi l'endommagement des pompes et des installations de traitement ultérieur (Condom et Declercq, 2016).

3.1.1. Dégrillage

Le dégrillage constitue la première étape du prétraitement des eaux usées. À leur arrivée dans la station d'épuration, les effluents transitent à travers une grille métallique (ou un tamis) dont les barreaux espacés interceptent les déchets volumineux tels que papiers, feuilles, matières plastiques et divers objets. L'effluent ainsi filtré est ensuite acheminé vers l'usine de traitement, soit par élévation mécanique via des vis d'Archimède, soit par pompage (INRS, 2004). Ce procédé préliminaire permet de protéger les équipements en aval contre les corps étrangers susceptibles de perturber le processus d'épuration.(figure.2) (figure.3)



Fig2 .le dégrillage STEP de Laghouat
(Original, 2025)



Fig3 .le dégrillage STEP de HRM
(Original, 2025)

3.1.2. Dessablage

Cette opération permet de séparer par sédimentation les eaux usées des graviers, sables et autres particules minérales plus ou moins fines susceptibles d'endommager les installations en aval (ensablement des conduites, des bassins, etc.), le dessablage ne concerne que les particules de diamètre supérieur ou égal à 200 μm dont les particules de diamètre inférieur seront «récupérées» par décantation (Altmeyer et *al*, 1990).

3.1.3. Dégraissage-déshuilage

Il a pour but de séparer les huiles et graisses, produits de densité légèrement inférieure à celle de l'eau, lorsqu'elles ne sont pas émulsionnées, ces produits sont séparés sous forme de boues flottantes dans des ouvrages comportant une zone d'aération où les bulles d'air augmentent la vitesse de montée des particules graisses et une zone de tranquillisation où s'effectue la récupération. Le temps de séjour dans ce type d'ouvrage est de 5 à 12 min. Le débit d'air insufflé est de l'ordre de 0,2 m³ par mètre cube d'eau et par heure (Gaid, 1993).(figure.4) (figure.5)



Fig4.dessableur et déshuileur Laghouat **Fig5** .déshuileur HRM (Original, 2025)

(Original, 2025)

3.2. Traitement primaire

Le traitement primaire (optionnel en fonction de la filière de traitement retenue), séparation physique liquide-solide par décantation, ne porte que sur les matières en suspension (MES) présentes dans les eaux usées. L'élimination complémentaire des colloïdes s'effectue par un

traitement physico-chimique mettant en œuvre une coagulation-floculation en amont d'une séparation liquide-solide par décantation ou flottation (Le byaric, 2009).

Durant la phase de traitement primaire, une quantité importante de la pollution totale est éliminée (abattement des matières en suspension pouvant atteindre 90% et de la demande biochimique en oxygène de l'ordre de 35%) (Cardot, 2010).

3.2.1. La décantation (processus physique)

La décantation est la séparation de l'eau et des flocons par décantation dans un décanteur. Les flocons ainsi récupérés (boues) sont dirigés par le biais de pompes ; soit vers un épaisseur où ils subissent une pré-déshydratation. (L'épaisseur sert également de stockage) ; soit vers la floculation pour maintenir une concentration suffisante en boues (Generet et *al*, 2005) (figure.6) (figure.7)



Fig6. La décantation STEP de Laghouat
(Original, 2025)



Fig7 . La décantation STEP de HRM
(Original, 2025)

3.2.2. La flottation (processus physique)

La flottation est un procédé de séparation solide-liquide ou liquide-liquide qui s'applique à des particules dont la masse volumique réelle ou apparente (flottation assistée) est inférieure à celle du liquide qui les contient. Les principaux inconvénients de cette technique sont les coûts d'exploitation élevés à cause d'une forte consommation énergétique, ce procédé est donc réservé principalement aux grandes stations (AMORCE, 2012).d'exploitation élevés à cause

d'une forte consommation énergétique, ce procédé est donc réservé principalement aux grandes stations (AMORCE, 2012).

3.2.3. La décantation associée à l'utilisation d'un coagulant- flocculant (voie physicochimique)

La coagulation-floculation est un procédé de traitement des eaux qui consiste à neutraliser les charges électriques des particules en suspension (coagulation par ajout de sels métalliques comme le fer ou l'aluminium), puis à les agréger en floccs décantables (floculation via des polymères), facilitant ainsi leur élimination par sédimentation (Deshayes, 2007).

3.3. Traitement secondaire

Le traitement secondaire constitue une étape cruciale du processus d'épuration, intervenant après le traitement primaire. Il combine deux approches complémentaires : un traitement biologique et un traitement chimique. Le volet biologique repose sur l'action de microorganismes spécialisés (bactéries, protozoaires et métazoaires) qui dégradent la matière organique et assimilent l'azote présent dans les effluents. Ce processus reproduit et intensifie les mécanismes naturels d'autoépuration, mais dans un environnement contrôlé et optimisé (Bassompierre, 2007). Parallèlement, le traitement chimique permet d'éliminer le phosphore grâce à l'ajout de chlorure ferrique, tandis que des polymères sont utilisés pour améliorer la floculation des boues résiduelles (Pasquini, 2013). Cette synergie entre processus biologiques et interventions chimiques permet d'atteindre une efficacité accrue dans un espace réduit, tout en garantissant une qualité optimale de l'effluent final.

3.3.1. Le traitement secondaire anaérobie

Le traitement secondaire anaérobie repose sur un mécanisme microbiologique complexe de dégradation de la matière organique en absence d'oxygène. Ce processus met en œuvre diverses populations microbiennes incluant principalement des bactéries (Bacteria) et archées (Archaea), ainsi que certains protozoaires et champignons anaérobies (Effebe, 2009).

La digestion anaérobie est un processus de dégradation de la matière organique en l'absence d'oxygène, elle s'effectue en deux phases principales :

- Une phase acide de liquéfaction (hydrolyse) des composants organiques aboutissant à la formation d'acides gras volatils (AGV).

- Une phase de gazéification dont les produits finals essentiellement de méthane (CH_4) et de gaz carbonique (CO_2) (Boeglin, 1998).

3.3.2. Le traitement secondaire aérobie

Les bactéries utilisées exigent un apport permanent d'oxygène. Deux grandes familles peuvent être distinguées : les procédés à cultures fixes (microorganismes fixés sur des supports), les procédés à culture libre (micro-organismes maintenus en suspension dans le mélange à épurer). Nous pouvons citer les plus courantes (Degrémont, 2005) : (figure.8) (figure.9)



Fig8. Le bassin d'aération de la STEP de Laghouat (Original, 2025)



Fig9. Le bassin d'aération de la STEP de et HRM (Original, 2025)

3.3.2.1. Les procédés à culture fixée

Les procédés par cultures fixées utilisent un matériau support fixe et/ou des éléments rotatifs sur lesquels se développent des cultures bactériennes, on distingue :

3.3.2.2. Les procédés à culture fixée

Les procédés par cultures fixées utilisent un matériau support fixe et/ou des éléments rotatifs sur lesquels se développent des cultures bactériennes, on distingue

- Le lit bactérien

C'est un système de traitement biologique où les microorganismes se développent sur un support poreux (naturel ou synthétique), formant un biofilm qui dégrade la matière organique de l'effluent décanté lors de son écoulement. Ce procédé présente une double couche microbiologique : une zone aérobie en surface et une zone anaérobie en profondeur, où le détachement naturel du biofilm permet le renouvellement des surfaces de colonisation (Degrémont, 2005). Bien que moins énergivore que les boues activées (ne nécessitant pas d'aération forcée), son efficacité reste limitée et dépend étroitement des caractéristiques du support (AERM, 2012). Son principal inconvénient réside dans les risques de colmatage dus à une prolifération excessive du biofilm, pouvant compromettre le fonctionnement (Pasquini, 2013).(figure.10)

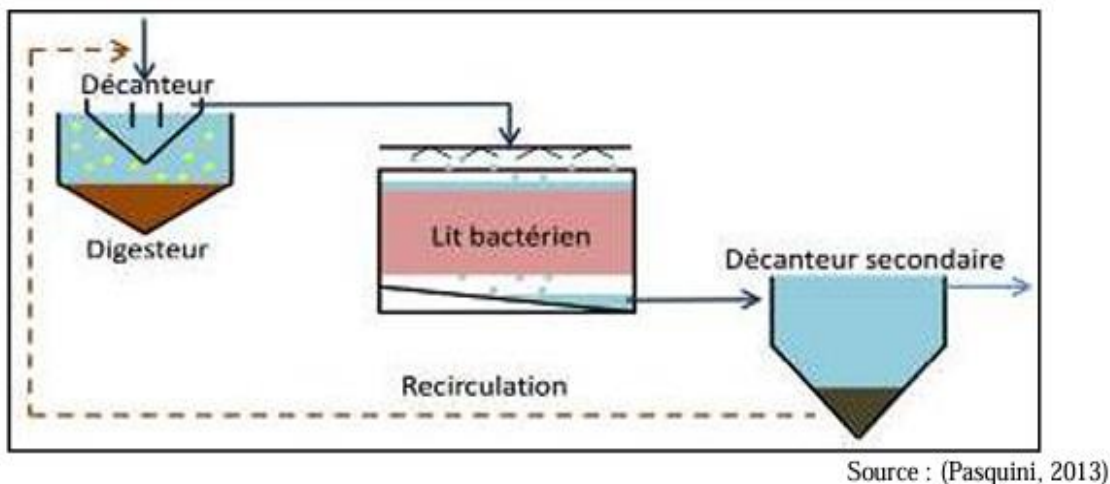
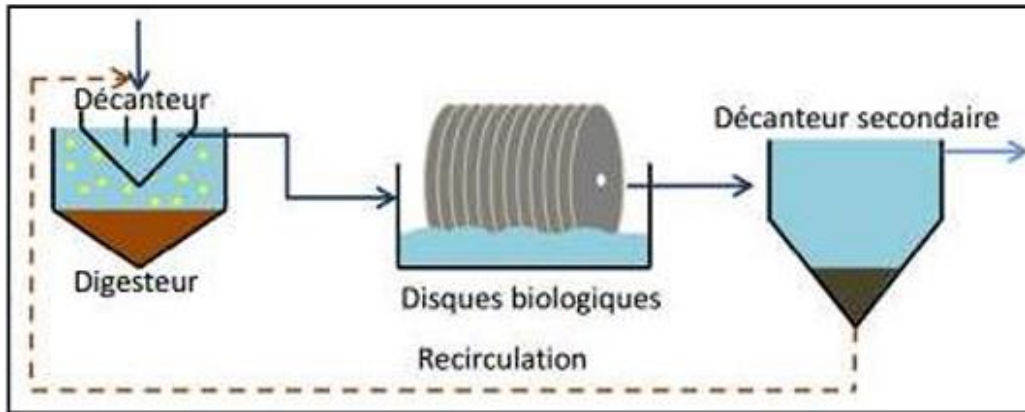


Fig10.Schéma simplifié du système à lit bactérien

3.3.2.3. le procédé à disques biologiques

Ce système utilise des disques en polystyrène expansé fixés sur un axe rotatif, partiellement immergés dans l'effluent prétraité. Les disques servent de support à un biofilm bactérien qui dégrade la matière organique par oxydation aérobie, bénéficiant d'une aération naturelle grâce à la rotation (exposition alternée à l'air et à l'eau). Lorsque le biofilm atteint une épaisseur critique (quelques millimètres), il se détache spontanément et est éliminé par décantation secondaire. Bien que conceptuellement simple et économe en énergie, ce procédé a été

abandonné en France après 1975 en raison de problèmes mécaniques récurrents, conduisant au développement d'autres technologies à biofilm plus robustes (Pasquini, 2013). (figure.11)



Source : (Pasquini, 2013)

Fig11. Schéma simplifié du procédé à disques biologiques

- Les filtres biologiques

Conçus pour les collectivités de 50 à 1000 équivalents-habitants (EH), les filtres à sable plantés de roseaux constituent un système d'épuration écologique combinant filtration physique et traitement biologique. Le procédé repose sur deux étages de filtration : un premier bassin retient les matières en suspension tandis qu'un second perfectionne l'épuration. Les roseaux jouent un rôle clé par leur système racinaire qui (1) maintient la perméabilité du filtre, (2) oxygène le massif filtrant, et (3) favorise le développement des microorganismes épurateurs fixés sur les grains de sable (AERM, 2007). Avec leur surface spécifique élevée, ces systèmes offrent une capacité d'échange bien supérieure aux procédés conventionnels (Degrémont, 2005). Nécessitant peu d'entretien (vidange des boues tous les 15 ans environ), cette technologie inspire aujourd'hui le développement de piscines naturelles où des végétaux aquatiques assurent l'autoépuration de l'eau (Pasquini, 2013).

- Procédés à cultures libres

Dans les procédés à cultures libres, les bactéries se développent sous forme de floes dispersés au sein du liquide à traiter. L'ensemble est brassé afin de maintenir la culture en suspension. Il existe deux procédés à cultures libres différents : le traitement par boues activées et le lagunage (Pasquini, 2013).

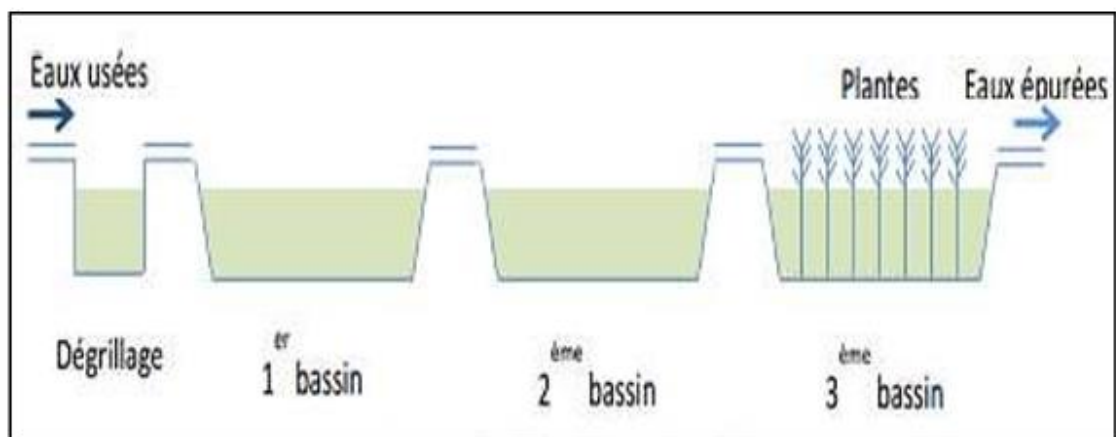
- Le lagunage

Le lagunage est un procédé d'épuration biologique utilisant une succession de bassins peu profonds (1 à 5 m) où microorganismes et végétaux coopèrent pour purifier les eaux usées. Deux versions existent : le lagunage naturel (oxygénation par photosynthèse algale) et le lagunage aéré (apport complémentaire d'air). Particulièrement adapté aux zones rurales et aux pays en développement, ce système combine simplicité d'exploitation et efficacité épuratoire (Altmeyer et *al*, 1990).

Le traitement s'effectue typiquement en trois étapes :

- ✓ **Bassin de traitement primaire** : dégradation aérobie/anaérobie de la matière organique par les bactéries, avec oxygénation naturelle (photosynthèse algale + échange atmosphérique)
- ✓ **Bassin de décantation** : sédimentation des boues biologiques
- ✓ **Bassin de finition** : réduction des nutriments (N/P) par l'action des macrophytes (roseaux, iris...)

Cette technologie écologique, qui inspire de nombreuses applications en phytoépuration, représente une solution durable pour les petites collectivités (Pasquini, 2013). Son principal atout réside dans son faible besoin en maintenance et son intégration harmonieuse dans le paysage. (figure12)

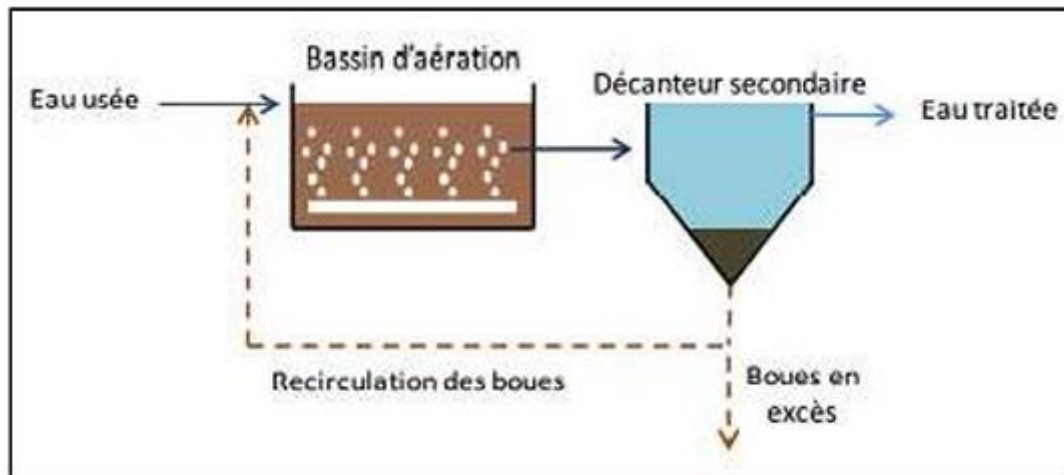


Source : (Pasquini, 2013)

Fig12. Schéma simplifié d'une station de lagunage naturel

- **Le procédé à boues activées**

C'est basé sur l'intensification des processus d'autoépuration présent dans le milieu naturel. En effet, il permet la dégradation et la minéralisation de la matière organique par les bactéries aérobies dans un espace réduit, grâce à un apport en oxygène assuré par un brassage de la liqueur mixte (Pasquini, 2013). Ce procédé est composé de deux bassins principaux. Le premier est un bassin d'aération, dans lequel les agrégats bactériens sont maintenus en suspension dans l'eau grâce à un brassage continu de la liqueur (Metcalf et Eddy, 2003). Les microorganismes s'y développent et consomment la pollution organique des effluents en la transformant en dioxyde de carbone et eau. Le second bassin, appelé décanteur secondaire ou clarificateur, permet ensuite la séparation solide/liquide. Une partie de la boue décantée est recirculée dans le bassin aéré, augmentant ainsi la concentration en biomasse dans le réacteur biologique et amplifiant le taux d'épuration des eaux (Pasquini, 2013). (figure.13)



Source : (Pasquini, 2013)

Fig13.Schéma simplifié d'un système à boues activées

3.4. Traitement tertiaire

Certains rejets d'eaux traitées sont soumis à des réglementations spécifiques concernant l'élimination d'azote, de phosphore ou des germes pathogènes, qui nécessitent la mise en œuvre d'un traitement complémentaire ou tertiaire (Franck, 2002). Il s'agit de procédés physico-chimiques, avec notamment des procédés membranaires (ultrafiltration, nanofiltration, osmose inverse) ou des procédés d'oxydation avancée (ozonation, peroxyde d'hydrogène, UV). Ces techniques présentent souvent un coût ainsi qu'un bilan environnemental (notion de transfert d'impact) discutable (Downward et Taylor, 2007).

3.4.1. L'élimination de l'azote

Les stations d'épuration n'éliminent qu'environ 20% de l'azote présent dans les eaux usées par les traitements de nitrification-dénitrification. Pour satisfaire aux normes de rejet en zones sensibles, des procédés physiques et physico-chimiques complémentaires permettent l'élimination de l'azote par : électrodialyse, résines échangeuses d'ions, mais ces traitement ne sont pas utilisés dans le traitement des eaux résiduaires urbaines, pour des raisons de rendement et de coût (Franck, 2002).

3.4.2. L'élimination du phosphore

La déphosphoration, ou élimination du phosphore, peut être réalisée par des méthodes physico-chimiques ou biologiques. La méthode biologique repose sur l'accumulation du phosphore dans les cultures bactériennes des boues activées. Cependant, les mécanismes biologiques sont complexes et leur efficacité varie selon la présence de pollution carbonée et de nitrates dans les eaux usées. Dans les grandes stations d'épuration, ce procédé est souvent combiné à une déphosphoration physico-chimique pour atteindre les normes de rejet requises (Franck, 2002).

3.4.3. La désinfection

La désinfection agit en altérant la paroi cellulaire des microorganismes ou en modifiant leur perméabilité, leur activité enzymatique ou protoplasmique, provoquant ainsi des perturbations structurelles. Ces dommages empêchent leur reproduction et leur développement. Une réduction de la concentration en germes est parfois nécessaire, notamment pour les rejets dans des zones sensibles (Franck, 2002) ou en vue d'une réutilisation des eaux. Dans ces cas, un traitement de désinfection spécifique est appliqué par :

a) Voie chimique

• Le chlore

C'est un oxydant puissant qui agit à la fois sur les substances organiques et les micro-organismes. Les doses nécessaires pour éliminer ces derniers dépendent de l'usage et des conditions du milieu. Son efficacité augmente en milieu acide, car son pouvoir oxydant

s'accroît lorsque le pH diminue. Ainsi, le traitement au chlore est optimal dans des conditions de faible pH (Boudreau et *al*, 2009). (figure.14)



Fig14. Système d'injection de chlore pour le traitement des eaux usées

- **L'ozone**

C'est un oxydant puissant, efficace contre les bactéries et les virus, sans générer de sous-produits toxiques ni permettre la reviviscence des germes après traitement. De plus, il améliore la qualité de l'eau en réduisant ou éliminant les molécules organiques potentiellement mutagènes lorsque la dose appliquée est suffisante (Rodier et *al*, 2009).

- b) Voie physique**

- **Les rayons ultraviolets**

Les UV, générés par des lampes à mercure alignées parallèlement ou perpendiculairement au flux d'eau, désinfectent en ciblant directement les micro-organismes. Cette méthode présente l'avantage d'être simple à mettre en œuvre, sans nécessiter de stockage ni de manipulation de produits chimiques, tout en préservant les caractéristiques chimiques de l'eau traitée (Baumont et *al*. 2004).

- **La filtration**

C'est un procédé physique de rétention des microorganismes à travers un média filtrant (sable ou membrane). Cette technique nécessite un prétraitement par épuration secondaire pour

éliminer efficacement les matières en suspension, garantissant ainsi son bon fonctionnement (CSHPF, 1995) :

- **L'infiltration-percolation**

C'est une technique d'épuration consistant à faire percoler les eaux traitées à faible vitesse à travers un massif filtrant sableux (naturel ou artificiel), généralement réparti en plusieurs bassins. Comme l'effluent filtré ne rejoint généralement pas les eaux de surface, ce procédé ne peut être considéré comme une méthode de désinfection à proprement parler.

- **La filtration sur membrane**

L'ultrafiltration repose sur une barrière physique qui retient les micro-organismes sans les détruire. Son efficacité, déterminée par le seuil de coupure de la membrane, peut assurer une rétention totale des pathogènes dans le traitement des eaux superficielles. Cependant, la fiabilité du système dépend étroitement de l'intégrité des modules de filtration, difficile à vérifier en continu. Une rupture des fibres membranaires peut entraîner une baisse soudaine et indétectable en temps réel de la performance de filtration.

3.5. Les boues résiduaires

Le traitement des eaux usées urbaines génère systématiquement des quantités importantes de boues résiduelles. Ces boues peuvent ensuite être soumises à différents traitements ou être stockées temporairement avant valorisation ou élimination (Schwartzbrod, 2000).

Et parce qu'elles sont gorgées d'eau, les boues font l'objet de diverses phases de traitements visant à réduire leur volume, à les stabiliser et à les rendre facilement manutentionnables pour les évacuer de la station d'épuration. Les diverses possibilités offertes de chaque phase conduisent donc, à une multiplicité de filières de traitement (Morel, 1977).

1. La réutilisation des eaux usées

1.2. Définition de la réutilisation de l'eau

Selon (Vairon 1983), la réutilisation de l'eau est une démarche volontaire et planifiée qui vise à produire des volumes complémentaires d'eau afin de satisfaire divers besoins et de réduire les

déficits hydriques. Elle ne se limite pas à une simple gestion des eaux usées, mais s'inscrit dans une logique de valorisation durable de la ressource en eau, en tenant compte des pressions croissantes sur les réserves naturelles, notamment dans les régions confrontées à la rareté hydrique.

Dans les pays à faibles ressources en eau, souvent caractérisés par des climats arides ou semi-arides, cette stratégie est particulièrement pertinente. La réutilisation des eaux usées traitées permet d'éviter la compétition directe avec les ressources en eau potable, en particulier pour les usages ne nécessitant pas une qualité d'eau élevée, comme l'irrigation agricole ou l'arrosage des espaces verts (Mohammed, 2008).

1.3. L'histoire de la réutilisation des eaux usées

L'histoire de la réutilisation des eaux usées remonte au XIXe siècle, à une époque où les grandes villes d'Europe et d'Amérique du Nord cherchaient des solutions pour l'évacuation des eaux résiduaires domestiques. Des initiatives ont été mises en place dès 1865 au Royaume-Uni, suivies par les États-Unis en 1871, la France en 1872, l'Allemagne en 1876, l'Inde en 1877, l'Australie en 1893 et le Mexique en 1904. À l'origine, l'objectif principal de cette pratique était d'éviter la pollution des rivières et autres milieux aquatiques, les systèmes d'assainissement étant alors rudimentaires.

L'approche visait donc davantage à protéger la santé publique et l'environnement qu'à optimiser les rendements agricoles comme l'illustre le slogan britannique de l'époque : « Les eaux usées pour la terre, la pluie pour les rivières ». Cependant, avec l'expansion urbaine et la généralisation des réseaux d'égouts, les volumes d'eaux usées ont augmenté considérablement, rendant les surfaces agricoles disponibles insuffisantes pour leur absorption.

De plus, l'introduction des technologies de traitement modernes, telles que la bio filtration et les boues activées, entre 1900 et 1920, a réduit l'intérêt pour la réutilisation directe dans plusieurs pays industrialisés. Ce n'est qu'à partir des années 1980-1990 que cette pratique a connu un regain d'intérêt, particulièrement dans les régions confrontées au stress hydrique.

Cette relance est portée par la raréfaction des ressources en eau, les contraintes climatiques, la pression démographique, ainsi que par les avancées technologiques en matière de traitement et de surveillance de la qualité de l'eau (Mara et Cairncross, 1991).

Aujourd'hui, la réutilisation des eaux usées est considérée comme une composante essentielle de la gestion intégrée des ressources en eau, soutenue par les politiques publiques, les institutions internationales et les initiatives de développement durable.

2. Réutilisation des eaux usées épurées en Algérie

La réutilisation des eaux usées traitées en Algérie en est encore à un stade embryonnaire, avec des volumes réutilisés très limités, estimés à environ 14 millions de m³ par an.

Selon les données du DMRE (2013), seulement 2 % des eaux usées épurées sont actuellement réutilisées de manière réglementaire, permettant l'irrigation d'une superficie de 1 285 hectares.

En Algérie, la réutilisation des eaux usées traitées reste très limitée, avec seulement 2 % du volume épuré (14 millions de m³/an) utilisé de manière réglementaire pour irriguer 1 285 hectares (DMRE, 2013).

Les chiffres ci-dessous précisent les volumes des eaux usées épurées réutilisées par an en Algérie :

- Agriculture = 13 424 789m³
- Lutte contre l'incendie = 138 066m³
- Arrosage des arbres = 1 077 665m³
- Lavage des chaussées = 370m³ (site1)

3. Impacts de la réutilisation des eaux usées épurées

3.1. Avantages environnementaux :

Selon la FAO (2003), la récupération et la réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation représentent l'une des méthodes d'élimination les plus sûres et les plus durables sur le plan environnemental. Cette position est partagée par l'OMS (1989), qui estime que la réutilisation constitue souvent la meilleure solution pour préserver l'environnement.

En effet, une utilisation agricole maîtrisée des eaux usées épurées présente plusieurs avantages écologiques majeurs :

- Réduction de la pollution des eaux de surface : évite les rejets directs dans les rivières, limitant ainsi les nuisances olfactives, les risques de conditions anaérobies et l'eutrophisation des lacs et réservoirs.
- Protection des nappes phréatiques : en substituant les eaux souterraines surexploitées par l'agriculture, elle prévient leur épuisement et l'intrusion saline.
- Amélioration des sols agricoles : l'apport de matière organique favorise la fertilité des terres et contribue à la lutte contre l'érosion (FAO, 2003).

Ainsi, la réutilisation des eaux usées traitées se présente comme une solution à double bénéfice, combinant gestion durable des ressources hydriques et préservation des écosystèmes.

La FAO (2003) et l'OMS (1989) considèrent que la réutilisation des eaux usées traitées en irrigation est une méthode écologiquement optimale, offrant plusieurs avantages: réduction de la pollution des eaux, protection des nappes phréatiques contre la surexploitation et la salinisation, et enrichissement des sols grâce à l'apport de matière organique. Cette approche constitue donc une solution durable pour concilier agriculture et préservation de l'environnement.

3.2. Impacts négatifs et risques de la réutilisation des eaux usées épurées

Outre leurs bénéfices environnementaux, les eaux usées épurées réutilisées peuvent présenter des risques sanitaires pour les populations exposées, en raison de la présence potentielle de microorganismes pathogènes ou de substances chimiques toxiques. Ces risques concernent principalement les agriculteurs et les ouvriers en contact avec ces eaux, mais aussi les consommateurs de produits irrigués.

La contamination peut survenir par :

- Contact direct avec les eaux usées traitées lors de leur utilisation ;
- Inhalation d'aérosols (notamment en cas d'irrigation par aspersion) ;
- Consommation de produits agricoles irrigués avec ces eaux (Baumont, 2004).

Ainsi, malgré leur potentiel de valorisation, les eaux usées épurées nécessitent une gestion rigoureuse pour minimiser les risques pour la santé publique.

La réutilisation des eaux usées traitées, bien qu'utile, peut exposer les populations à des risques sanitaires dus à des agents pathogènes ou polluants chimiques. La contamination peut se faire par contact cutané, inhalation d'aérosols (aspersion) ou ingestion de produits irrigués (Baumont, 2004)

3.2.1. Risques environnementaux :

3.2.1.1. Effets sur le sol :

Les problèmes prévus au niveau du sol sont :

- L'augmentation de la salinité (salinisation) ;
- L'alcalinisation et la baisse de perméabilité du sol ;
- L'accumulation d'éléments toxiques (métaux lourds, polluants chimiques, etc.) (FAO, 2003).

Ces effets dégradants menacent la fertilité des terres à long terme et nécessitent une surveillance rigoureuse ainsi que des pratiques de gestion adaptées pour préserver la qualité des sols agricoles

3.2.1.2. Effets sur les eaux souterraines :

L'utilisation d'eaux usées épurées pour l'irrigation présente un risque avéré de contamination des aquifères, pouvant se manifester par :

- Une minéralisation accrue (salinisation et alcalinisation)
- Une pollution chimique (nitrates, phosphates et micropolluants)
- Une contamination biologique et métallique

Risques sanitaires :

La problématique santé-environnement liée aux eaux usées repose principalement sur deux voies de contamination :

- Exposition directe : contact cutané ou inhalation lors de la manipulation des eaux usées
- Exposition indirecte : consommation de denrées alimentaires irriguées avec ces eaux

Ces contaminations peuvent revêtir :

- Un caractère microbiologique (bactéries pathogènes, virus, parasites)
- Un caractère chimique (métaux lourds, résidus médicamenteux, polluants organiques)

5. Réutilisation des eaux usées en agriculture en Algérie :

L'Algérie s'intéresse de plus en plus à la réutilisation des eaux usées en agriculture, un choix dicté par la croissance rapide de sa population et, par conséquent, par une demande en eau en constante augmentation (FAO, 2003). Comme de nombreux pays du bassin méditerranéen, l'Algérie fait face à un déficit hydrique important, accentué par la raréfaction progressive des ressources en eau conventionnelles. Cette situation est particulièrement critique dans le secteur agricole, où les besoins sont élevés. En revanche, la production d'eaux usées ne cesse de croître, ce qui offre une opportunité stratégique pour répondre à la pénurie. C'est dans cette optique que le ministère des ressources en eau a adopté une stratégie visant à protéger les ressources hydriques et à promouvoir la réutilisation des eaux usées traitées, notamment pour l'irrigation.

La capacité annuelle de production d'eaux usées épurées par les installations existantes (stations d'épuration et lagunes) est estimée à environ 130 000 m³, en tenant compte des trois niveaux de traitement : primaire, secondaire et tertiaire. Ainsi, la réutilisation à des fins agricoles est devenue un pilier central de la politique nationale de gestion de l'eau (Rouha, 2012).

Étant donné que la quasi-totalité des ressources en eau douce exploitables est déjà mobilisée, il devient indispensable de recourir à des sources alternatives, comme les eaux usées traitées. C'est dans ce contexte que l'Algérie a lancé, dès le début des années 2000, un programme de valorisation de ces ressources. En 2001, la création de l'Office National de l'Assainissement (ONA) marque une étape clé dans cette démarche, avec pour mission de protéger l'environnement et de mettre fin aux rejets sauvages d'eaux usées sur l'ensemble du territoire (Rouha, 2012)

6. Les normes Algérienne de la réutilisation des eaux usées épurées :

En ce qui concerne les normes physico-chimiques, la réglementation algérienne a suivi avec rigueur les directives de (JORA, 2006) , comme : DBO, DCO, MES, Nitrate, Conductivité, Phosphore total.(Tableau.2)

Tab 2. Normes nationales de la réutilisation des eaux usées épurées (JORA, 2006).

Paramètres	unité	Normes d'utilisation la norme Algérienne N°17683
pH	—	6.5-8.34
Température	°C	25-30
MES	mg/l	30
O2 dissous	mg/l	30
Conductivité	Us/cm	3000
DBO5	mg/l	30
DCO	mg/l	90
Nitrates	mg/l	40
Cuivre	mg/l	0.2
Azote total	mg/l	15-10
Phosphore total	mg/l	2

7. Cultures à irriguer avec les eaux usées épurées

La réglementation algérienne de la réutilisation des eaux usées épurées en agriculture a été préparé par les structures algériennes responsables pour l'introduction des EUE comme alternatives efficaces contre la pénurie des eaux conventionnelles à l'échelle nationale. Dans les zones sahariennes, les ressources en eaux souterraines sont vulnérables et non renouvelables, dont la REUE apparait comme une solution très conseillé. Une nouvelle réglementation algérienne a été établie en 2012 (Arrêté interministériel n° 41- 160 du 02 Janvier 2012), fixant les spécifications des eaux usées épurées utilisées à des fins d'irrigation . Elle a pour objet

de définir les caractéristiques physicochimique et microbiologique pour les eaux épurées destinées à l'irrigation (JORA, 2012). (Tableau. 03)

Tab 3. Les normes algériennes de la réutilisation des eaux usées épurées en agriculture

	Paramètres	Concentration maximale admissible
Physiques	pH	[6,5 ; 8,5]
	MES	30 mg/l
	CE	3 ds/m
	Infiltration le SAR= 0-3 CE	0,2 ds/m
	3-6	0,3 ds/m
	6-12	0,5 ds/m
	12-20 20-40	1,3 ds/m
Chimiques	DBO5	30 mg/l
	DCO	90 mg/l
	Chlorure (Cl)	10 meq/l
	Azote (NO ₃ -N)	30 mg/l
	Bicarbonate (HCO ₃)	8,5 meq/l
Eléments Toxiques	Aluminium	20
	Arsenic	2
	Béryllium	0,5
	Bore	2
	Cadmium	0,05
	Chrome	1
	Cobalt	5
	Cuivre	5
	Cyanures	0,5
	Fluor	15
	Fer	20
	Phénols	0,002
	Plomb	10
	Lithium	2,5
	Manganèse	10
	Mercure	0,01
	Molybdène	0,05
	Nickel	2
	Sélénium	0,02
Vanadium	1	
Zinc	10	

Source : (JORA, 2012) [93]

8. Usages des eaux usées traitées

Les eaux usées épurées peuvent être réutilisées dans plusieurs domaines essentiels

8.1. Usage agricole

Il s'agit de l'application la plus courante, permettant non seulement d'économiser l'eau, mais aussi de valoriser les éléments fertilisants contenus dans les eaux traitées, réduisant ainsi le recours aux engrais chimiques.

8.2. Usage municipal

Elles servent à l'arrosage des espaces verts, au nettoyage des voiries, à l'alimentation des bassins ou plans d'eau, à la lutte contre les incendies, à l'arrosage des terrains de golf et des chantiers, ainsi qu'au compactage des assises routières.

8.3. Usage industriel

Principalement pour le refroidissement des équipements ou des processus industriels.

8.4. Usage forestier

Pour la valorisation sylvicole, notamment dans des projets de reboisement ou d'entretien forestier. (BRL, 2011)

CHAPITRE II

MATERIEL ET METHODES

La plateforme saharienne au sud, caractérisée par des plateaux subtabulaires (type Hamada et Reg), avec des formations géologiques variées.

1.2.1. Reliefs dominants :

Montagnes : Djebel Amour, altitudes de 800 à 1720 m.

Piémonts : Étroits, situés au pied des montagnes et le long des oueds Djedi, Atar et M'zi.

Surfaces subhorizontales : plateaux ondulés dans les zones d'El Houita, Hassi Delaa et Hassi R'mel.

1.2.2. Hautes surfaces (glacis et terrasses) :

Ce sont des surfaces d'érosion à pente douce, constituées de chenaux alluvionnés, terrasses, zones d'épandage, situées au pied des reliefs.

1.2.3. Dépressions (Dayas) :

Dépressions fermées à faible pente, de forme circulaire ou elliptique, atteignant plusieurs centaines de mètres de diamètre, avec présence de *Pistacia atlantica* dans le sud (occupant environ 2 % des parcours).

1.3. Pédologie

Trois grands ensembles pédologiques se distinguent :

- Les piémonts de l'Atlas Saharien,
- La plaine alluviale de l'Oued M'zi,
- Le plateau caillouteux au sud.

Les sols sont généralement peu profonds, salins et calcarifères (Kaddouri, 2021), avec des textures :

- Sableuses à sablo-limoneuses au sud (sols dunaires),
- Alluvionnaires peu évolués autour de l'Oued M'zi,
- Argileuses et plus structurées dans les fonds du nord (Maghni, 2017).

1.4. Hydrographie

Les ressources en eau de surface sont limitées, principalement concentrées dans l'Atlas saharien, en raison d'une pluviométrie faible et irrégulière. Les principaux oueds sont : Oued M'zi, Oued Touil et Oued Medsous.

1.4.1. Le réseau hydraulique comprend

- 163 réservoirs (capacité totale : 86 435 m³),
- 6 retenues collinaires (capacité : 4,432 hm³),

1.4.2. Débit des forages

- 2 462 L/s pour l'eau potable,
- 206 L/s pour l'industrie,
- 6 044 L/s pour l'agriculture.

1.4.3. Capacité totale des nappes phréatiques : 4,93 hm³. (ACC, 2024)

1.5. Climat et bioclimat

D'après les données de l'ONM (2005–2014) analysées par Amrani (2021), la wilaya se répartit entre :

- Un climat méditerranéen au nord,
- Un climat désertique au sud.

1.5.1. Températures :

- Janvier est le mois le plus froid : de +2,3°C à -3,65°C à Laghouat.
- Juillet est le plus chaud : jusqu'à 39,74°C.
- Températures moyennes annuelles : 18,83°C à Laghouat.

1.5.2. Précipitations :

- Moyennes annuelles (2005–2014) : 163,05 mm à Laghouat.
- Saisons pluvieuses : de septembre à mars, avec un pic en septembre (Laghouat)

Variabilité annuelle : 38 % à Laghouat.

1.5.3. Régime saisonnier :

Une altération de régimes saisonnier entre le début et la fin du siècle au niveau à Aflou, qui s'est changé trois fois en 100 ; la première étant Automne, Printemps, Hiver, Eté, tandis que la deuxième séquence est de type Printemps, Hiver, Automne, Eté et La troisième et de type Printemps, Automne, Hiver, Eté. Cependant, à Laghouat le régime saisonnier n'a subi aucun changement, le régime est de type Automne, Printemps, Hiver, Eté.

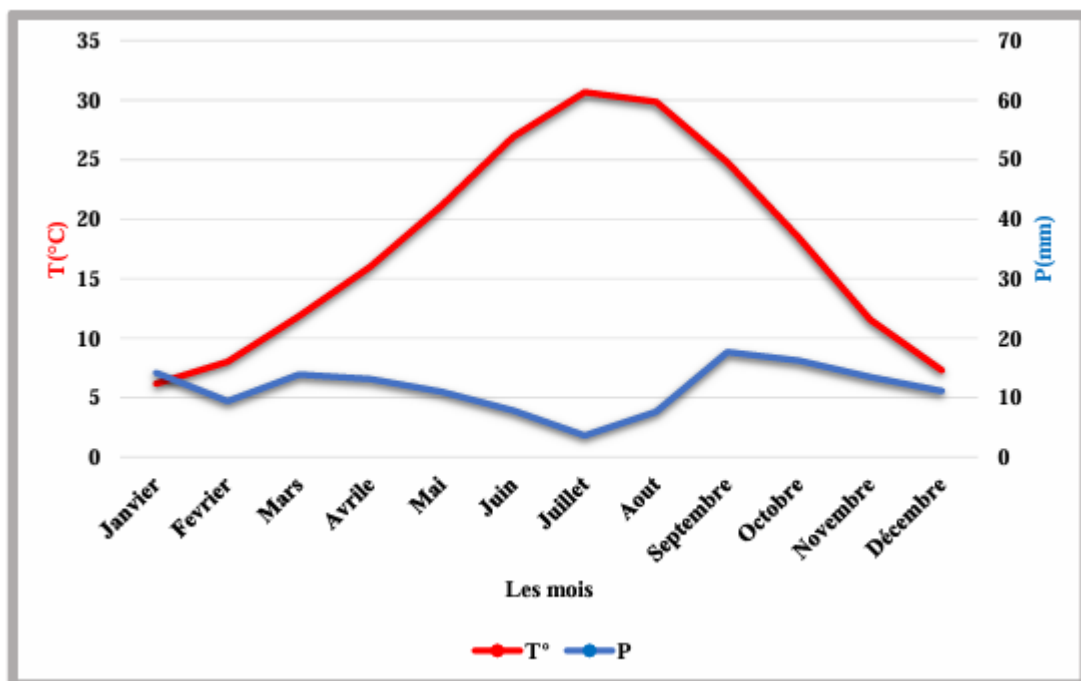


Fig16 . Diagramme ombrothermique de Bagnols et Gausse de la région de Laghouat durant la période (1981-2019).

1.5.4. Les Paramètres bioclimatiques :

- **Indices de De Martonne** : climat subaride stable depuis 1913.
- **Saison sèche** : 12 mois à Laghouat.

- **Climatogramme d’Emberger** : Laghouat : d’aride inférieur (1946) à saharien selon les données de l’O.M.N ,2004 et 2014).

2. Présentation de la STEP de Laghouat

La station d’épuration des eaux usées (STEP) de Laghouat se situe au sud-est du chef- lieu de la wilaya, à environ un kilomètre de la ville. Elle est implantée sur un site faisant partie du plateau saharien, et est actuellement gérée par l’Office National de l’Assainissement (ONA) de la wilaya de Laghouat.

Le site est délimité par : Oued M’zi au sud-est, BENACEUR BENCHOHRA au sud- ouest, El Assafia à l’ouest, Kef Serridja au nord, et Laghouat ville à l’est. Les coordonnées Lambert des points représentatifs du site sont disponibles pour localisation précise.



Fig17. Localisation de la STEP-Laghouat (Google Earth, 2025)

3. Présentation de la région de Hassi R’mel

3.1. Situation géographique de Hassi R’Mel

Situé en Algérie à 100 km au sud de la wilaya de Laghouat (520 Km au sud de la capitale Alger) et considéré une des zones industrielles les plus importantes en Algérie grâce a ses réserves de gaz. La ville est exposée aux rejets industriels atmosphériques (Taibi et *al*, 2022) et donc on l’a pris comme un site pollué.

3.2. Le climat de Hassi R'Mel

Le climat de Hassi R'mel se caractérise par de forts contrastes thermiques, avec des étés torrides et des hivers froids, bien que les précipitations restent faibles tout au long de l'année. Un autre élément marquant est la présence du sirocco, un vent chaud et sec provenant du Sahara, lié aux dépressions estivales. Ce phénomène, rare en hiver, apparaît dès le mois de mai et devient de plus en plus fréquent jusqu'en août. L'ensemble de ces conditions climatiques constitue une véritable contrainte au développement de la végétation.

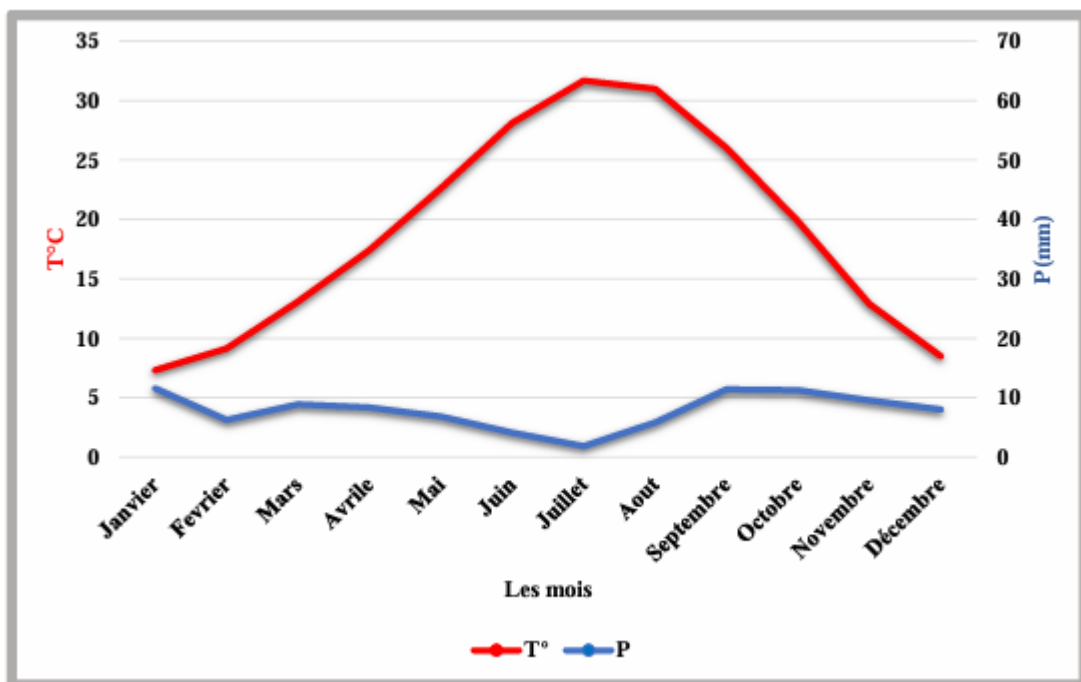


Fig18. Diagramme ombrothermique de BAGNOLS et GAUSSEN de la région de Hassi R'mel durant la période (1981-2019)

3.3. Situation géographique de La STEP de Hassi R'Mel :

La station d'épuration des eaux usées (STEP) de Hassi R'Mel se situe à environ 9 kilomètres dans l'Est de la zone industrielle Hassi R'Mel, le site est délimité par BELIL au Nord et HASSI DELAA au EST et wilaya de Ghardaïa dans le sud.



Fig19. Localisation de la STEP-HRM (Google Earth, 2025)

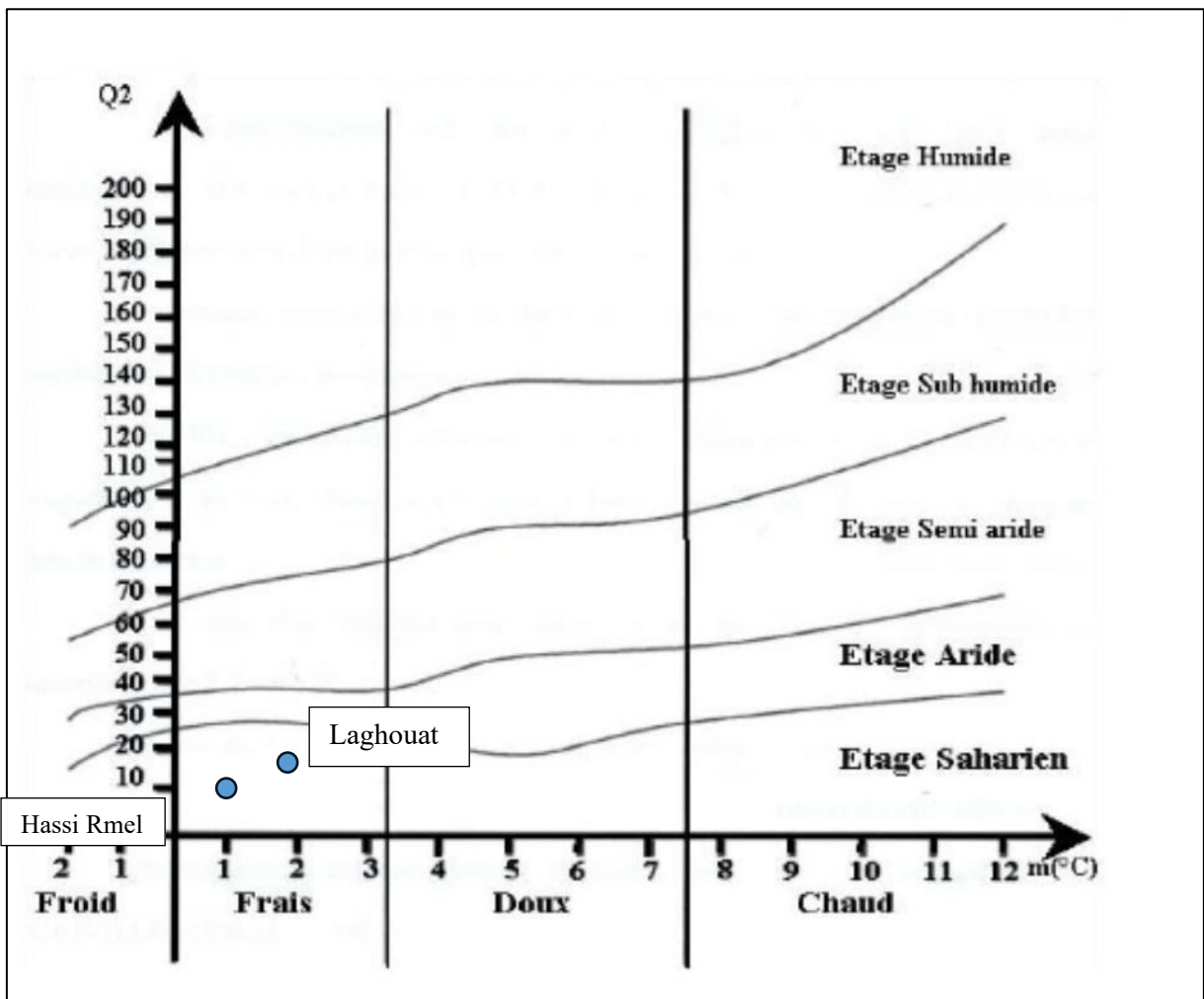


Fig20. L'étage bioclimatique des régions de Laghouat et Hassi R'mel

4. Analyse des eaux aux laboratoires

4.1. Les paramètres physico-chimiques et biologiques

Les analyses physico-chimiques des eaux usées et les eaux épurées ont été réalisées durant la période allant du 01 Mai 2025 au 18 Mai 2025, afin d'évaluer plusieurs paramètres essentiels tels que le pH, la conductivité électrique, la température, les matières en suspension (MES), la demande chimique en oxygène (DCO), la demande biologique en oxygène sur 5 jours (DBO5), l'oxygène dissous, ainsi que la concentration en nitrites (NO_2^-), nitrates (NO_3^-) et phosphates (PO_4^{3-}). Ces analyses permettent de mieux comprendre la qualité de l'eau et son aptitude à être réutilisée. Tous les paramètres concernés ont été mesurés à l'entrée des deux stations (eaux usées), et à la sortie (eaux épurées) après traitement des deux stations. Les échantillons prélevés à l'entrée et à la sortie de chaque station (STEP-Laghouat et STEP-Hassi R'mel) nous ont permis l'estimation des paramètres d'après la méthode HACH (standard méthode for examination of water and waste water).

Toutes les analyses ont été effectuées aux laboratoires d'analyses des deux stations d'épuration.

4.1.1. La température :

- Les deux paramètres (la température et la conductivité) sont mesurés à l'aide d'un multi paramètre



Fig21. Mesure la température (Originale, 2025)

4.1.2. Le potentiel hydrogène (pH)

Il s'agit de la mesure l'acidité ou la basicité d'une solution, en quantifiant la concentration en ions H^+ . Il est déterminé à l'aide d'un pH-mètre, (voir la figure 20) instrument standard dans les laboratoires de traitement des eaux (Rodier, 1996).



Fig22. Mesure de pH (Originale, 2025)

4.1.3. La conductivité électrique (CE) :

Pour mesurer la conductivité d'une solution, commencez par prélever une prise d'essai de 50 mL à l'aide d'une pipette et versez-la dans un bécher propre. Rincez ensuite abondamment l'électrode avec de l'eau distillée pour éliminer tout résidu. Introduisez délicatement l'électrode dans la solution à analyser, puis allumez le multi paramètre en appuyant sur la touche POWER, suivi de la touche ENT pour sélectionner le mode de mesure de la conductivité (Fig 22). Attendez que la valeur affichée se stabilise avant de la relever. Une fois la mesure terminée, rincez soigneusement la sonde à l'eau distillée pour assurer sa propreté et sa durabilité.



Fig23. Mesure la conductivité (Originale, 2025)

4.1.4. Les matières en suspension (MES) :

Avant la pesée, le filtre à vide doit être lavé à l'eau distillée puis séché à l'étuve entre 100°C et 105°C. Une fois refroidi dans un dessiccateur, le filtre est pesé pour obtenir la masse initiale (P_1). Ensuite, le dispositif de filtration sous vide est mis en marche, et la prise d'essai de 100 mL est versée sur le filtre. Après filtration, le récipient et le filtre sont rincés à l'eau distillée pour éliminer tout résidu. Le filtre est ensuite séché à 105°C pendant 30 minutes, refroidi à nouveau dans le dessiccateur, puis repesé pour déterminer la masse finale (P_2). La différence entre P_1 et P_2 permet de calculer la quantité de matières retenues.



Fig24. Incinération les papiers filtre (Original, 2025)



Fig25. Estimation des matières en suspension (Original, 2025)

4.1.5. La demande chimique en oxygène (DCO) :

Pour analyser la Demande Chimique en Oxygène (DCO) d'un échantillon d'eau, commencez par homogénéiser l'eau en l'agitant pendant 2 minutes. Allumez ensuite le réacteur à DCO et préchauffez-le à 150°C. Prenez un tube de réactif, retirez son bouchon et, en l'inclinant à 45°, introduisez 2 mL de l'échantillon à analyser. Préparez un blanc en suivant les mêmes étapes, mais en utilisant de l'eau distillée à la place de l'échantillon. Placez les tubes dans le réacteur et chauffez-les pendant 2 heures à 150°C. Une fois le temps écoulé, éteignez le réacteur et laissez refroidir les tubes sur un portoir (Fig 25).



Fig26. Estimation de la DCO (Original, 2025)

4.1.6. La demande biologique en oxygène sur 5 jours (DBO₅) :

Mettez en marche l'incubateur à 20°C. Placez un barreau magnétique dans le flacon, ajoutez des pastilles de NaOH sur le support en caoutchouc et fermez partiellement le bouchon. Après 1h d'agitation et d'équilibrage thermique, scellez hermétiquement avec un capillaire et ajustez l'échelle du mercure. Relevez quotidiennement les valeurs pendant 5 jours. Le résultat final (consommation d'oxygène en mg/L) s'obtient en multipliant la lecture du 5^{ème} jour par le facteur de conversion approprié.



Fig27. Estimation de DBO_5 (Original, 2025)

4.1.7. L'ammonium :

Allumez le spectrophotomètre DR 850 avec la touche EXIT, puis sélectionnez le programme dédié à l'azote ammoniacal via la touche PGM. Préparez deux cellules en verre l'une avec 25 mL d'échantillon, l'autre avec 25 mL d'eau distillée (blanc). Ajoutez une gélule de réactif salicylate dans chaque cellule, agitez pour homogénéiser, et lancez un timer de 3 minutes (touche TIMER). Après la sonnerie, ajoutez une gélule de cyanurates, agitez à nouveau, et relancez un timer de 15 minutes. Une fois le temps écoulé, étalonnez l'appareil avec le blanc (ZERO), puis mesurez l'échantillon (READ) pour obtenir la concentration en mg/L de N-NH_4

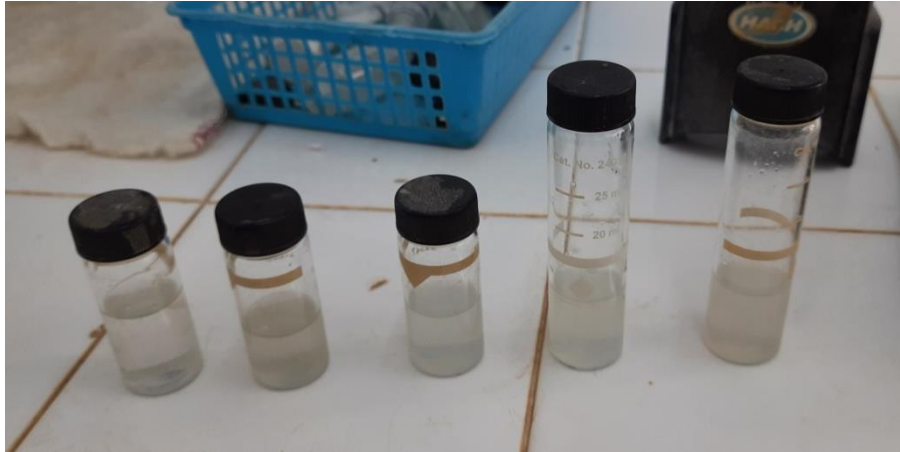


Fig28.Estimation de l'ammonium (Original, 2025)

4.1.8. Nitrites :

Pour commencer l'analyse, allumez le spectrophotomètre DR850 en appuyant sur la touche EXIT. Sélectionnez ensuite le programme dédié aux nitrites en entrant le code correspondant. Appuyez sur 80 puis validez avec la touche ENTER pour paramétrer la mesure. Préparez l'échantillon en remplissant un flacon de 25 mL avec l'eau à analyser. Ajoutez ensuite le contenu d'une gélule de réactif NitraVer 2 dans le flacon. Agitez vigoureusement pendant une minute pour assurer une homogénéisation parfaite du mélange. Enfin, lancez le chronomètre intégré de l'appareil en appuyant sur la touche TIMER pour initier le temps de réaction nécessaire avant la mesure. Cette procédure permet d'obtenir une détermination précise de la concentration en nitrites dans l'échantillon.

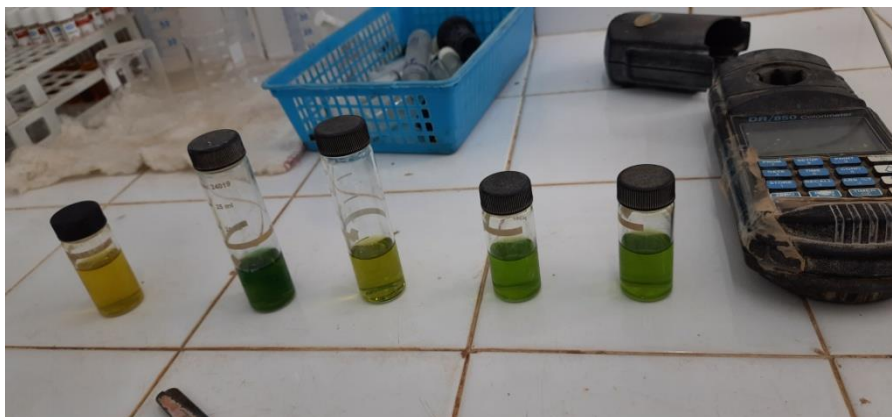


Fig29.Estimation de Nitrite (Original, 2025)

4.1.9. Nitrate :

Allumez le DR850 avec la touche EXIT, puis sélectionnez le programme nitrates. Appuyez sur SO et validez par ENTER. Préparez deux cellules : l'une avec 25 mL d'échantillon + gélule NitraVer 5 (agitée 1-5 min), l'autre avec 25 mL d'échantillon non traité (blanc). Après agitation simultanée des deux flacons pendant 1 min, lancez le timer (TIMER). À la sonnerie, étalonnez avec le blanc (ZERO), puis mesurez l'échantillon traité (READ) pour obtenir la concentration en mg/L de NO_3^- .

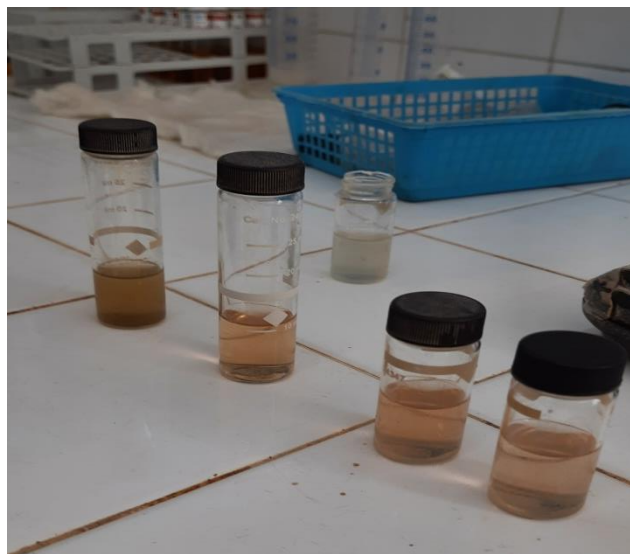


Fig30. Estimation Nitrate (Original, 2025)



Fig31. Estimation de (NO_3) et (NO_2) par Spectrophotomètre (Original, 2025)

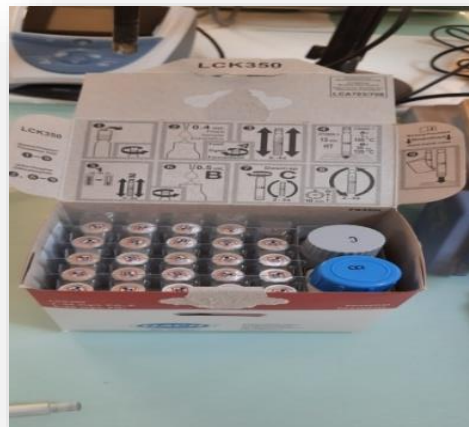


Fig32. Estimation des nitrites et nitrates (Original, 2025)

4.1.10. Phosphate :

Allumez le DR850 (touche EXIT), sélectionnez le programme phosphore (79 puis ENTER). Préparez deux flacons : l'un avec échantillon + gélule PhosVer3 (agitée 2 min), l'autre avec échantillon seul (blanc). Après le signal sonore, étalonnez avec le blanc (0), puis mesurez l'échantillon traité (READ) pour obtenir la concentration en mg/L de PO_4^{3-} .



Fig33.Estimation de Phosphate (Original, 2025)

CHAPITRE III

RESULTATS ET DISCUSSIONS

1. Résultats

Tab 2 . Résultats des analyses physico-chimiques des eaux usées épurées (sortie) :

Paramètres	unité	Normes d'utilisation	Moyenne HRM	Conformité(+) Non conformité(-)	Moyenne Laghouat	Conformité(+) Non Conformité(-)
pH	—	6.5-8.34	10,958	-	7,38125	+
Température	°C	25-30	2,882	+	15,27	+
MES	mg/l	30	10,25	+	43,8125	-
O2 dissous	mg/l	30	/	/	/	/
Conductivité	Us/cm	3000	2194,941176	+	2662,5	+
DBO5	mg/l	30	10,35	+	55,5	-
DCO	mg/l	90	10,33	+	252	-
Nitrates	mg/l	40	11,928	+	0,74	+
Cuivre	mg/l	0.2	/	/	/	/
Azote total	mg/l	15-10	/	/	/	/
Phosphore total	mg/l	2	4,422	-	1,53	+
Ammoniac	mg/l	30	0,216666667	+	0,895	+
Nitrites	mg/l	1	0,012857143	+	0,028	+

Non-conformité (-) / Conformité (+)

1.1. Analyse des températures

La figure 34 représente les valeurs des températures avant et après traitement des eaux usées par les stations STEP-HRM (Hassi R'mel) et STEP-Laghouat.

Dans la STEP-HRM, les températures avant traitement varient entre 20°C et 24°C, avec une médiane de 22°C. Après traitement, les températures restent identiques, oscillant entre 20°C et 24°C, avec une médiane stable à 22°C, et aucune différence significative n'est observée ($p = 0.99$). Dans la STEP-Laghouat, les températures avant traitement varient entre 16°C et 18°C, avec une médiane de 17°C. Après traitement, les températures sont légèrement plus basses, variant entre 14°C et 16°C, avec une médiane de 15°C, et cette différence est statistiquement significative ($p = 0.00066$).

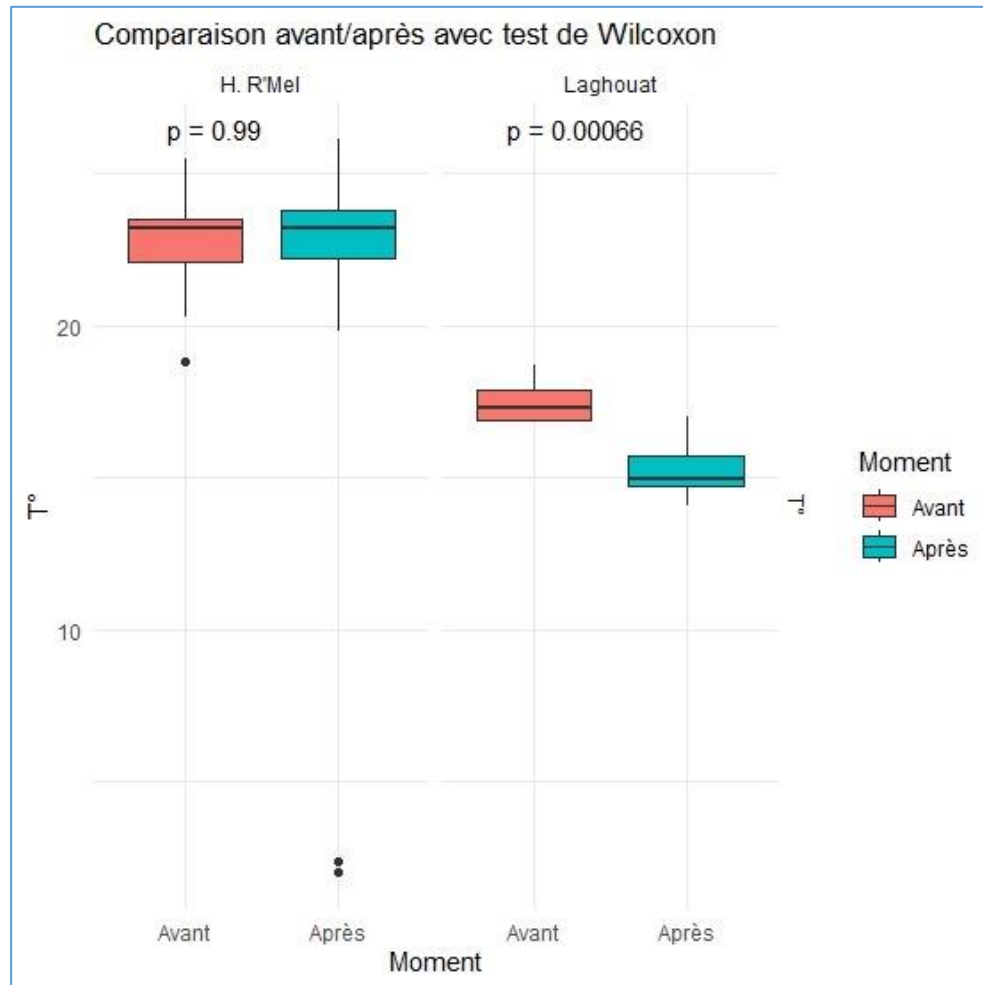


Fig34. Comparaison de T°C avant et après traitement dans les deux stations (STEP-HRM et STEP-Laghouat) par le test de Wilcoxon

1.2. Analyse du pH

La figure 35 représente les valeurs de pH avant et après traitement des eaux usées par les stations STEP-HRM (Hassi R'mel) et STEP-Laghouat.

Le pH de l'eau dans la STEP-HRM avant traitement varie entre 7.5 et 8.1, avec une médiane autour de 7.8. Après traitement, le pH est légèrement abaissé, variant de 7.3 à 7.7, avec une médiane proche de 7.5, et la baisse est statistiquement significative ($p = 0.0038$). Dans la STEP-Laghouat, le pH avant traitement varie entre 7.4 et 7.7, avec une médiane de 7.6. Après traitement, le pH varie légèrement entre 7.0 et 7.6, avec une médiane de 7.2, mais la différence n'est pas statistiquement significative ($p = 0.23$).

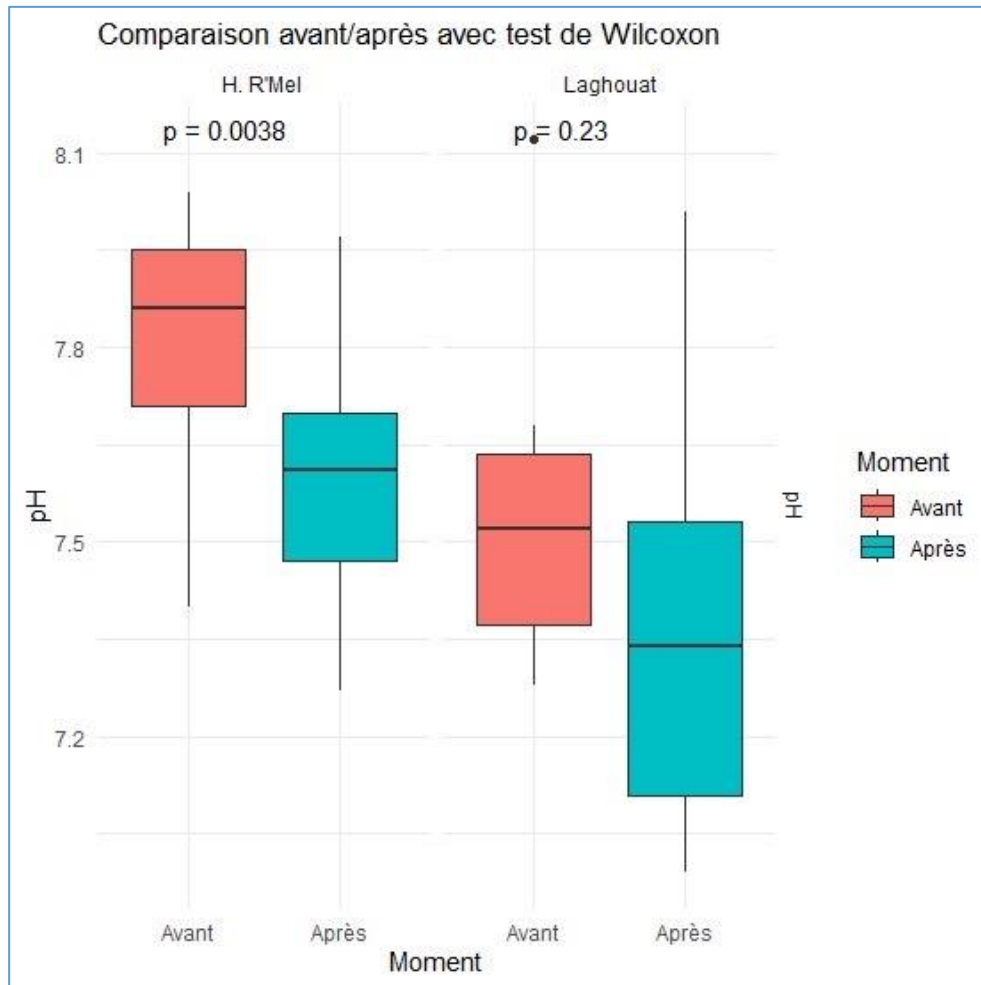


Fig35. Comparaison de pH avant et après traitement dans les deux stations (STEP-HRM et STEP-Laghouat) par le test de Wilcoxon

1.3. Analyse de la conductivité

La figure 36 présente les résultats de la conductivité avant et après traitement des eaux usées par les stations d'épuration STEP-HRM (Hassi R'mel) et STEP-Laghouat

La conductivité de l'eau avant traitement dans la STEP-HRM varie entre 3200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (valeur maximale) et 2700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (valeur minimale). Après traitement, ces valeurs diminuent, oscillant entre 2300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ce qui témoigne d'une réduction de la conductivité. De même, dans la STEP-Laghouat, avant traitement, la conductivité varie entre 3500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (maximum) et 2900 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (minimum), tandis qu'après traitement, elle fluctue entre 3300

$\mu\text{S/cm}$ (maximum) et $2800 \mu\text{S/cm}$ (minimum). Cette diminution modérée après traitement est observable, mais moins marquée dans la STEP-HRM.

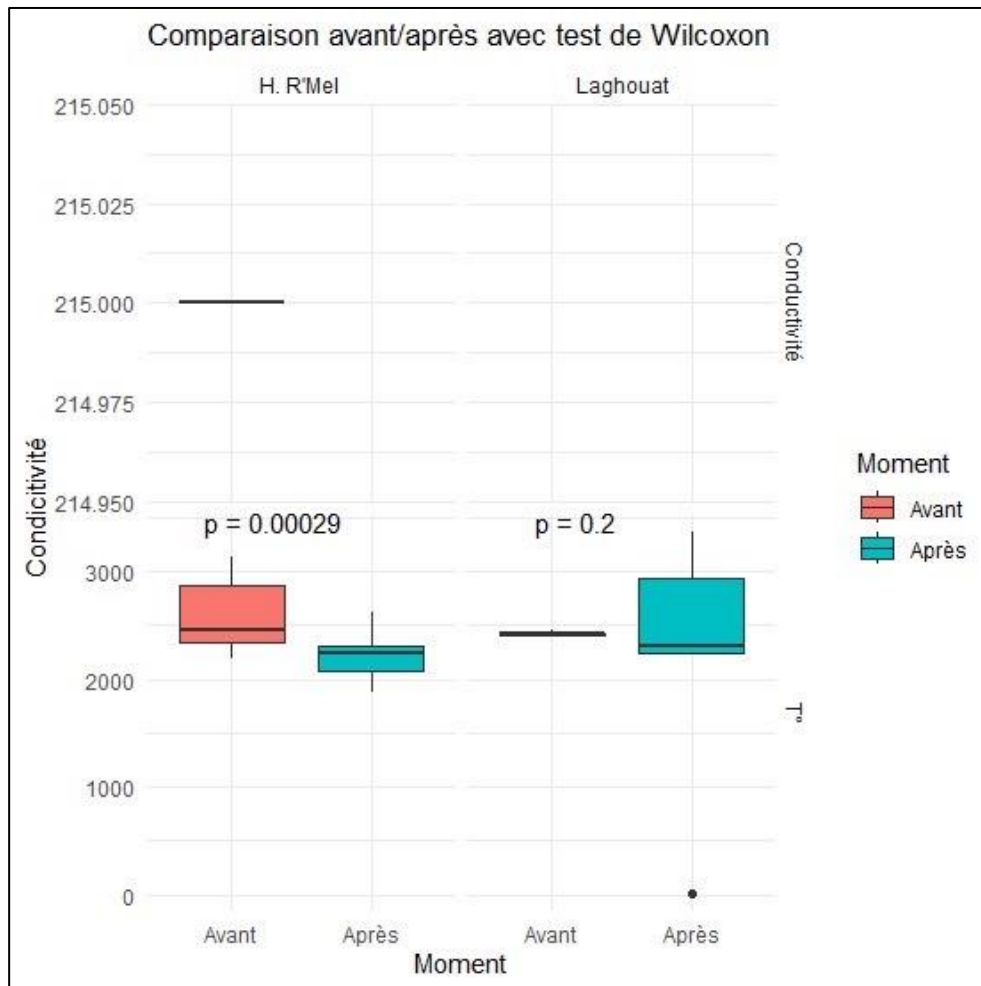


Fig36. Comparaison de la conductivité avant et après traitement dans les deux stations (STEP-HRM et STEP-Laghouat) par le test de Wilcoxon

1.4. Analyse des MES (Matières En Suspension)

Ce graphique illustre l'évolution des Matières en Suspension (MES) avant et après traitement des eaux usées par les stations STEP-HRM (Hassi R'mel) et STEP-Laghouat.

Les matières en suspension dans la STEP-HRM avant traitement se situent entre 100 mg/L (minimum) et 250 mg/L (maximum), avec une médiane autour de $180\text{-}200 \text{ mg/L}$. Après traitement, les valeurs des MES sont significativement réduites, oscillant entre 10 mg/L et 30

mg/L. Dans la STEP-Laghouat, avant traitement, les MES varient entre 290 mg/L et 340 mg/L, avec une médiane autour de 310-320 mg/L. Après traitement, elles diminuent à des valeurs de 20 mg/L à 40 mg/L, mais restent relativement plus élevées que celles observées dans la STEP-HRM.

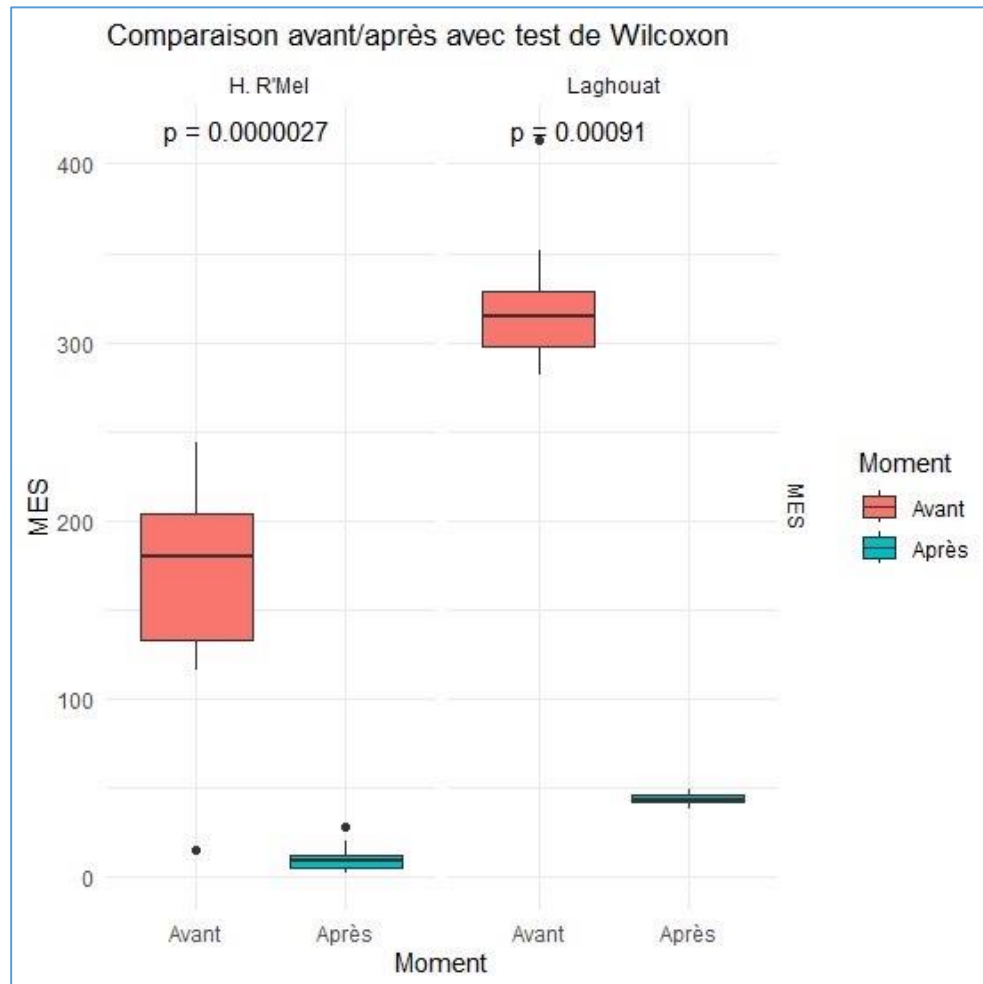


Fig37. Comparaison de MES avant et après traitement dans les deux stations (STEP-HRM et STEP-Laghouat) par le test de Wilcoxon

1.5. Analyse de la DCO (Demande Chimique en Oxygène)

La figure 38 représente l'évolution de la Demande Chimique en Oxygène (DCO) avant et après traitement des eaux usées par les stations STEP-HRM (Hassi R'mel) et STEP-Laghouat.

Dans la STEP-HRM, avant traitement, la DCO varie entre 250 mg/L (minimum) et 400 mg/L (maximum), et après traitement, elle tend vers des valeurs proches de zéro, indiquant une

réduction marquée de la pollution organique. En revanche, dans la STEP-Laghouat, avant traitement, la DCO fluctue entre 450 mg/L (minimum) et 700 mg/L (maximum). Après traitement, elle se stabilise entre 200 mg/L (minimum) et 350 mg/L (maximum), marquant également une diminution, bien que moins significative dans la STEP-HRM.

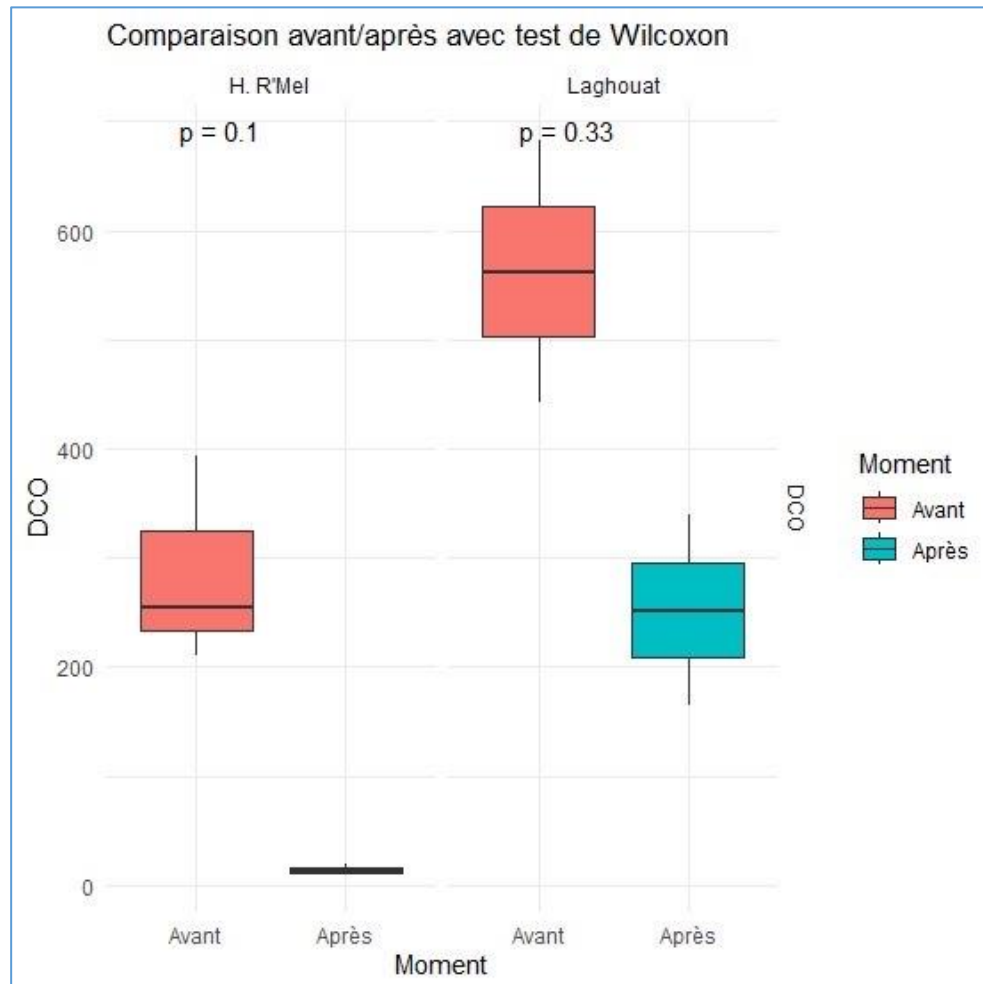


Fig38. Comparaison de DCO avant et après traitement dans les deux stations (STEP-HRM et STEP-Laghouat) par le test de Wilcoxon

1.6. Analyse de la DBO₅ (demande biologique en oxygène)

La figure39 représente l'évolution de la DBO₅ avant et après traitement des eaux usées par les stations STEP-HRM (Hassi R'mel) et STEP-Laghouat.

Concernant la DBO₅, dans la STEP-HRM, avant traitement, les concentrations sont comprises entre 277 mg/L (minimum) et 380 mg/L (maximum). Après traitement, elles diminuent de manière significative, variant entre 60 mg/L (minimum) et 150 mg/L (maximum). Dans la STEP-Laghouat, la DBO₅ avant traitement varie entre 260 mg/L (minimum) et 340 mg/L

(maximum), et après traitement, les concentrations se situent entre 130 mg/L (minimum) et 250 mg/L (maximum), montrant une réduction notable après traitement.

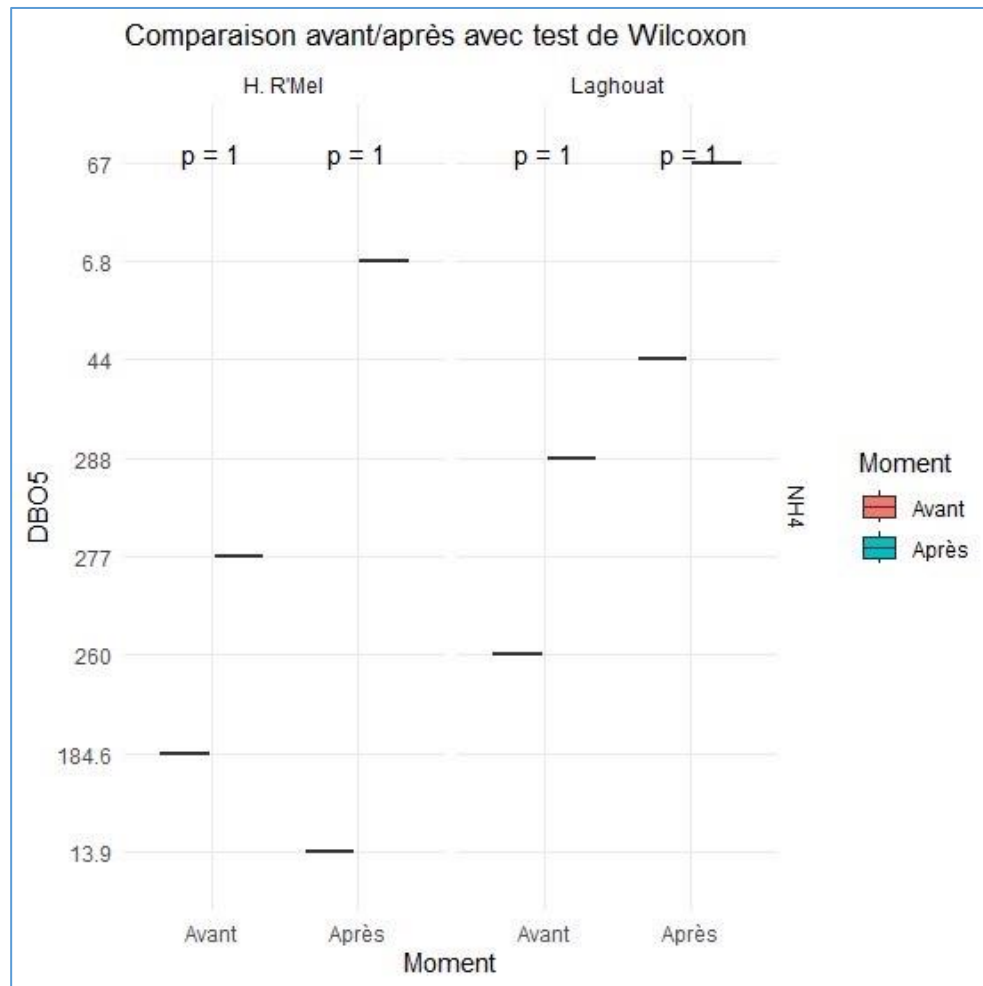


Fig39. Comparaison de DBO₅ avant et après traitement dans les deux stations (STEP-HRM et STEP-Laghouat) par le test de Wilcoxon

1.7. Analyse de l'ammonium

La figure 40 présente les concentrations en Ammonium (NH₄⁺) avant et après traitement par les stations STEP-HRM (Hassi R'mel) et STEP-Laghouat.

Dans la STEP-HRM, les concentrations en ammonium avant traitement varient entre 0.8 mg/L et 1.5 mg/L, avec une médiane autour de 1.0 mg/L. Après traitement, les concentrations chutent près de zéro, indiquant une élimination presque totale de l'ammonium. Dans la STEP-Laghouat, les concentrations sont exceptionnellement élevées avant traitement, variant entre 95

mg/L et 100 mg/L, avec une médiane proche de 97 mg/L. Après traitement, les concentrations tombent à 0 mg/L, indiquant une élimination complète de l'ammonium.

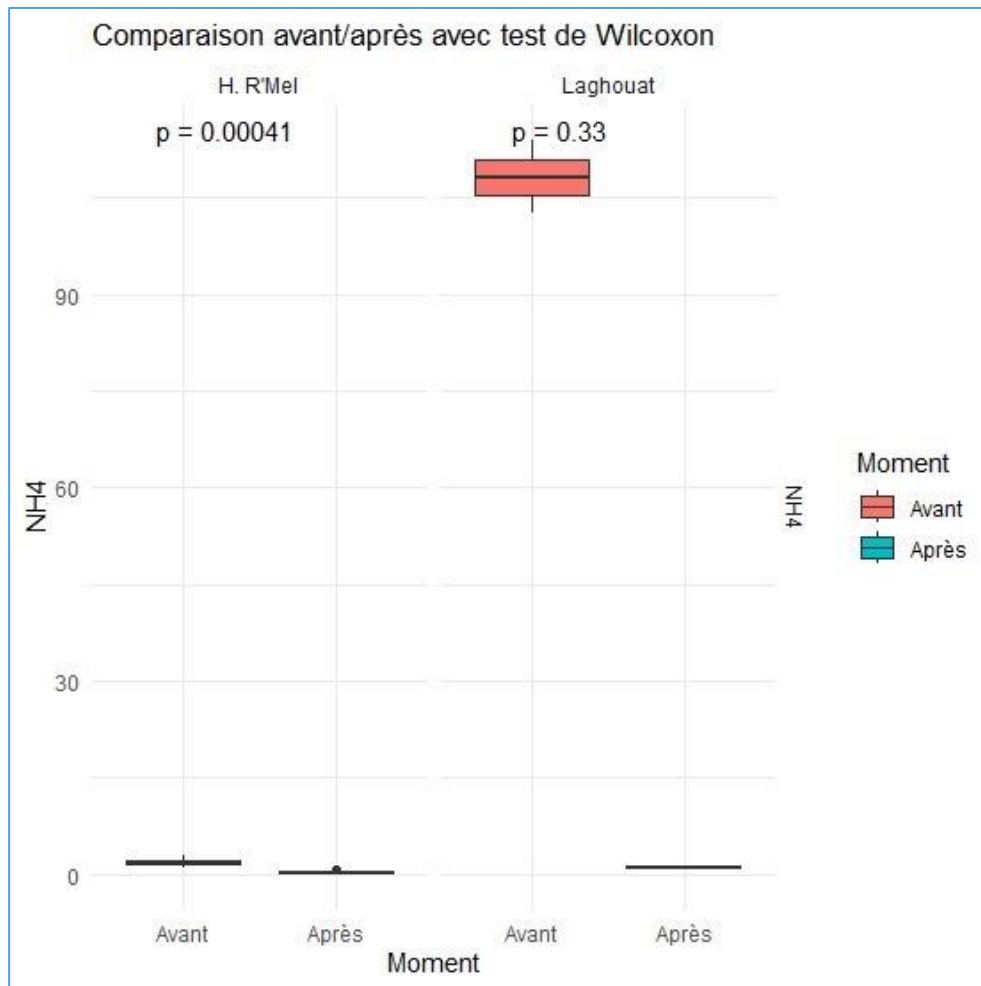


Fig40. Comparaison des concentrations de NH_4 avant et après traitement dans les deux stations (STEP-HRM et STEP-Laghouat) par le test de Wilcoxon

1.8. Analyse des nitrites

La figure 41 présente les concentrations en nitrites (NO_2^+) avant et après traitement par les stations STEP-HRM (Hassi R'mel) et STEP-Laghouat.

Dans la STEP-HRM, les concentrations en nitrites avant traitement varient entre 0.05 mg/L et 0.15 mg/L, avec une médiane autour de 0.10 mg/L. Après traitement, une réduction importante est observée, les concentrations étant proches de 0.01-0.02 mg/L, avec des valeurs maximales inférieures à 0.03 mg/L. Dans la STEP-Laghouat, les concentrations avant traitement restent

relativement stables autour de 0.09 mg/L. Après traitement, une légère réduction est notée, avec des valeurs variant entre 0.02 mg/L et 0.03 mg/L, bien que cette diminution ne soit pas statistiquement significative ($p = 0.33$).

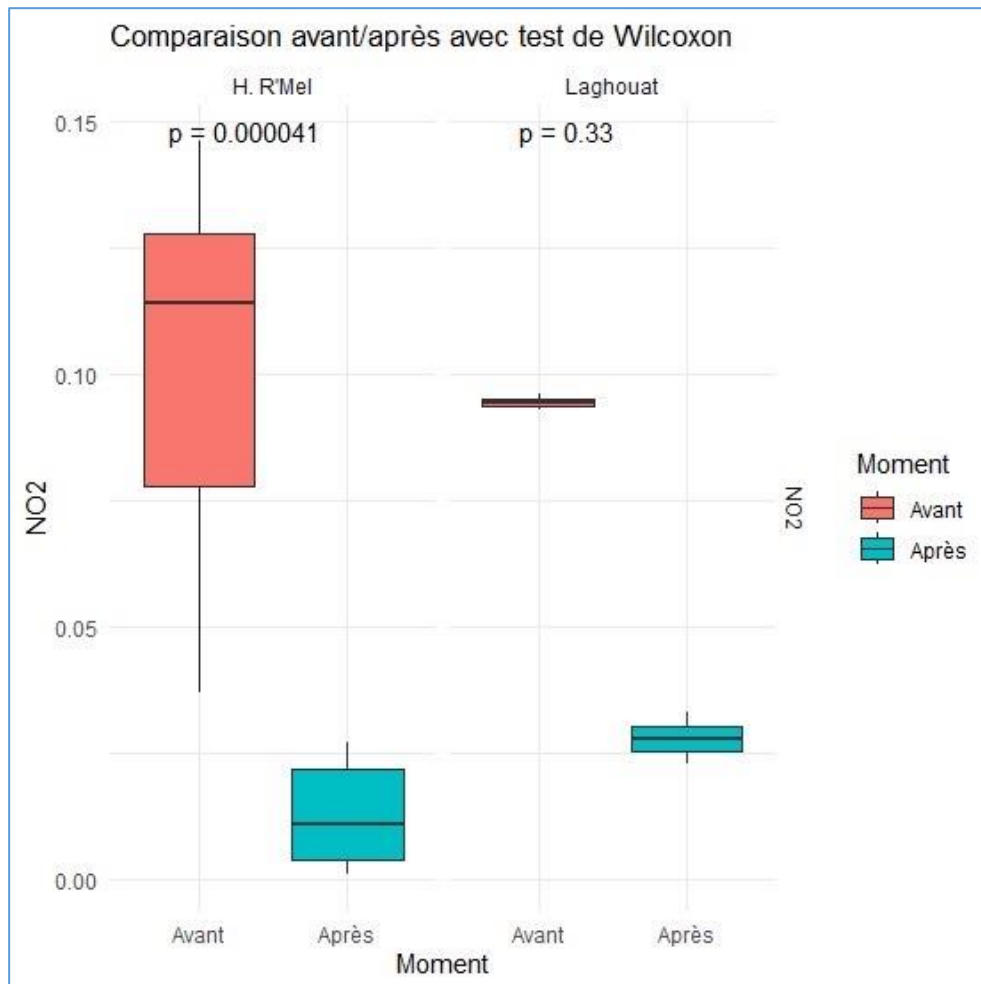


Fig41. Comparaison des concentrations de NO₂ avant et après traitement dans les deux stations (STEP-HRM et STEP-Laghouat) par le test de Wilcoxon

1.9. Analyse des Nitrates

La figure 42 présente les concentrations en Nitrates (NO₃⁻) avant et après traitement des eaux usées par les stations STEP-HRM (Hassi R'mel) et STEP-Laghouat.

Les concentrations en nitrates dans la STEP-HRM avant traitement varient de <1 mg/L à plus de 85 mg/L, avec une dispersion marquée. Après traitement, aucune réduction significative n'est observée ($p = 1$). Dans la STEP-Laghouat, une tendance similaire est notée, avec des concentrations allant de <1 mg/L à 85 mg/L, et aucune réduction significative après traitement, les valeurs restant identiques ($p = 1$).

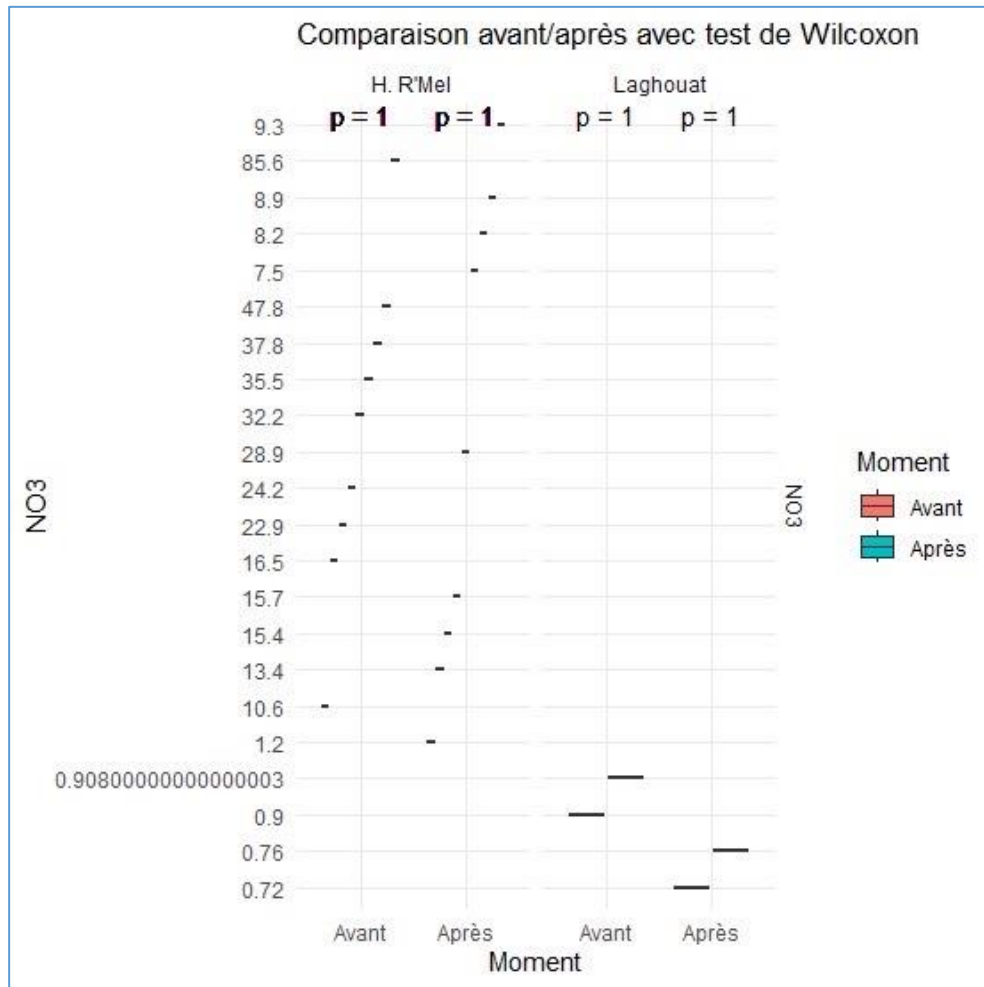


Fig42. Comparaison des concentrations de NO₃ avant et après traitement dans les deux stations (STEP-HRM et STEP-Laghouat) par le test de Wilcoxon

1.10. Analyse des phosphates

La figure 43 représente les concentrations en phosphates avant et après traitement des eaux usées par les stations STEP-HRM (Hassi R'mel) et STEP-Laghouat.

Dans la STEP-HRM, les concentrations de phosphates avant traitement varient entre 2 mg/L et 3.5 mg/L, avec une médiane autour de 2.5 mg/L. Après traitement, les concentrations augmentent de manière significative, atteignant des valeurs comprises entre 4.5 mg/L et 5 mg/L, avec une médiane proche de 4.8 mg/L, cette hausse étant statistiquement significative ($p = 0.000082$). Dans la STEP-Laghouat, les concentrations avant traitement varient entre 3.5 mg/L et 4.5 mg/L, avec une médiane d'environ 4 mg/L. Après traitement, elles chutent de

façon nette à des valeurs proches de 0 mg/L, bien que cette réduction ne soit pas statistiquement significative ($p = 0.22$).

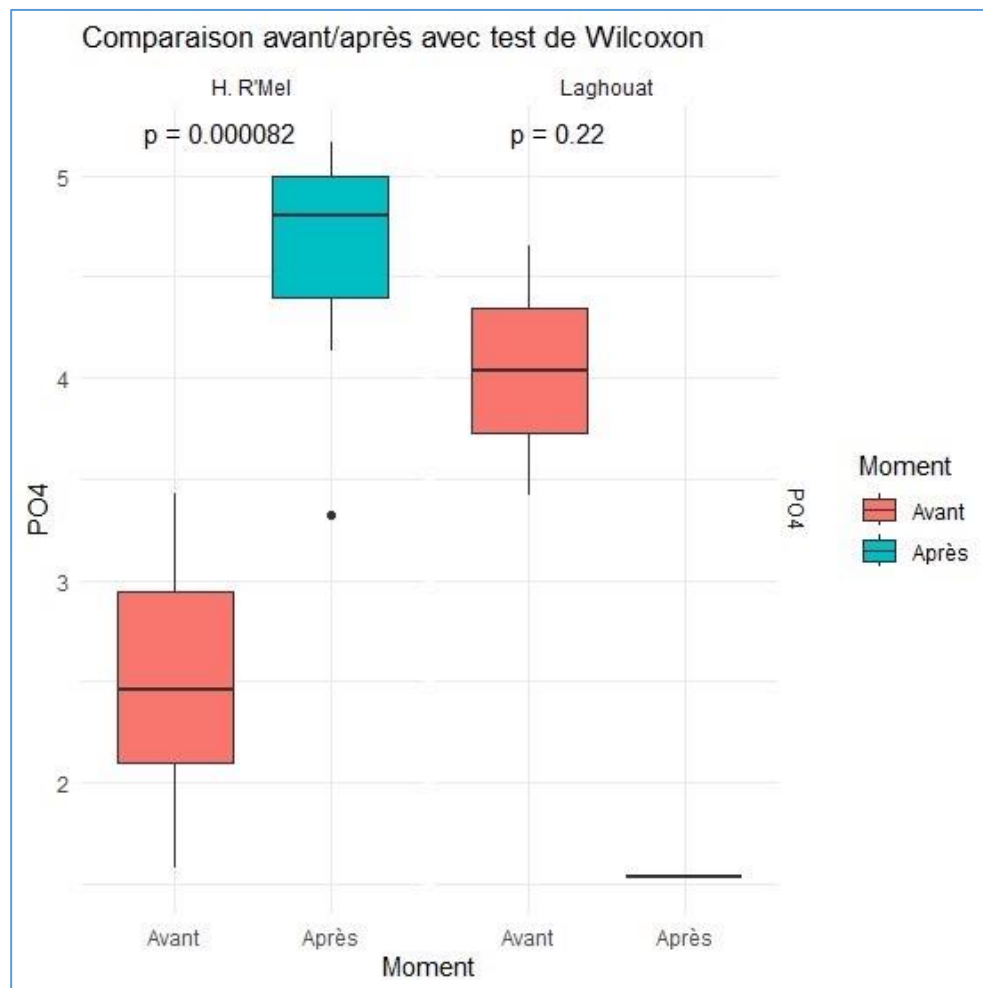


Fig43. Comparaison des concentrations de PO₄ avant et après traitement dans les deux stations (STEP-HRM et STEP-Laghouat) par le test de Wilcoxon

2. Discussion

2.1 La température et la réutilisation agricole

La température de l'eau est un facteur important, bien que souvent négligé, dans l'évaluation de la qualité des eaux destinées à l'irrigation. Elle influence :

- La solubilité des nutriments.
- L'activité microbienne dans les sols.
- Le métabolisme des plantes.
- La vitesse d'évaporation et d'infiltration.

Selon l'OMS (2006), il n'existe pas de norme stricte sur la température de l'eau d'irrigation, mais des valeurs modérées (généralement comprises entre 10°C et 25°C) sont considérées comme optimales pour la plupart des cultures.

- Dans la STEP-HRM, la température reste stable avant et après traitement, ce qui est conforme aux attentes. Cette stabilité est favorable à la réutilisation de l'eau en agriculture, car elle n'engendre pas de stress thermique supplémentaire pour les plantes.
- Dans la STEP-Laghouat, on observe une diminution significative de la température après traitement. Bien que la température finale reste dans une plage acceptable pour l'irrigation, cette baisse peut indiquer un phénomène de refroidissement au sein du processus de traitement, possiblement lié à un stockage prolongé ou à un processus physique spécifique (aération, bassin à ciel ouvert).

Ces observations ne remettent pas en cause la qualité de l'eau pour l'irrigation, mais doivent être prises en compte pour éviter des chocs thermiques si l'eau est utilisée pour irriguer des cultures sensibles à la température.

- Hussain et al. (2017) précisent que la température optimale de l'eau d'irrigation doit être adaptée aux cultures locales, mais qu'une eau entre 15°C et 25°C est généralement considérée comme idéale.
- Ayers et Westcot (1985) soulignent que des écarts thermiques brusques entre l'eau d'irrigation et l'air ambiant peuvent perturber la croissance des plantes, surtout en milieu aride.

- WHO (2006) rappelle que si la température de l'eau n'a pas d'impact direct sur la salubrité de l'eau, elle influence les phénomènes chimiques et biologiques pouvant affecter les sols.

2.2 Le pH et la réutilisation agricole

Le pH de l'eau est un paramètre fondamental pour la qualité de l'eau d'irrigation. Des valeurs de pH trop acides (<6.5) ou trop basiques (>8.5) peuvent affecter la disponibilité des nutriments pour les plantes, endommager les systèmes d'irrigation (corrosion ou dépôts) et modifier la structure du sol à long terme.

Selon l'OMS (2006, 2017) et la réglementation algérienne, la plage de pH acceptable pour les eaux d'irrigation se situe entre 6.5 et 8.5.

- Les deux stations d'épuration, STEP-HRM et STEP-Laghouat, présentent des valeurs de pH avant et après traitement qui restent globalement dans la plage acceptable pour l'irrigation.
- La baisse significative du pH observée après traitement dans la STEP-HRM reste modérée et conserve l'eau dans des conditions optimales pour l'irrigation.
- Dans la STEP-Laghouat, bien que la baisse du pH ne soit pas statistiquement significative, les valeurs restent proches du seuil inférieur de la norme (7.0 à 7.2), nécessitant une surveillance pour éviter tout glissement en dessous de 6.5 qui compromettrait la qualité agronomique de l'eau.

Des études confirment l'importance du contrôle du pH pour garantir la sécurité des eaux d'irrigation :

- Ayers et Westcot (1985) considèrent qu'un pH entre 6.5 et 8.4 est optimal pour la plupart des cultures.
- Bixio et al. (2006) soulignent que les procédés de traitement des eaux peuvent parfois faire varier le pH, nécessitant des ajustements post-traitement.
- WHO (2017) rappelle que le pH de l'eau influence également la solubilité des métaux et la toxicité éventuelle pour les plantes et les sols.

2.3 La conductivité et la réutilisation de l'eau pour l'agriculture

La conductivité électrique (CE) est un paramètre crucial pour évaluer la salinité de l'eau, qui peut avoir un impact direct sur la qualité du sol et les rendements agricoles. Une conductivité élevée indique une concentration plus élevée de sels dissous, ce qui peut être nuisible pour les plantes si elle dépasse un certain seuil.

Dans le cas de STEP-HRM, on observe une réduction significative de la conductivité après le traitement, avec une baisse marquée allant de 3200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (minimum), ce qui suggère que le traitement est efficace pour éliminer les sels dissous. Cette réduction est conforme aux standards internationaux pour la réutilisation de l'eau d'irrigation. Selon l'OMS, la conductivité de l'eau d'irrigation ne doit pas dépasser 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour éviter des effets négatifs sur les plantes (WHO, 2017).

Cependant, pour STEP-Laghout, la réduction de la conductivité après traitement est moins importante, passant de 3500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (maximum) à 2800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (minimum). Bien que la conductivité reste sous les seuils recommandés par l'OMS (qui préconise une conductivité inférieure à 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour les eaux d'irrigation), cette réduction est insuffisante pour garantir une efficacité optimale dans l'agriculture, notamment pour des cultures sensibles à la salinité du sol.

Une étude menée par Tariq et al. (2020) sur les effets de la conductivité sur les cultures montre que des niveaux de conductivité supérieurs à 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ peuvent avoir des effets négatifs sur des cultures sensibles comme le blé et le riz. Selon l'OMS (2017), la conductivité de l'eau pour l'irrigation ne doit pas excéder 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour éviter des problèmes de salinité. Les résultats de STEP-HRM respectent ces critères, alors que ceux de STEP-Laghout nécessitent une amélioration dans les processus de traitement des sels dissous.

2.4 La MES et impact sur la réutilisation agricole

Les MES représentent les particules solides présentes en suspension dans l'eau. Leur réduction est essentielle non seulement pour améliorer la qualité visuelle de l'eau, mais surtout pour éviter l'obstruction des systèmes d'irrigation (goutte-à-goutte, asperseurs) et limiter les dépôts sur les sols agricoles.

La norme algérienne et les recommandations de l'OMS (2017) fixent des seuils stricts pour les MES dans l'eau réutilisée en agriculture, généralement inférieurs à 30 mg/L, notamment pour éviter l'accumulation de sédiments et les problèmes de colmatage.

- La STEP-HRM présente une réduction très significative des MES après traitement, avec des valeurs conformes aux standards internationaux, ce qui rend l'eau épurée parfaitement adaptée à l'irrigation agricole.
- La STEP-Laghouat montre également une réduction importante des MES, avec des niveaux post-traitement similaires à ceux de STEP-HRM, en-dessous de 40 mg/L, donc proches des exigences de l'OMS et de la réglementation algérienne.

Les travaux de Pescod (1992) et Jiménez (2006) soulignent que des niveaux de MES inférieurs à 35 mg/L sont recommandés pour l'irrigation, particulièrement en cas d'utilisation de systèmes de micro-irrigation.

De plus, une étude de Friedler (2001) montre qu'un traitement efficace des MES améliore non seulement la qualité de l'eau mais limite aussi les risques d'obstruction des canalisations et réduit les impacts négatifs sur la structure des sols.

Ainsi, les performances des deux stations, et en particulier de STEP-HRM, sont conformes à ces recommandations, rendant leur eau traitée techniquement réutilisable dans l'agriculture.

2.5 La DCO et la réutilisation de l'eau pour l'agriculture

La DCO (Demande Chimique en Oxygène) est un indicateur de la quantité de matière organique (biodégradable ou non) présente dans l'eau. Une DCO élevée reflète une pollution importante et une forte concentration de substances organiques susceptibles de provoquer une consommation excessive d'oxygène dans les milieux récepteurs.

La réduction efficace de la DCO est un critère essentiel pour évaluer la performance des stations d'épuration, en particulier dans le cadre de la réutilisation des eaux pour l'irrigation agricole. Selon les recommandations de l'OMS (2017) et les exigences de la législation algérienne (JORA,2011), la DCO des eaux destinées à l'irrigation ne doit généralement pas dépasser 90 mg/L, bien que cette limite puisse varier selon les cultures et les conditions locales.

Dans la STEP-HRM, la réduction spectaculaire de la DCO après traitement (proche de 0 mg/L) témoigne d'une très bonne performance épuratoire. Ces résultats placent l'eau épurée de cette station en conformité avec les standards de l'OMS et de la réglementation nationale, la rendant apte à être utilisée en agriculture, même pour des cultures sensibles.

Dans la STEP-Laghouat, bien qu'on observe une diminution de la DCO, celle-ci reste relativement élevée après traitement (jusqu'à 350 mg/L), ce qui dépasse les normes recommandées pour la réutilisation en agriculture, surtout dans les sols légers ou sensibles à l'accumulation de matière organique.

De nombreuses études confirment que la maîtrise de la DCO est essentielle pour garantir la qualité des eaux épurées, notamment pour des usages agricoles :

- Khan et al. (2019) montrent que des eaux usées avec une DCO inférieure à 150 mg/L peuvent être utilisées en irrigation, à condition de surveiller régulièrement les sols pour éviter la saturation organique.
- Smith et al. (2021) précisent que des concentrations élevées de DCO dans l'eau d'irrigation peuvent entraîner l'accumulation de matière organique dans le sol, perturbant la croissance des plantes et altérant la structure des sols à long terme.

Ces travaux confirment la nécessité d'optimiser le traitement dans la STEP-Laghouat pour garantir la conformité aux normes et assurer une réutilisation durable de l'eau.

2.6 La DBO₅ et la réutilisation de l'eau pour l'agriculture

La DBO₅ est un indicateur clé de la quantité de matière organique dégradable dans l'eau. Une DBO₅ élevée indique une pollution organique importante. La réduction de la DBO₅ après traitement est un signe que les stations d'épuration ont réussi à éliminer une grande partie de la matière organique.

Dans la STEP-HRM, on observe une réduction significative de la DBO₅, avec des valeurs passant de 380 mg/L à 150 mg/L (maximum). Cela indique une élimination efficace de la matière organique, ce qui rend l'eau plus propre et plus appropriée à la réutilisation pour l'irrigation.

Dans la STEP-Laghouat, bien que la réduction soit présente, elle est moins marquée dans la STEP-HRM, avec des valeurs de DBO₅ passant de 340 mg/L à 250 mg/L (maximum). Bien que ces valeurs soient également dans un intervalle acceptable pour l'irrigation, elles sont moins efficaces que celles obtenues par STEP-HRM.

La littérature scientifique stipule que la réduction de la DBO₅ est essentielle pour la réutilisation de l'eau en agriculture, car une DBO₅ élevée peut nuire à la santé des plantes et à la qualité du sol. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) recommande que la DBO₅ dans l'eau d'irrigation ne dépasse pas 30 mg/L à 50 mg/L pour garantir une sécurité optimale pour la culture des plantes (WHO, 2017). Bien que STEP-HRM ait atteint des niveaux proches des standards de l'OMS, STEP-Laghouat n'a pas réduit la DBO₅ à un niveau suffisant pour répondre à ces normes strictes, bien que la qualité de l'eau soit encore acceptable dans une utilisation moins stricte.

La recherche de Liu et al. (2020) suggère qu'un traitement efficace de la DBO₅ est un indicateur de la capacité d'une station d'épuration à améliorer la qualité de l'eau, en la rendant plus sûre pour l'irrigation des cultures. Les résultats de la STEP-HRM sont donc conformes à ces standards, tandis que la STEP-Laghouat pourrait nécessiter des améliorations supplémentaires dans son traitement des matières organiques.

2.7 L'ammonium et la réutilisation Agricole

L'ammonium est un indicateur clé de pollution azotée dans les eaux usées. Des concentrations élevées peuvent indiquer la présence de déchets organiques et d'effluents non traités, avec des risques de toxicité directe pour les plantes, surtout en cas d'irrigation par aspersion ou d'accumulation dans les sols.

Selon les recommandations de l'OMS (2006, 2017), les concentrations maximales acceptables en ammonium dans l'eau destinée à l'irrigation agricole sont de l'ordre de 15-20mg/L, pour éviter les risques de déséquilibres azotés dans les sols et de toxicité pour certaines cultures.

- La STEP-HRM affiche des résultats très satisfaisants, avec une élimination quasi complète de l'ammonium, plaçant l'eau traitée dans une plage parfaitement conforme aux standards internationaux et nationaux pour la réutilisation agricole.

- La STEP-Laghouat présente un cas particulier : malgré des concentrations initiales très élevées (jusqu'à 100 mg/L), le traitement a permis de ramener les concentrations à 0 mg/L, ce qui traduit une très bonne performance ponctuelle. Cependant, les valeurs initiales aussi élevées révèlent un dysfonctionnement potentiel en amont (collecte, prétraitement), et il conviendrait d'évaluer la régularité de cette performance dans le temps.

Les travaux de Tchobanoglous et al. (2014) et Díaz et al. (2019) confirment qu'un traitement efficace de l'ammonium est essentiel pour garantir une réutilisation agricole sûre. Ces auteurs précisent que des concentrations supérieures à 5 mg/L compromettent la sécurité de l'irrigation, notamment en cultures maraîchères.

Par ailleurs, Bixio et al. (2006) rappellent que l'ammonium résiduel peut se transformer en nitrates par nitrification, contribuant à l'enrichissement azoté des sols, ce qui peut être bénéfique dans certains cas, mais constitue aussi un risque environnemental à long terme.

2.8 Les nitrites et risques pour l'irrigation

Les nitrites dans les eaux usées proviennent de l'oxydation partielle de l'ammonium et constituent un polluant azoté toxique pour l'environnement et potentiellement pour les cultures agricoles. Leur présence excessive peut entraîner contamination des nappes phréatiques, des déséquilibres dans les sols (accumulation d'azote nitreux) et des risques sanitaires en cas de contact direct avec les cultures maraîchères.

L'OMS (2006) et la législation algérienne recommandent des concentrations inférieures à 0.1 mg/L pour les nitrites dans les eaux réutilisées à des fins agricoles.

- Dans la STEP-HRM, le traitement des eaux permet une réduction très significative des nitrites, avec des concentrations finales largement inférieures au seuil de 0.1 mg/L, ce qui traduit une excellente performance et garantit la conformité pour la réutilisation agricole.
- Dans la STEP-Laghouat, bien qu'une réduction soit observable, celle-ci reste modeste et statistiquement non significative. Néanmoins, les concentrations finales après traitement restent dans des plages acceptables (< 0.05 mg/L), ce qui limite les risques

immédiats, mais révèle un besoin d'amélioration des procédés de traitement pour assurer une performance durable et régulière.

Les travaux de Gupta et al. (2017) confirment qu'un niveau de nitrites supérieur à 0.1 mg/L dans l'eau d'irrigation peut entraîner une accumulation d'azote nitreux dans les sols, ce qui perturbe le métabolisme des plantes et peut réduire les rendements agricoles.

De plus, Díaz et al. (2019) soulignent que la présence de nitrites dans les eaux usées témoigne souvent d'un dysfonctionnement dans les processus de nitrification et de dénitrification, nécessitant des ajustements technologiques.

2.9 Les nitrates et risques pour la réutilisation agricole

Les nitrates sont la forme oxydée de l'azote dans l'eau et constituent un polluant majeur, notamment en cas d'irrigation agricole. Une concentration excessive en nitrates peut entraîner des risques sanitaires pour les consommateurs en cas de culture maraîchère (accumulation dans les plantes), des déséquilibres azotés dans le sol, favorisant la lixiviation vers les nappes phréatiques et une eutrophisation des milieux aquatiques adjacents.

L'OMS (2017) fixe la limite recommandée des nitrates à 40 mg/L pour les eaux destinées à l'irrigation. En Algérie, le décret exécutif n° 11-184 (JOA, 2011) impose également le respect de ce seuil pour les rejets d'eaux usées et leur réutilisation.

Les résultats montrent clairement l'inefficacité des deux stations, STEP-HRM et STEP-Laghouat, en matière d'élimination des nitrates. Aucune réduction significative n'est observée après traitement, comme le confirme le test de Wilcoxon ($p = 1$ pour les deux sites).

Certaines valeurs dépassent largement le seuil réglementaire de 40 mg/L, ce qui compromet la réutilisation sécurisée de ces eaux pour l'irrigation, notamment des cultures maraîchères ou à consommation crue.

Ces résultats suggèrent que les procédés actuels de traitement, probablement basés sur des filières biologiques classiques, ne sont pas optimisés pour l'élimination de l'azote total, en particulier des nitrates.

La littérature scientifique souligne la difficulté de traiter efficacement les nitrates par des procédés classiques :

- Henze et al. (2008) indiquent que l'élimination efficace des nitrates nécessite des procédés de dénitrification bien contrôlés, souvent absents ou insuffisants dans les stations d'épuration standards.
- Lu et al. (2017) insistent sur l'importance de coupler les procédés biologiques classiques avec des technologies avancées (filtres plantés, procédés physico-chimiques) pour atteindre des concentrations inférieures aux limites réglementaires.

2.10 Les phosphates et la réutilisation agricole

Les phosphates sont des éléments nutritifs essentiels, mais leur excès dans les eaux usées peut entraîner une accumulation de phosphore dans les sols, des déséquilibres dans les écosystèmes aquatiques environnants (eutrophisation) et des risques environnementaux à long terme.

L'OMS (2006) et la réglementation algérienne ne définissent pas de limite stricte pour les phosphates dans l'eau d'irrigation, mais la littérature recommande de maintenir les concentrations inférieures à 1-2 mg/L pour éviter l'eutrophisation et les déséquilibres agronomiques (Jiménez, 2006).

- Dans la STEP-HRM, on observe une augmentation significative des phosphates après traitement. Cela peut résulter de phénomènes tels que la libération de phosphore organique lors des procédés de traitement, notamment dans les systèmes biologiques mal contrôlés. Cette situation n'est pas conforme aux recommandations et constitue un facteur limitant pour la réutilisation agricole.
- Dans la STEP-Laghouat, une réduction très nette des phosphates est observée après traitement, bien qu'elle ne soit pas statistiquement significative. Les concentrations post-traitement proches de zéro indiquent une bonne efficacité épuratoire, favorable à la réutilisation de l'eau en agriculture.

Plusieurs études confirment ces constats :

- Jiménez (2006) précise que des concentrations de phosphates supérieures à 2 mg/L favorisent l'accumulation dans les sols et peuvent induire des déséquilibres agronomiques.

- Bixio et al. (2006) soulignent que l'élimination des phosphates reste un défi dans les STEP, notamment lorsque les procédés de traitement biologique ne sont pas optimisés.
- Smith et al. (2020) rappellent que des niveaux élevés de phosphates dans les eaux d'irrigation nécessitent des stratégies d'épandage contrôlé ou des traitements tertiaires complémentaires.

CONCLUSION

Conclusion

Cette étude a mis en évidence l'importance et le potentiel de la réutilisation des eaux épurées urbaines dans l'agriculture, en se basant sur l'analyse de deux stations d'épuration, la STEP-HRM (Hassi R'mel) et la STEP-Laghouat, à travers plusieurs paramètres physico-chimiques. L'objectif étant d'évaluer la qualité des eaux traitées et leur conformité aux normes de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et de la législation algérienne, pour déterminer leur aptitude à être réutilisées en agriculture, en particulier pour l'irrigation.

Les résultats obtenus à la STEP-HRM ont montré une performance globale remarquable, avec une réduction significative des DBO_5 , DCO , MES , NH_4^+ et NO_2^- , indiquant une capacité d'élimination efficace des polluants organiques et azotés. Cependant, l'augmentation des phosphates (PO_4^{3-}) après traitement reste préoccupante, nécessitant une révision des procédés de traitement pour éviter les risques d'accumulation excessive de phosphore dans les sols agricoles. De plus, le pH et la température de l'eau, bien que stables et adaptés à la réutilisation, doivent être surveillés pour prévenir tout impact négatif à long terme sur la structure des sols et la croissance des cultures.

À la STEP-Laghouat, bien que l'élimination des polluants organiques et azotés soit moins marquée, l'eau traitée présente des concentrations acceptables pour certains paramètres comme le pH et les MES. Cependant, la réduction insuffisante des DBO_5 et NO_3^- limite son usage dans l'irrigation, et une attention particulière doit être portée sur l'amélioration des traitements pour réduire efficacement ces polluants. La température, bien qu'abaisse légèrement après traitement, reste dans une plage acceptable pour l'irrigation des cultures.

Ainsi, les résultats confirment que, bien que les deux stations offrent une qualité d'eau relativement bonne pour la réutilisation en agriculture, des améliorations sont nécessaires, en particulier pour la STEP-Laghouat, afin d'assurer une conformité optimale aux normes internationales. La gestion des phosphates et des nitrates, ainsi que l'optimisation des procédés de traitement, sont des points clés à renforcer pour garantir la durabilité de cette réutilisation. De plus, la stabilité de la température et le pH doivent être systématiquement contrôlés afin d'éviter tout effet adverse sur les sols et les cultures.

En conclusion, cette étude démontre le potentiel de réutilisation des eaux traitées de LA STEP-HRM et la STEP-Laghouat dans l'agriculture, mais elle souligne également la nécessité

d'optimiser les procédés de traitement pour garantir une qualité d'eau conforme aux normes strictes de l'OMS et à la législation algérienne, dans le but d'assurer une utilisation sécurisée et durable de ces ressources en agriculture. Les efforts de gestion de la qualité de l'eau, en particulier en ce qui concerne les polluants résiduels, seront cruciaux pour tirer parti de cette solution innovante face aux défis de la pénurie d'eau dans de nombreuses régions agricoles.

En perspectives

1. **Optimisation des procédés de traitement** : Réduire les phosphates et nitrates résiduels à la STEP-Laghouat pour améliorer la qualité de l'eau.
2. **Suivi en temps réel** : Mettre en place un contrôle continu des paramètres physico-chimiques de l'eau traitée pour prévenir les impacts sur les sols et cultures.
3. **Études à long terme** : Évaluer les effets des eaux réutilisées sur la santé des sols et la croissance des cultures.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

- **AERM, (2007).** Les procédés d'épuration des petites collectivités du bassin Rhin-Meuse. Eléments de comparaison techniques et économiques, Agence de l'Eau Rhin-Meuse (AERM).
- **ALTMAYER, N., ABADIA, G., SCHMITT, S., & LEPRINCE, A. (1990).** Risques microbiologiques et travail dans les stations d'épuration des eaux usées. Fiche médico-technique, n°34, pp.373- 388.
- **AMRANI, O. (2021).** Étude floristique et nutritive, spatiotemporelles des principales plantes vivaces des parcours steppiques, naturels et aménagés, de la région de Laghouat (Doctoral dissertation, Ph. D. Thesis, Ouargla University.(in French)).
- **ANDREAE H., 1970.** Nouveaux procédés de mesure en hydrologie.
- **ASANO, T. (1998).** Wastewater reclamation and reuse: water quality management library. vol.10, Boca Raton, New York, USA, 1475 p.
- **AYERS, R.S., & WESTCOT, D.W. (1985).** Water Quality for Agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 29.
- **BASSOMPIERRE, C. (2007).** Procédé à boues activées pour le traitement d'effluents papetiers: de la conception d'un pilote à la validation de modèles. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), France, pp. 25-42.
- **BAUMONT, S., CAMARD, J.P., LEFRANC, A., &FRANCONI, A. (2004).** Réutilisation des eaux usées, risques sanitaires et faisabilité en Île-de-France. Rapport ORS, 220 p.
- **BENHDID H. et HARROUZ N., 2011.-** Contribution à l'étude de la performance d'une station d'épuration des eaux usées par lagunage (Ouargla). Mémoire Ing, Université Ouargla, 124 p
- **BENYAHYA, M., BOHATIER, J., LAVERAN, H., SENAUD, J., &ETTAYEBI, M. (1998).** Les virus des eaux usées et leur élimination au cours des traitements des effluents pollués. L'année Biologique, vol 37, n°2, pp.95-105.
- **BERNE, F., & CORDONNIER, J. (1991).** Traitement des eaux. Publications de l'Institut français du pétrole, Editions Technip, Paris, France, 305 p.
- **BIXIO, D., ET AL. (2006).** "Reuse of Treated Wastewater for Agriculture: Lessons from European Experience." Water Science &Technology, 53(10), 207-214.

- **BLIEFERT C., & PERRAUD R. (2001).** Chimie de l'environnement Déchets. Air, eau, sols, déchets, Edition de Boeck, pp.317-477.
- **BOEGLIN, J. C. (1998).** Traitements biologiques des eaux résiduaires. Edition Techniques de l'ingénieur, TRN: FR9900649, France, 457 p.
- **BOUDREAU, L., CLOUTIER, S., & GUAY, I. (2009).** Position technique sur le rejet d'eaux chlorées dans le milieu aquatique. Bibliothèque nationale du Québec, ISBN 978-2-550-57764-5, Canada, 10 p.
- **BRL., (2011).** Réutilisation des eaux usées traitées -perspectives opérationnelles et recommandations pour l'action. Rapport final. Agence Française de Développement.
- **BUREK P., SATOH Y., FISCHER G., KAHIL M. T., SCHERZER A., TRAMBEREND S., NAVA L. F., WADA Y., EISNER S., FLÖRKE M., HANASAKI N., MAGNUSZEWSKI P., COSGROVE B. ET WIBERG D., (2016).**Water Futures and Solution: Fast Track Initiative (Final Report). Version de travail de l'IIASA. Laxenbourg, Autriche, Institut international pour l'analyse des systèmes appliqués (IIASA)
- **CARDOT, C. (2010).** Les traitements de l'eau pour l'ingénieur: procédés physico-chimiques et biologiques: cours et problèmes résolus. Edition Ellipses, Paris, France, 301 p.
- **CAUCHI, H., NAKACHE, S. D., ZAGURY, B., CARRE, C., DENIS, D., LARBAIGT, D., &MARTIGNE, S.(1996).** "Dossier: la réutilisation des eaux usées après épuration". Techniques, Sciences et Méthodes, n°2, pp.81-118.
- **CONDOM, N., & DECLERCQ, R. (2016).** Réutilisation des eaux usées pour l'irrigation agricole en zone périurbaine de pays en développement: pratiques, défis et solutions opérationnelles. Rapport ECOFILAE, 63 p.
- **CSHPF, (1995).**Recommandations sanitaires relatives à la désinfection des eaux usées urbaines. Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France (CSHPF), Section des eaux, 22 p.
- **DE VILLERS, J., SQUILBIN, M., &YOURASSOWSKY, C. (2005).** Qualité physico-chimique et chimique des eaux de surface: cadre général. Fiche.2, pp.158-162.
- **DEGREMONT, (2005).** Memento Technique de l'Eau. France: Lavoisier SAS, 1748 p.

- **DESHAYES, M. (2007).** Guide pour l'établissement des plans d'assurance de la qualité dans le cadre de la réalisation des stations d'épuration de type boues activées en lot séparés'', Projet de fin d'étude, INSA, Strasbourg, France, 112 p.
- **DESJARDINS, R. (1997).** Le traitement des eaux. 2ème édition, Ecole polytechnique de
- **DÍAZ, J., ET AL. (2019).** "Nitrogen Removal from Wastewater: Challenges and Opportunities." *Water Research*, 149, 468-482.
- **DMRE (DIRECTION DE LA MOBILISATION DES RESSOURCES EN EAU /MRE). (2013).** Bilan Semestriel 2013.
- **DOWNWARD, S. R., & TAYLOR, R. (2007).** An assessment of Spain's Programa AGUA and its implications for sustainable water management in the province of Almería, southeast Spain. *Journal of environmental management*, vol. 82, n°2, pp.277-289.
- **EDLINE, F. (1979).** L'épuration biologique des eaux résiduaires. CEBEDOC édition, Paris, France, 306 p.
- **EFFEBI, K. R. (2009).** Lagunage anaérobie: Modélisation combinant la décantation primaire et la dégradation anaérobie. Thèse de Doctorat Université de Liège, pp.7-9.
- **FABY, J.A., & BRISSAUD, F. (1997).** L'utilisation des eaux usées épurées en irrigation. Office International de l'eau (OI Eau), 76 p.
- **FAO ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE, 2020,** L'état de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde 2020 - Transformer les systèmes alimentaires pour une alimentation saine et abordable. Rome, FAO
- **FAO, (2003).** L'irrigation avec les eaux usées traitées. Food and Agriculture Organisation (FAO), Manuel d'utilisation, Bureau Régional pour le proche orient et l'Afrique du Nord, Le Caire, Egypte, 73 p.
- **FRANCK, R. (2002).** Analyse des eaux, Aspects réglementaires et techniques. Edition CRDP Aquitaine décembre, Bordeaux, France, pp. 165-239.
- **FRIEDLER, E. (2001).** "Performance of Wastewater Treatment Plants for Agricultural Reuse: A Global Review." *Water Research*, 35(17), 4225-4235.

- **GAÏD, A. (1984).** Epuration biologique des eaux usées urbaines. OPU Algérie, Edition N°012472 05-84, tome 1, 261 p.
- **GENERET, O., BODART, O., ANDRE, N., COLMANT, S., BELLINO, D., VONNECBE, L., VAN HOOYDONK, D., LAFFINEUR, L., & DAUM CONCEPT, B. (2005).** Etude d'incidences sur l'environnement relative à une demande de permis unique, AIDE S.C.R.L. Station d'épuration d'eaux résiduaires urbaines de Liège -Sclessin, Projet N°: 05.0258, Belgique, 82 p.
- **GUPTA, N., ET AL. (2017).** "Nitrogenous Pollutants in Agricultural Irrigation Water: Effects and Treatment Strategies." *Agricultural Water Management*, 191, 245-256.
- **HANNACHI A., GHARZOULIR., DJELLOULI Tabet Y., (2014).** Gestion et valorisation des eaux usées en Algérie. Larhyss, 1-12p
- **HENZE, M., ET AL. (2008).** *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design.* IWA Publishing.
- **HOUYOU Z., (2015).** Impact de la mise en culture en pluvial sur la dégradation du sol par érosion éolienne dans la steppe centrale (cas de la région de Laghouat). Thèse Doctorat, USTHB, Alger. 168p.
- **HUSSAIN, I., ET AL. (2017).** "The Effects of Water Temperature on Plant Growth and Irrigation Efficiency." *Agricultural Water Management*, 95(9), 1245-1251.
- **INRS, (2004).** Le traitement des eaux usées. Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS). Point des connaissances ED 5026, Paris, France, 4 p.
- **JIMÉNEZ, B. (2006).** "Irrigation Practices with Reclaimed Wastewater: Guidelines for Suspended Solids Control." *Water Science & Technology*, 53(11), 101-107.
- **JOA (2011).** Journal Officiel Algérien, Décret exécutif n°11-184 relatif aux rejets d'eaux usées.
- **KADDOURI, M. A. (2021).** Ecologie trophique du hérisson du désert *Hemiechinusaethiopicusehrenberg* 1833 (mammalia:erinaceidae) dans la région de Laghouat (Doctoral dissertation).

- **KHAN, A., ET AL. (2019).** “Reuse of Treated Wastewater for Irrigation: DCO and Soil Quality Considerations.” *Agricultural Water Management*, 215, 312-320.
- **KOLLER, E. (2004).** *Traitement des pollutions industrielles: eau, air, déchets, sols, boues.* Edition Dunod, Paris, France, 424 p.
- **LAZAROVA V et BRISSAUD F., (2007).** Intérêt, bénéfices et contraintes de la réutilisation des eaux usées en France, *L'eau, l'industrie, les nuisances* N° 299.
- **LE BYARIC, R. (2009).** *Caractérisation, Traitabilité et valorisation des refus de dégrillage des stations d'épurations.* Thèse Doctorat, Institut National des Sciences appliquées, Lyon, France, 190 p.
- **LIU, J., ET AL. (2020).** “Impact of Organic Pollution on the Quality of Water for Agricultural Irrigation.” *Environmental Science and Pollution Research*, 27(7), 7565-7575.
- **LU, Y., ET AL. (2017).** “Recent Advances in Nitrate Removal from Wastewater Using Biological and Hybrid Processes.” *BioresourceTechnology*, 245, 227-235.
- **MAHAMAT A.B., ARNAUD F.P., KHOMH F., (2004).**-Modélisation d'écoulement et de transport de polluants dans les nappes phréatiques. *Universiade académiques.* Université de Yaoundé I, Cameroun, 41p.
- **MALIKI SAMIR BAHA-EDDINE (2006)** Chargé de Cours(Politique de l'eau en Algérie : les modèles marchands face à la pauvreté) Université de Tlemcen (Algérie) Faculté des sciences économiques et de gestion
- **MARA D., ET CAIRNCROSS S., (1991).** *Guide pour l'utilisation sans risques des eaux résiduaires et des excréta en agriculture et aquaculture.* Genève. Organisation mondial de la santé, 212 p.
- **METCALF, A., & EDDY, I. (2003).** *Wastewater Engineering. Treatment and Reuse.* 4th edition, Mc Graw-Hill Ed, New York, USA, 1819 p
- **MOHAMMED B., (2008).** *Approche méthodologique pour les projets de réutilisation des eaux usées en irrigation,* 101p
- **MOLETTA, R. (2008).** *L'eau, sa pollution, et son traitement.* Moletta Méthanisation, 2ème édition, 1504 Route des Bottières 73470 Novalaise, France, 505 p.
- Montréal, Canada, 303 p.

- **NADER A., (2015).** Eaux usées épurées de la cuvette d'Ouargla Gestion et risqué environnementaux. Mémoire de Magister, Université Ouargla, 169p.
- **NGO C. ; REGENT A., (2008).** Déchets, effluents et pollution impact sur l'environnement, 2ème édition
- **OMS, (2012).** Guide OMS pour l'utilisation sans risque des eaux usées, des excréta et des eaux résiduaires, Organisation Mondiale de la santé (OMS), volIII, Genève, 225 p.
- **OMS/UNICEF (2019)** (Organisation mondiale de la Santé/Fonds des Nations Unies pour l'enfance.
- **PASQUINI, L. (2013).** Micropolluants issus de l'activité domestique dans les eaux urbaines et leur devenir en station d'épuration. Thèse Doctorat, Université de Lorraine, France, 298 p.
- **PESCOD, M.B. (1992).** Wastewater Treatment and Use in Agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 47.
- **PNUE (Programme des Nations Unies pour l'environnement). (2002).** Vital Water Graphics: An Overview of the State of the World's Fresh and Marine Waters. Nairobi, PNUE.
- **RAMADE F., (1998).** Dictionnaire encyclopédique des sciences de l'eau (No. 631.4 R165d). Ediscience internationale, Paris, 786 p.
- **RAMADE, F. (2000).** Dictionnaire encyclopédique des populations : les polluants : de l'environnement à l'homme. Ediscience international, Paris, France, 689 p.
- **RICHEY A. S., THOMAS B. F., LO M., REAGER J. T., FAMIGLIETTI J. S., VOSS K., SWENSON S. ET RODELL M., (2015).** « Quantifying renewable groundwater stress with GRACE ». Water Resources Research, Vol. 51, no 7, p. 5 217 à 5 238.
- **RODIER, J., BAZIN, C., BROUTIN, J.P., CHAMBON, P., CHAMPSAUR, H. &RODI, L. (1996).** L'analyse de l'eau. Eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer. Dunod, 8ème éd, Paris, France, 1384p.
- **RODIER, J., LEGUBE, B., & MERLET, N. (2009).** Analyse de l'eau. Dunod, 9ème édition, Paris, France, 1579 p.
- **ROLAND, V. (2010).** Eau, environnement et santé publique. Introduction à l'hydrologie, 3ème édition, Lavoisier, paris, 301 p.

- **SAVARY, P. (2010).** Guide des analyses de la qualité de l'eau. Edition Techni. Cités, Paris, 283p.
- **SCHWARTZBROD, L. (2000).** Virus humains et santé publique: Conséquences de l'utilisation des eaux usées et des boues en agriculture et conchyliculture. Centre collaborateur OMS pour les micro-organismes dans les eaux usées, Université de Nancy, France, 298 p.
- **SMITH, R., ET AL. (2020).** "Phosphorus Management in Agricultural Water Reuse Systems: Risks and Solutions." *Environmental Science and Technology*, 54(3), 1548-1556.
- **SMITH, R., ET AL. (2021).** "Impact of Organic Load from Irrigation Water on Soil Properties and Plant Growth." *Journal of Environmental Quality*, 50(2), 534-542.
- **SOUDI, B., BENOSMANE, F., DIMITRI, X., & MAHI, M. (2009).** Etude ONEP / FAO -Atelier sur l'assainissement, l'épuration et la réutilisation des eaux usées. Présentation du Guide Technique de la Réutilisation des Eaux Usées Epurées Agadir, vol. 33, pp.45-50.
- **TAIBI, Y., CAHDLI, M., ZIANE M. (2022)** Industrial Risk Assessment Around Pentane Storage Tank in Hassi R'mel City Algeria, using areal location of hazardous atmospheres (ALOHA) software. *EM International ISSN 0257-8050 DOI No.:*
- **TARIQ, M. ET AL. (2020).** "Impact of Electrical Conductivity on Agricultural Productivity: A Case Study on Irrigation Water Quality." *Agricultural Water Management*, 239, 106233.
- **TCHOBANOGLIOUS, G., ET AL. (2014).** *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery.* McGraw-Hill.
- **UNESCO, Bureau régional pour l'Afrique de l'Est. (2020)** .Biennial Programme Synthesis Report: Implementation Period 2018-2019. Nairobi, Bureau régional de l'UNESCO pour l'Afrique
- **VAILLANT, J.R. (1974).** Perfectionnement et nouveautés pour l'épuration des eaux résiduaires, eaux usées urbaines et eaux résiduaires industrielles. Eyrolles édition, Paris, France, 413 p.

- **WHO (2006).** Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater. Volume 2:Wastewater Use in Agriculture.
- **WHO (2017)** et Pescod (1992) rappellent que des concentrations supérieures à 50 mg/L compromettent la réutilisation agricole, surtout pour les sols vulnérables ou les cultures sensibles

Référence électroniques :

- **AERM, (2012).** Procédés d'épuration le Lit Bactérien. Agence de l'Eau Rhin- Meuse. http://www.eau-rhin-meuse.fr/tlch/procedes_epuration/F03_lit_bacterien.pdf
- **AMORCE, (2012).** Boues de station d'épuration : Techniques de traitement, valorisation et élimination. Note, Série Technique DT 51, France, 36 p. https://www.pseau.org/outils/ouvrages/amorce_boues_de_step_techniques_de_traitement_valorisation_et_elimination_2012.pdf
- **(ACC) Ministère de l'Intérieur, des Collectivités Locales et de l'Aménagement du Territoire,** monographie de Laghouat, consulté le 16/05/2024 sur : https://interieur.gov.dz/Monographie/detail_axe.php?wilaya=3&type=potentialite

Annexes

Paramètres	Mode opératoire
Température	Mesurés à l'aide d'un multi paramètre
pH	Elle applique au moyen ; une électrode en verre à tout type eau ou de solution dont le pH Compris entre 01 et 11 et la température entre 0 et 60.
Conductivité	<ul style="list-style-type: none"> - Prélever à l'aide d'une pipette une prise d'essai de 50 ml et l'introduire dans un bécher propre. - Rincer abondamment l'électrode avec l'eau distillée. - Introduire l'électrode dans la solution à analyser. - Presser la touche POWER, puis la touche ENT correspondant à la mesure de la conductivité. - Lire la valeur affichée par le conductivimètre après stabilisation. - Rincer abondamment la sonde à l'eau distillée après utilisation.
MES	<ul style="list-style-type: none"> - Avant la pesée du filtre à vide, laver à l'eau distillée puis le sécher à 100°-105°C. - Le filtre est refroidi dans un dessiccateur puis pesé, soit P_1. - Mettre en marche le dispositif de filtration sous pressions. - Verser la prise d'essai (100ml) sur le filtre. - Laver le récipient et le filtre avec l'eau distillée. - Sécher le filtre à l'étuve à 105°C pendant 30 minutes. - Refroidir le filtre au dessiccateur puis peser, soit P_2.

<p style="text-align: center;">DCO</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Homogénéiser l'eau à analyser en agitant pendant deux minutes. - Allumer le réacteur à DCO et préchauffer à 150°C. - Retirer le bouchon d'un tube des réactifs. - (Suite du document précédent) - Tenir le tube incliné à 45°, prélever 2 ml d'eau à analyser et les introduire dans le tube. - Préparer un blanc en répétant les étapes précédentes (étapes 5 et 6) en remplaçant l'échantillon par de l'eau distillée. - Chauffer les tubes pendant 2 heures (dans le réacteur à 150°C). - Après 2 heures, éteindre le réacteur. - Placer les tubes sur un portoir, attendre qu'ils soient refroidis. - Lecture par colorimètre. - Entrer le numéro du programme mémorisé pour la DCO, programme 17. - Placer le blanc dans l'adaptateur ; placer le couvercle sur le colorimètre. - Presser la touche ZERO, l'affichage indique 00 mg/l. - Après le blanc, placer le tube à analyser, le couvercle sur l'adaptateur. - Presser la touche READ, l'affichage indique les résultats en mg/l
<p style="text-align: center;">DBO5</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Mettre en marche l'incubateur et fixer la température à 20°C. - Introduire un barreau magnétique dans le flacon. - Placer le col de la bouteille sur le support en caoutchouc avec une à deux pastilles de NaOH. - Mettre le bouchon sans le serrer. - Enclencher l'agitation et équilibrer la température de l'incubateur à 20°C. - Après une heure fermer les bouchons de la bouteille avec un capillaire. - Ajuster l'échelle au niveau du mercure dans le capillaire. - Noter la date et l'heure de la mise en marche.

DBO5	<ul style="list-style-type: none"> - Lire quotidiennement les valeurs indiquées sur l'échelle. - Après le cinquième jour, lire le résultat sur l'échelle le multiplier par le facteur de conversion. - Le résultat correspond à la consommation d'oxygène en mg/l.
Ammonium	<ul style="list-style-type: none"> - Mettre en marche le DR 850 en appuyant sur la touche EXIT. - Appuyer sur la touche PGM puis introduire le numéro du programme mémorisé pour l'azote ammoniacal. - Presser 64 puis la touche ENTER. - Prendre deux cellules en verre, et remplir à 25 ml d'eau à analyser la 1^{re}, et la 2^{em} d'eau distillée (le blanc). - Ajouter le contenu d'une gélule de réactif salicylate dans chacune des cellules, boucher et agiter pour bien dissoudre. - Presser la touche TIMER pour donner une période de réaction de 3 minutes. - Lorsque le minuteur sonne, ajouter le contenu d'une gélule de cyanurate dans les deux cellules. - Fermer les deux cellules, agiter pour bien dissoudre le réactif. - Presser la touche TIMER pour donner une période de réaction de 15 minutes. - Lorsque le minuteur sonne, introduire la 2^{em} (le blanc) dans le puits de mesure et presser la touche ZERO pour avoir 0.0 mg/l. - Placer l'échantillon préparé dans le puits de mesure et fermer le capot. - Presser la touche READ, l'affichage indique le résultat en mg/l d'azote ammoniacal N-NH₄.
Nitrite	<ul style="list-style-type: none"> - Mettre en marche le DR850 en appuyant sur la touche EXIT. - Entrer le numéro du programme pour la mesure du nitrite. - Presser 80 puis la touche ENTER. - Remplir un flacon de 25 ml avec l'échantillon à analyser.

Nitrite	<ul style="list-style-type: none"> - Ajouter le contenu d'une gélule de réactif nitra ver 2. - Agiter le flacon pendant une minute. - Presser la touche TIMER pour avoir le temps de réaction
Nitrate	<ul style="list-style-type: none"> - Mettre en marche le spectrophotomètre DR850 en appuyant sur la touche EXIT - Sélectionner le programme de mesure des nitrates (numéro spécifique selon l'appareil, généralement indiqué dans la documentation HACH). - Appuyer sur la touche SO, puis sur ENTER. - Remplir une cellule de 25 mL avec l'échantillon d'eau à analyser. - Ajouter le contenu d'une gélule de réactif Nitra Ver 5 dans cette cellule. - Agiter doucement jusqu'à dissolution complète du réactif (attendre généralement 1 à 5 minutes selon les instructions du réactif). - Remplir une seconde cellule de 25 mL avec le même échantillon sans ajout de réactif (échantillon blanc). - Introduire d'abord la cellule contenant le blanc dans le spectrophotomètre pour effectuer le zéro (blanc). - Ensuite, insérer la cellule contenant l'échantillon + réactif, et lire directement la concentration en nitrates affichée par l'appareil (en mg/L NO_3^-). - Agiter les deux flacons pendant une minute. - Presser la touche TIMER pour avoir le temps de réaction. - Lorsque le minuteur sonne, placer le blanc dans le puits de mesure et fermer le capot ; - appuyer sur la touche ZERO l'affichage indique 00 mg/l NO_3. - Mettre le 1^{er} flacon dans le puits de mesure et fermée le capot ; appuyer sur la touche READ pour lire la concentration des nitrates (NO_3) en mg/l.

Nitrate	
Phosphate	<ul style="list-style-type: none">- Mettre en marche le DR850 en appuyant sur la touche EXIT.- Entrer le numéro de programme mémorisé pour le phosphore, presser 79 puis ENTER,- L'affichage indique PRG 79 mg/l PO₄.- Ensuite remplir un flacon avec l'eau à analyser.- Ajouter le contenu d'une gélule de réactif phos ver3.- Agiter pour bien mélanger.- Un signal sonore est émis à la fin de cette durée, le temps de réaction est de 2 minutes.- L'affichage doit être confirmé par pression sur la touche ENTER.- Remplir un 2ème flacon avec l'eau à analyser sans réactif (le blanc).- Placer dans le puits de mesure le blanc, fermer le capot.- Lorsque le signal sonore est émis, l'affichage indique mg/l PO₄, presser O.- Placer les échantillons préparés dans le puits de mesure et fermer le capot.- Presser READ, attendre l'affichage, puis le résultat en mg/l de PO₄.