جامعة سيدي محمد بن عبد الله بفاس
UNIVERSITÉ SIDI MOHAMED BEN ABDELLAH DE FES
كلية العلوم ظهر المهراز فاس
FACULTE DES SCIENCES DHAR EL MAHRAZ FES

N° d'ordre : 69/2024……..

Centre des Etudes Doctorales : Sciences et Techniques et Sciences Médicales Formation Doctorale : ***Molécules Bioactives, Santé et Biotechnologies*** Discipline : ***Biologie***
Spécialité : ***Microbiologie et Biotechnologie***
Laboratoire : ***Laboratoire de Biotechnologie, Environnement, Agro-alimentaire Et Santé (LBEAS)***

Thèse de DOCTORAT

Valorisation des eaux usées de la STEP de La ville d'Errachidia en Vue de Leur utilisation en Agriculture locale

Présentée par :

OUHAMMI MOHAMED

Soutenue le 14 Décembre 2024 devant le jury :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
GUEMMOUH Raja	PES	FSDM-Fès	Président
CHAHLAOUI Abdelkader	PES	Fac. Science-Meknès	Rapporteur & examinateur
AIT BOUGHROUS Ali	PES	FST - Errachidia	Rapporteur & examinateur
LOUASTE Bouchra	PH	FSDM-Fès	Rapporteur&Examinateur
LAHKIMI Amal	PH	FSDM-Fès	Examinateur
MERZOUKI MOHAMMED	PES	FSDM- FES	Directeur de thèse

Année Universitaire : 2023-2024

Table des matières

Avant Propos
PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS
Remerciements
Dédicace
Liste des Figure
Liste des tableaux
Liste des Abréviations
Résumé
Abstract
الملخص
Introduction générale 1
Partie I : Synthèse Bibliographique 5
Chapitre I : Paramètres de qualité et traitement biologique des eaux usées 6
I. Introduction 6
1. Pouvoir dissociant de l'eau 6
2. Définition d'une eau usée 6
3. Origine des eaux usées 7
3.4. Eaux pluviales 7
II. Caractéristiques des eaux usées 8
1. Paramètres physico-chimiques 8
III. Principe de l'épuration biologique 10
1. Métabolisme aérobie 12
Figure 1 : Mécanismes réactionnels de la métabolisation aérobie de la pollution carbonée (Jean-Claude, B., 1998) 12
IV. Principaux procédés de traitements biologiques des eaux usées 12
1. Digestion anaérobie 13
3 - Les cultures libres (boues activées) 15
5- Filtration par percolation 16
6- Filtration par le sol et les plantes (filtres plantés) 17
Chapitre II : Réutilisation des eaux usées traitées en agriculture 18
I. Introduction 18
1. Différentes utilisations des eaux usées traitées 18
2. Situation de l'utilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation agricole 18
3. Critères de qualité des eaux usées pour l'irrigation 19
Tableau 1: Tolérance à la salinité de quelques plantes cultivées (FAO, 1985) 20
4. Amendements chimiques 21
5. Système d'irrigation adapté 21
6. Matière organique 22
II. Les micropolluants 22
1. Les micropolluants minéraux 22
2. Les micropolluants organiques 23
3. Les paramètres biologiques 23
Tableau 2: Les bactéries pathogènes dans les eaux usées Asano (1998) 24
Tableau 3 : Les parasites pathogènes dans les eaux usées (Boutin 1987) 25
III. Lois relatives à l'eau au Maroc 27
1. Introduction 27
3 -La loi N° 36-15 27
I. Introduction 29

II. Boues résiduaires....29
Figure 2: Boues résiduaires....30
III. Composition des boues....30
3-2 Éléments fertilisants....31
3-3 Éléments traces métalliques (ETM)....31
1. Production des boues....31
IV. Polluants des boues....32
1. Polluants biologiques....32
1-7 Les protozoaires34
Partie II : Materiel et méthode....37
I. Situation de la ville d'Errachidia....38
1. Données générales sur la ville....38
2. Contexte général....38
3. Situation géographique....38
Figure 3: Situation géographique de la ville d'Errachidia....39
4. Hydrogéologie et hydrologie....39
5. Climat 40
II. Station d'épuration d'Errachidia....40
Tableau 5: Présentation de la station type lagunage naturel....41
2. Station d'épuration type lagunage aéré après 2013....44
Le lagunage aéréest composé de....44
2-3 Dimensionnement des bassins aérés....46
Tableau 7 : Les volumes nécessaires aux horizons 2020 et 2030.....47
Tableau 8: Caractéristiques techniques des bassins aérobies....48
Tableau 9: Caractéristiques des bassins de maturation....50
III. Méthodes utilisées....50
1. Modalités de prélèvement des eaux usées....51
2. Analyses physico-chimiques....51
2-2 Le pH 52
2-3 La conductivité électrique....52
2-3 La demande chimique en oxygène....52
2-4 La demande biologique en oxygène....52
2-7 Dosage des métaux lourds dans les eaux usées brutes et épurées de la STEP....53
2-8 Analyses des métaux lourds....53
3 Analyses bactériologiques....54
4 Disposition de la parcelle expérimentale....54
IV. Analyse parasitologie des boues de la station d'épuration de la ville d'Errachidia....58
Expression de résultats....59
IV -2 Recherche des kystes des protozoaires....60
Partie III : Résultats et discussion....61
I. Introduction....62
II. Analyse des paramètres physico-chimiques....62
Tableau 11: Paramètres physico-chimique des eaux usées brutes à l'entrée de la station d'épuration d'Errachidia pendant l'année 2020. 63
1. La température....64
2. pH 64
3 - La demande chimique en oxygène....64
4- La demande biochimique en oxygène....64
5 - Les matières en suspension....65
6 Analyse des paramètres métalliques : la teneur en métaux lourds dans les eaux usées brutes de la STEP....65
Tableau 12 : La teneur en métaux lourds dans les eaux usées brutes de la STEP....65
7 Les ions ammonium....66
Tableau 13 : Résultats moyennes d'analyses durant les cinq mois de suivi des formes....66

8 Les Nitrites 67
9 Les Nitrates67
Tableau 14 : Valeurs moyennes des coliformes totaux; fécaux et streptocoques fécaux des eaux usées à l'entrée de la station d'épuration d'Errachidia pendant l'année 2020....68
10-1 Coliformes totaux....69
10-2 Coliformes fécaux....69
10-3 Streptocoque fécaux....69
11 Conclusion 69
I. Introduction....70
II. Les paramètres physico-chimiques....70
Tableau 17: Paramètres physico-chimiques à l'entrée et à la sortie de la station d'épuration des saisons estivales (Mai, Juin, Juillet, Aout) et saison hivernale (Octobre, Novembre, Décembre) avec des taux d'abattement pendant l'année 2020....73
II –1 La température....74
Figure 11: Variation des valeurs moyennes de la température à l'entrée et à la sortie de la station....75
II-2 pH....75
Figure 12: Variation des valeurs moyennes de pH à l'entrée et la sortie de la station....75
II- 3 demande chimique en oxygène....76
Figure 13: Variation des valeurs moyennes des DCO à l'entrée et la sortie de la station....76
II- 4 La demande biochimique en oxygène....77
Figure 14: Variation des valeurs moyennes de la DBO_5 à l'entrée et à la sortie de la station....77
II- 5 Les matières en suspension....78
Figure 15: Variation des valeurs moyennes des MES à l'entrée et à la sortie de la station....78
II- 6 Les paramètres métalliques....78
Tableau 18 : La teneur en métaux lourds dans les eaux épurées de la STEP....79
II-7 Les paramètres azotés....80
II-6 Les Nitrites 81
12 Les Nitrates 81
13 Les germes fécaux....81
Tableau 20: Valeurs moyennes des coliformes totaux; fécaux et streptocoques fécaux des eaux usées à l'entrée et la sortie de la station d'épuration d'Errachidia avec les taux d'abattements pendant l'année 2020....82
1. Les coliformes totaux....84
14 Les coliformes fécaux (CF)....84
15 Les streptocoques fécaux....85
16 Conclusion 85
I. Introduction....87
II. Résultats et discussion....88
2 -Analyses des indicateurs de contamination fécale dans les eaux d'irrigation de la....91
Laitue et la courgette....91
Tableau 21: Valeurs moyennes des coliformes totaux, coliformes fécaux et entérocoques intestinaux des eaux usées épurées à la sortie de la station d'épuration pendant l'année 2020....92
3 La qualité bactérienne de la laitue et la courgette irriguées par les eaux usées traitées....93
de la STEP de la ville d'Errachidia....93
Tableau 22: Concentration des coliformes fécaux, d'E. coli et de Salmonella dans 10 échantillons de courgettes analysés....93
Tableau 23: Concentration des coliformes fécaux, *d'E. coli* et de Salmonella dans 17 Échantillons de laitues analysés....94
4 Contamination microbiologique des cultures irriguées....94
Tableau 24: Comparaison des paramètres microbiologiques avec les normes chez courgette et la laitue (**<* (entre les deux plantes), a>b (entre chaque paramètre et sa Norme) statistiquement différents)....95
Figure 23: Analyse des correspondances des paramètres microbiens entre les cultures irriguées et les eaux usées....96
III. Conclusion 99

Chapitre 4: La qualité parasitologique des boues de la station d'épuration de la ville d'Errachidia.....100
I. Introduction.....100
L'objectif de notre travail est.....100
II. Résultats et discussion.....100
1. Concentration moyenne des kystes des protozoaires dans la boue brute.....100
2. Concentration moyenne des œufs d'helminthes dans la boue brute.....101
Figure 25: Espèces d'helminthes enregistrées dans les boues activées de la STEP d'Errachidia.....102
III. Conclusion 103
Conclusion générale et perspectives.....104
Références Bibliographiques.....107

AVANT PROPOS

Laboratoires au sein des quels les travaux de recherche ont été réalisés :

Les manipulations présentées dans ce manuscrit ont été réalisé au laboratoire de Biotechnologie, Environnement, Agro-Alimentaire et Santé (LBEAS) de la Faculté des Sciences Dhar El Mehraz, Fès , centre d'innovation de l'université si di Mohamed ben Abdellah –Fès, Institut pasteur (casa-blanca Maroc)

Contact : ouhammimed@yahoo.fr, pour entamer des discussions au sujet du présent travail de thèse et pour donner vos remarques et critiques qui sont les bienvenus.

PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Articles publiés :

- Ohammi.M, Merzouki.M And Belhassan.H, Evaluation of the quality of wastewater treated by the STEP of the cicty of Errachidia (Morocco) asian journal of water environment and pollution, volume 20, No. 3 (2023), pp. 39-45

DOI 10.3233/AJW230036

- Mohamed Ohammi,Mohammed Merzouki.And Brahim Bouchrif,Evaluation of physicochemical and microbiological contamination of wastewater treated by aerated lagoons and their reuse in irrigation of zucchini and lettuce crops , Case Studies in Chemical and Environmental Engineering,Volume10,December 2024, 100921.https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100921.

- Ouhammi M.*, Merzouki M. and Belhassan H. An Evaluation of Metallic trace Elements and the Degradation of Nitrogen Pollution by aerated Lagooning in an arid climate: The case of the Wastewater Treatment plant of the City of Errachidia, Morocco .Asian journal of water environment and pollution **(submitted).**

- **Participation à des manifestations scientifiques nationales et internationales :**

Communications orales

Ouhammi, M.,Merzouki,M.,: 10-12 Décembre 2020 , Study of the Bacteriological and Physico-chemical quality of the Raw and erroneous waste water of the STEP of the city of Errachidia :Possibility of reuse in irrigation .Third Edition of the International Virtual conference on water and Environment Studies " CI3E'2020".,Abdelmalek Essaadi University,National School of Applied Sciences,ENSA,AL Hoceima,Morocco.

Ouhammi,M.,Merzouki,M.,H.Belhassan ,27-28 Juillet 2021 « Réutilisation des eaux usées épurées de la STEP de la ville d'Errachidia (Maroc) en irrigation :risque sanitaire « :Premier Symposium International (pharmacologie,Phytothérapie et Phytochimie des Plantes Aromatiques et Medicinales),Université SultanMoulay Sliman ,Ecole Superieur de Technologie ,Khenifra ,Maroc.

Ouhammi, M.,Merzouki,M.,H.Belhassan , 27-29 Mai 2021 »Evaluation de la qualité des eaux usées Traitées par la station d'épuration de la ville d'Errrachidia » .La cinquièmes édition du JDOCST2021.Assocition des Etudants Chercheurs et le Centre d'Etudes Doctorales Sciences et Techniques de la FSTE.,Université Moulay Smail,Faculté des science et Technique d'Errrachidia.Maroc.

Ouhammi, M.,Merzouki,M.,H.Belhassan, 24-25 Novemberr 2021 "Evaluation of the aerated lagooning method applied to the wastewater treatment plant of the city of Errachidia_Morocco".First edition of the International Scopus Congress on "Environment and Naturrral Resourrrces :Challenges and Solutions (ENRSC2021)",University SultanMoulay Sliman ,Ecole Superieur de Technologie ,Khenifra ,Maroc.

Ouhammi, M.,Merzouki,M.,H.Belhassan ,15-17 Décembre 2021: "The degradation of Nitrogen pollution by Aeratment Plant in Southeast Morocco".Fourrth Edition of the International Virtual congress on waterand Environment studies"CI3E'2021",Université Sidi Mohamed Ben Abdellah –Faculté des sciences Dhar-El –Mehrrez –Fez ,Maroc.

Ouhammi, M.,Merzouki,M., March 09-11, 2023 : Evolution of the bacterial load of lettuce irrigated with purified urban wastewater in the wastewater plant of the city of errachidia in morocco, THE 5TH EDITION OF THE INTERNATIONAL CONGRESS OF WATER AND ENVIRONMENTAL STUDIES, " CI3E'2023".,Abdelmalek Essaadi University,National School of Applied Sciences,ENSA,AL Hoceima,Morocco.

Ouhammi, M.,Merzouki,M., 30-31 May 2023 " Persistence of faecal coliforms, Escherichia-coli, total coliforms, intestinal Enterococci contained in treated urban wastewater from irrigation on zucchini crops of a plot at the STEP of the city of Errachidia - Morocco" second edition of the International Scopus Congress on "Environment and Naturrral Resourrrces :Challenges and Solutions (ENRSC2023)",University SultanMoulay Sliman ,Ecole Superieur de Technologie ,Khenifra ,Maroc.

Ouhammi, M.,Merzouki,M., janury 19 and 20 ,2024 " The possibility of reusing treated wastewater From the Errachidia WWTP (Morocco) to agriculture; the case of zucchinissecond " International

congress on food and Environmental Sciences (ICFES 24') at the Faculty of Sciences,Meknes,Morocco .

Ouhammi, M, " An Evaluation of Metallic trace Elements by aerated Lagooning in an arid climate; The case of the Wastewater Treatment plant of the City of Errachidia ,Morocco" at the "Global Summit on Oil ,Gaz ,Petroleum Science and Engineering" held Virtually on March 25-26 ,2024 . Barcelona – Spain.

Remerciements

Au nom de ce travail, réalisé au laboratoire de Biotechnologie, Environnement, Agro-Alimentaire et Santé (LBEAS) de la Faculté des Sciences Dhar El Mehraz, Fès, sous la direction du Professeur MERZOUKI Mohammed, je tiens à remercier toutes les personnes ayant contribué à sa réalisation.

Je tiens à exprimer ma gratitude à Monsieur le Professeur BELKASSMI Mohammed, Doyen de la Faculté des Sciences Dar El Mehraz de Fès, pour le soin apporté à la promotion de la recherche scientifique au sein des unités de recherche.

En premier lieu, je remercie mon Directeur de thèse, Monsieur le Professeur MERZOUKI Mohammed, qui a accepté de m'accueillir au sein de son laboratoire. Je suis très sensible à l'honneur qu'il m'a fait pour diriger mon travail. Je suis aussi reconnaissant pour vos conseils judicieux, votre aide et soutien inconditionnel qui a permis la réalisation de ce travail dans les meilleures conditions. Je souhaiterais ici lui témoigner ma sincère considération pour tous les conseils et les remarques objectives et ses orientations pour faire avancer ce travail et pour l'autonomie qu'a développée en moi.

C'est un grand honneur que cette thèse soit présidée par le Professeur, GUEMMOUH Raja. Je vous remercie Madame, Professeur pour l'intérêt que vous portez à ce travail en acceptant de le juger. Je vous remercie aussi pour l'intérêt que vous manifestez à l'égard de ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur le Professeur CHAHLAOUI Abdelkader , Professeur de l'enseignement supérieur à la Faculté des Sciences –Meknès pour m'avoir honoré de votre présence en acceptant d'être rapporteur /Examinateur de ce travail et de siéger au jury de cette thèse. Qu'il trouve ici l'expression de mes vifs remerciements.

Mes remerciements les plus sincères s'adressent également à Monsieur le Professeur AIT BOUGHROUS Ali, Professeur de l'enseignement supérieur à la Faculté des Sciences et Technique d'Errachidia pour avoir accepté d'évaluer ce travail. J'ai eu le privilège de vous avoir comme rapporteur/Examinateur vues vos compétences et votre expérience dans le domaine.

Je remercie vivement le Professeur LOUASTE Bouchra, Professeur Habilité à la FSDM-Fès , pour l'honneur qu'elle me fait de designer d'être rapporteuse /Examinatrice de ce travail. Je vous remercie d'avoir acceptée d'évaluer ce travail.

Je remercie vivement le Professeur LAHKIMI Amal, Professeur Habilité à la FSDM-Fès, pour l'honneur qu'elle me fait de designer dans le jury de cette thèse. Je vous remercie d'avoir accepté d'évaluer ce travail en étant qu'examinatrice.

Ce travail de recherche est le fruit d'un long parcours de recherche au sein du laboratoire de Biotechnologie, Environnement, Agro-Alimentaire et Santé (LBEAS) de la Faculté des Sciences Dhar El Mehraz sous la direction de Pr MERZOUKI Mohammed. Je remercie chaque personne qui était membre de l'équipe de recherche. Je tiens à remercier tout particulièrement Les doctorants BELHASSANE Hajar,ZOUFRI Iman et Chaouki,Hamid pour leur grand soutien tout au long de la réalisation de ce travail. Je remercie aussi tous les autres doctorants du laboratoire de Biotechnologie, Environnement, Agro-Alimentaire et Santé (LBEAS), qui étaient toujours généreux par leur soutien et je leur souhaite tous bon courage et bonne continuation.Je tiens à remercier également les Laboratoires au sein des quels les travaux de recherche ont été réalisés tel que: laboratoire de Biotechnologie, Environnement, Agro-Alimentaire et Santé (LBEAS) de la Faculté des Sciences Dhar El Mehraz, Fès , centre d'innovation de l'université si di Mohamed ben Abdellah –Fès et Institut pasteur (casa-blanca Maroc) .

Dédicace

A ma femme et mes enfants Ayman et Salma qui ont toujours été là pour moi, et qui m’a donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance.

Veuillez trouver dans ce travail l’expression de mon profond amour, mon respect et mon Dévouement le plus sincère

A toute ma famille et mes amis

A tous mes enseignants

A tous ceux que j'aurais oublié de citer mais qui existent au fond de mon cœur

Liste des Figure

Figure 1 : Mécanismes réactionnels de la métabolisation aérobie de la pollution carbonée (Jean-Claude, B., 1998) 12
Figure 2: PHOTO des Boues résiduaires (pris par moi-même) 30
Figure 3: Situation géographique de la ville d'Errachidia..... 38
Figure 4: Schéma synoptique de la station d'épuration des eaux usées d'Errachidia type lagunage naturel 43
Figure 5: Schéma synoptique de la station d'épuration des eaux usées d'Errachidia type lagunage aéré (Ouhammi, M et al. ,2023) 44
Figure 6: Photo de plantules de laitue 55
Figure 7 : Photos des plantules de laitue et courgette dans la parcelle expérimentale 55
Figure 8: Photos des feuilles de laitues matures 55
Figure 9: Photos des feuilles de laitues et légumes de courgettes 56
Figure 10: Photos des légums de courgettes matures..... 56
Figure 11: Variation des valeurs moyennes de la température à l'entrée et à la sortie de la station d'épuration 75
Figure 12: Variation des valeurs moyennes de pH à l'entrée et la sortie de la station 75
Figure 13: Variation des valeurs moyennes des DCO à l'entrée et la sortie de la station d'Errachidia 76
Figure 14: Variation des valeurs moyennes de la DBO5 à l'entrée et à la sortie de la station 77
Figure 15: Variation des valeurs moyennes des MES à l'entrée et à la sortie de la station 78
Figure 16: Variation des valeurs moyennes des températures pendant les mois de janvier au mois de juin de l'année 2020 88
Figure 17: Variation des valeurs moyennes du pH pendant les mois de janvier au mois de juin de l'année 2020 88
Figure 18: Variation des valeurs moyennes de la conductivité électrique pendant les mois de janvier au mois de juin de l'année 2020..... 89
Figure 19: Variation des valeurs moyennes de la DBO5 en mg/l pendant les mois de janvier au mois de juin de l'année 2020..... 89
Figure 20: Variation des valeurs moyennes des MES en mg/l pendant les mois de janvier au mois de juin de l'année 2020..... 90
Figure 21: Tracé (PCA) des paramètres physico-chimiques de janvier à mai des eaux usées des lagunes aérées d'Errachidia..... 90
Figure 22: Analyse des correspondances des paramètres microbiens entre les cultures irriguées et les eaux usées..... 91
Figure 23: Espèces de protozoaires enregistrées dans les boues activées de la STEP d'Errachidia 100
Figure 24: Espèces d'helminthes enregistrées dans les boues activées de la STEP d'Errachidia . 101

Liste des tableaux

Tableau 1: Tolérance à la salinité de quelques plantes cultivées (FAO, 1985).....20
Tableau 2: Les bactéries pathogènes dans les eaux usées Asano (1998) 24
Tableau 3 : Les parasites pathogènes dans les eaux usées (Boutin 1987).....25
Tableau 4 : Doses minimales infectantes (DMI) au moyennes des agents pathogènes présents dans les eaux usées (Cauchi et al, 1996) 26
Tableau 5: Présentation de la station type lagunage naturel d'Errachidia.....41
Tableau 6: Présentation de la station type lagunage aéré 45
Tableau 7 : Les volumes nécessaires aux horizons 2020 et 2030. 47
Tableau 8: Caractéristiques techniques des bassins aérobies 48
Tableau 9: Caractéristiques des bassins de maturation.....50
Tableau 10: Méthodes de dénombrement des germes recherchés tel que : Coliformes totaux, Coliformes fécaux, Entérocoques intestinaux, Escherichia coli et Salmonella 57
Tableau 11: Paramètres physico-chimique des eaux usées brutes à l'entrée de la station d'épuration d'Errachidia pendant l'année 2020 63
Tableau 12 : La teneur en métaux lourds dans les eaux usées brutes de la STEP.....65
Tableau 13 : Résultats moyennes d'analyses durant les cinq mois de suivi des formes azoté à l'entrée de la STEP d'Errachidia.....66
Tableau 14 : Valeurs moyennes des coliformes totaux; fécaux et streptocoques fécaux des eaux usées à l'entrée de la station d'épuration d'Errachidia pendant l'année 2020.....68
Tableau 15: L'analyse physico-chimique des eaux usées épurées de la STEP de la ville d'Errachidia, au cours de l'année 2020.....71
Tableau 16: Paramètres physico-chimiques à l'entrée et à la sortie de la station d'épuration avec les taux d'abattement pendant l'année 2020 72
Tableau 17: Paramètres physico-chimiques à l'entrée et à la sortie de la station d'épuration des saisons estivales (Mai, Juin, Juillet, Aout) et saison hivernale (Octobre, Novembre, Décembre) avec des taux d'abattement pendant l'année 2020..... 73
Tableau 18 : La teneur en métaux lourds dans les eaux épurées de la STEP d'Errachidia 79
Tableau 19 : Résultats d'analyses des paramètres moyens azotés durant les cinq mois de suivi à la sortie de la STEP d'Errachidia 80
Tableau 20: Valeurs moyennes des coliformes totaux; fécaux et streptocoques fécaux des eaux usées à l'entrée et la sortie de la station d'épuration d'Errachidia avec les taux d'abattements pendant l'année 2020..... 82
Tableau 21: Valeurs moyennes des coliformes totaux, coliformes fécaux et entérocoques Intestinaux des eaux usées épurées à la sortie de la station d'épuration pendant l'année 2020… 92
Tableau 22: Concentration des coliformes fécaux, d'E. coli et de Salmonella dans 10 échantillons de courgettes analysés.....93
Tableau 23: Concentration des coliformes fécaux, d'E. coli et de Salmonella dans 17.....94
Tableau 24: Comparaison des paramètres microbiologiques avec les normes chez courgette et la laitue (**<* (entre les deux plantes), a>b (entre chaque paramètre et sa Norme) statistiquement différents).....95

Liste des Abréviations

CE : Conductivité Électrique

CF : Coliformes Fécaux

CT : Coliformes Totaux

SF : Streptocoque fécaux

Cu : Cuivre

DBO_5 : Demande biochimique en oxygène

DCO : Demande chimique en oxygène

ETM : Élément Trace Métallique

LBEAS : Laboratoire de Biotechnologie, Environnement, Agro-alimentaire et Santé

MES : Matière En Suspension

VLR : Valeurs Limites générales de Rejet

STEP : Station d'épuration

AEP : Approvisionnement en eau potable

PCB : Biphényles polychlorés

MVS : Matiére en suspension volatils

MMS : Matiére en suspension minerale

POP : Polluants organiques persistants

COV : Composés organiques volatils

CNS : Le Comité des normes et tandards

VHA : Virus d'hépatite À

FMAT : Floresscences des Microorganismes aérobie Total .

NGM : (Nivellement Géneral du Maroc) ,c'est un point dont l'altitude par rapport au niveau moyen des mers est connue avec précision

REP : Répartisseurs de débits

Qm : Charge massique

NH_4^+ : Ion ammonium

NO_2^- ; ion Nitrite

NO_3^- : Ion Nitrate

Résumé

La rareté de l'eau est l'un des problèmes majeurs du monde d'aujourd'hui. À cause notamment de la pollution, du changement climatique, de la surpopulation et de la mauvaise utilisation des ressources. Une grande partie de la planète manque d'eau, un bien pourtant indispensable à la vie, anssi la problematique de la rareté de l'eau dans les régions arides et semi-arides dont fait partie la region d'Errachidia est une question cruciale qui impacte directement le developpement socio-economique, la santé publique et la securité alimentaire Il convient donc de chercher des ressources alternatives telles que les eaux usées épurées (EUE). Notre travail de thèse porte d'une part, sur la caractérisation physico-chimique et bactériologique des eaux usées brutes et épurées par lagunage aéré de la STEP de la ville d'Errachidia (Maroc) pour une évaluation de leur qualité et d'autre part, sur l'évaluation de la teneur en métaux lourds et en polluant organiques et azotés des eaux usées brutes et épurées de cette station. Ce travail de thèse aborde aussi la possibilité de valorisation des eaux usées épurées de la station d'épuration en agriculture, telle que la qualité de la laitue et de la courgette irriguées par ces eaux traitées et consomable par la population durant toute l'année. Les analyses physico-chimiques des eaux usées telles que la $DB0_5$, la DCO et les MES ainsi que bactériologiques ont été réalisés selon les méthodes marocaines standardisées. En outre, les éléments-traces ont été dosés par spectrométrie d'émission atomique par plasma à couplage inductif (ICP-AES). Les ions NH_4^+, NO_2^- et NO_3^- ont été analysés par les méthodes standardisées. L'analyse parasitologique de la boue comporte la recherche des kystes de protozoaires et les œufs d'helminthes, et a été effectuée par la méthode de Ritchie. Enfin, l'analyse bactériologique des feuilles de laitue et la courgette irriguées par les eaux usées traitées de la STEP ont été analysées par les méthodes marocaines standardisées.

Les résultats de la caractérisation physico-chimique des eaux usées traitées montrent que la température, les MES, la DCO et la DBO_5 répondent aux valeurs-limites générales pour le rejet des eaux de surface marocaines, Les rendements d'abattement avec le lagunage aéré atteignent des valeurs moyennes de 70,47 %, 60,21 % et 44,02 %, respectivement, pour la DBO_5, la DCO et les MES. Concernant la caractérisation métallique, les concentrations des métaux lourds présents dans les eaux épurées tels que : Ag, Al, Cd, Co, Cr, Cu et Pl, sont inférieures aux normes marocaines de rejet des eaux de surface. Pour la caractérisation microbiologique, les résultats ont montré la présence de divers germes avec des valeurs moyennes annuelles où les coliformes fécaux (CF) sont de 680 UFC/100 ml, les coliformes totaux (CT) sont de 2810 UFC/100 et les streptocoques fécaux sont de 46 UFC/100 ml. Ces concentrations restent en dessous des valeurs-limites recommandées par les normes marocaines d'irrigation (CF < 1000 UFC/100 ml), ce qui permet leur exploitation et leur réutilisation dans l'irrigation. le procédé de traitement a permis l'élimination de la pollution azotée avec des taux d'abattement respectivement de 52,59%,48,75 % et 78,80 % pour les NH_4^+, les NO_2^-et NO_3^-. Ainsi les résultats d_4'analyse $d_2$es $légum_3$es issues de l'irrigation par les eaux usée épurées montrent la présence, de diverses bactéries. Pour le cas de la laitue, les CT=3541,11 UFC/g; les CF= 73,05 UFC/g; les Entérocoques intestinaux=9366, 76 UFC/g; *Escherichia coli* = 7,17 UFC/g et *salmonella* (absente/25g). Pour la courgette, les CT=101,2 UFC/g ; les CF=7,7±1,63 UFC/g; les entérocoques intestinaux=589,9 UFC/g, *Escherichia coli*=7,3 UFC/g, et *Salmonella* (absente/25 g). Ces valeurs sont supérieures aux normes marocaines. Ainsi les résultats d'analyses enregistrés pour la boue ont montré des charges importantes des micro-organismes étudiés. Au total, trois kystes de protozoaires ont été recherchés, dont *Entamoeba hystolytica*, *Balantidium coli* et *Giardia lamblia*. L'analyse lesquelles a montré des concentrations différentes selon les espèces de parasites. Six œufs d'helminthes, avec des concentrations variables, ont été trouvés. La concentration la plus élevée de *Tænia saginata* et de *Schistosoma haematobium* est de 33,3 parasites par litre..

Mots clés : Eau usée, Lagunage aéré, paramètres physico-chimiques, paramètres microbiologiques, réutilisation en irrigation, légumes, boue.

Abstract

Water scarcity is one of the major problems facing the world today. The causes include pollution, climate change, overpopulation and the misuse of resources. A large part of the planet lacks water, a commodity that is essential to life. It is therefore, necessary to look for alternative resources such as purified wastewater. Our thesis work focuses on the physico-chemical and bacteriological characterization of raw wastewater and wastewater treated by aerated lagooning at the Errachidia WWTP (Morocco), to assess its quality, and on the evaluation of the heavy metal, organic and nitrogenous pollutant content of raw and treated wastewater from this plant. This thesis also addresses the possibility of using treated wastewater from the treatment plant for agricultural purposes, such as irrigating lettuce and zucchinis with this water. Physico-chemical analyses of the wastewater, such as DB05, COD and TSS, as well as bacteriological analyses, were carried out using standardized Moroccan methods. In addition, trace elements were measured by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES). NH_4^+, NO^{--} and NO^- ions were analyzed by standardized methods. Parasitological analysis of the sludge involved the detection of protozoan cysts and helminth eggs and was carried out using the Ritchie method. Finally, the bacteriological analysis of lettuce leaves and zucchini irrigated with treated wastewater from the WWTP were analyzed using standardized Moroccan methods.

The results of the physico-chemical characterization of the treated wastewater show that temperature, TSS, COD and BOD5 meet the general discharge limits for Moroccan surface waters, thus protecting the environment. Abatement efficiencies with aerated lagooning reached average values of 70.47%, 60.21% and 44.02%, respectively, for BOD5, COD and TSS. Concerning metallic characterization, concentrations of heavy metals present in treated water, such as: Ag, Al, Cd, Co, Cr, Cu and Pl, are below Moroccan standards for surface water discharge. For microbiological characterization, the results show the presence of various germs, with average annual values for fecal coliforms (FC) at 680 CFU/100 ml, total coliforms (TC) at 2810 CFU/100 and fecal streptococci at 46 CFU/100 ml. These concentrations remain below the limit values recommended by Moroccan irrigation standards (CF < 1000 UFC/100 ml), enabling them to be exploited and reused in irrigation. Our treatment process eliminated nitrogen pollution with abatement rates of 52.59%, 48.75% and 78.80% for NH_4+, NO^- and NO^- respectively. The results of analysis of vegetables irrigated with treated wastewater show the presence of various bacteria. For For lettuce, TC=3541.11 CFU/g; CF=73.05 CFU/g; intestinal enterococci=9366.76 CFU/g; *Escherichia coli* = 7.17 CFU/g and *salmonella* (absent/25g). For zucchini, TC=101.2 CFU/g; CF=7.7±1.63 CFU/g; intestinal enterococci=589.9 CFU/g, *Escherichia coli*=7.3 CFU/g, and *Salmonella* (absent/25g). These values are higher than Moroccan standards. The results of the sludge analyses showed significant loads of the micro-organisms studied. A total of three protozoan cysts were tested, including Entamoeba hystolytica, Balantidium coli and *Giardia lamblia*. Analysis of the samples showed different concentrations depending on the parasite species. Six helminth eggs, with varying concentrations, were found. The highest concentration was found for *Taenia saginata* and *Schistosoma haematobium*.

Keywords: wastewater, aerated lagooning, physico-chemical parameters, microbiological parameters, irrigation reuse, vegetables, sludge.

الملخص

تعد ندرة المياه إحدى المشاكل الرئيسية التي تواجه العالم اليوم. وتشمل أسبابها التلوث وتغير المناخ والزيادة السكانية وسوء استخدام الموارد.يعان ً يجزء كبير من كوكب ألارض من نقص في المياه، على الرغم من أنها ضرورية للحياة.

تعتبر مشكلة ندرة المياه في المناطق القاحلة وشبه القاحلة التي تعتبر منطقة الرشيدية ج ًزءا منها مشكلة حاسمة لها تأثير مباشر على التنمية االجتماعية والإقتصادية والصحة العامة واألمن الغذائي،لذلك من المناسب البحث عن موارد بديلة مثل مياه الصرف الصحي المنقاة)ٌPWW)يركز عمل أطروحتنا على التوصيف الفيزيائي والكيميائي والبكتريولوجي لمياه الصرف الصحي المعالجة بالبحيرات الهوائية في محطة معالجة مياه الصرف الصحي بالرشيدية)المغرب(لتقييم جودتها، وثانيا، على تقييم المحتوى المعدني الثقيل والعضوي والنيتروجيني الملوث لمياه الصرف الصحي الخام والمعالجة من هذه المحطة.

تبحث هذه ألاطروحة أيضا في إمكانية استخدام مياه الصرف الصحي المعالجة من محطة معالجة مياه الصرف الصحي في الزراعة، مثل جودة الخس والكوسة المروية بهذه المياه المعالجة والتي يستهلكها السكان على مدار العام. تم إجراء التحاليل الفيزيائية والكيميائية لمياه الصرف الصحي، مثل تحليالت فيزيائية وكيميائية لمياه الصرف الصحي، مثل ، 05DBو CODو ، TSSوكذلك التحاليل البكتريولوجية، باستخدام الطرق المغربية القياسية. باإلضافة إلى ذلك تم قياس العناصر النزرة عن طريق مطياف االنبعاث الذري للبالزما المقرونة بالحث) .(ICP-AES)تم تحليل أيونات) NH_4^+، NO_2^- و NO_3^- (باستخدام طرق موحدة.

وشمل التحليل الطفيلي للحماة البحث عن الكيسات ألولية وبيض الديدان الطفيلية، وتم إجراء التحليل باستخدام طريقة **ريتشي**. وأخيرا، تم إجراء التحليل البكتريولوجي ألوراق الخس والكوسة المروية بمياه الصرف الصخي المعالجة من محطة معالجة مياه الصرف الصحي باستخدام الطرق المغربية القياسية. تظهر نتائج التوصيف الفيزيائي والكيميائي لمياه الصرف الصحي المعالجة أن درجة الحرارة، و ،TSSو، CODو BOD5 تفي بالقيم الحدية العامة لتصريف المياه السطحية المغربية. تصل كفاءات

التخفيف مع البحيرات الهوائية إلى متوسط قيم 70.74%و% 60.21و% 44.02على التوالي لـ ، 5BODو CODو TSSفيما يتعلق بتوصيف المعادن، فإن تركيزات المعادن الثقيلة الموجودة في المياه المعالجة، مثلAg :وAl وCd وCd وCo وCr وCu وCu و Pl، أقل من المعايير المغربية لتصريف المياه السطحية. بالنسبة للتوصيف

الميكروبيولوجي، أظهرت النتائج وجود جراثيم مختلفة بمتوسط قيم سنوية حيث تبلغ تركيزات القولونيات البرازية 680 وحدة من البكتيريا القولونية البرازية 680 (FC)وحدة من البكتيريا القولونية لكل 100مل، البكتيريا القولونية الكلية 2810 وحدة من البكتيريا القولونية لكل 100مل، البكتيريا العقدية البرازية 46 وحدة من البكتيريا العقدية لكل 100مل.

وتبقى هذه التركيزات أقل من القيم الحدية الموصى بها من قبل معايير الري المغربية 1000 > CF) وحدة براز100 /مل،(مما يعني انه يمكن استخدامها وإعادة استخدامها في الري. وقد قضت عملية المعالجة على التلوث بالنُّتروجين بمعدالت خفض بلغت % 50.59و% 48.75و 78.80%على التوال ً يبالنسبة لـ) NH_4^+، NO_2^- و NO_3^- (، أظهرت نتائج تحليالت الخضروات المروية بمياه الصرف الصحي المعالجة وجود بكتيريا مختلفة. بالنسبة للخس، TC=3541.11وحدةCFU /غرام؛ CF=73.05وحدةCFU/ غرام؛ المكورات المعوية المعوية= 9366.76وحدة / CFUغرام؛ اإلشريكية القولونية7.17 = وحدةCFU/ غرام والسالمونيال)غائبة/ 25جم(. بالنسبة إلى الكوسة، TC=101.2 وحدة حرارية معوية/غرام؛1.63 ± CF=7.7 وحدة حرارية معوية /غرام؛ المكورات المعوية المعوية = 589.9 وحدة حرارية معوية /غرام، اإلشريكية القولونية = 7.3وحدة حرارية معوية /غرام، والسالمونيال)غائبة/ 25جم(.

هذه القيم أعلى من العايير المغربية. أظهرت النتائج التحليلية المسجلة للحماة وجود كميات كبيرة من الكائنات الدقيقة التي تمت دراستها. تم اكتشاف ما مجموعه ثالثة كيسات أولية، بما في ذلك إنتامويبا هيستوليتيكا، وباالنتيديوم كوالي والجيارجيا اللمبلية. أظهر التحليل تركيزات مختلفة اعتماداً على أنواع الطفيليات. تم العثور على ست بيضات من الديدان الطفيلية بتركيزات متفاوتة. وكان أعلى تركيز لديدان تينيا ساجيناتا والبهيماتوبيوم البلهارسيا هو 33.3طفيلياً لكل لتر.

الكلمات المفتاحية :مياه الصرف الصحي، والبحيرات الهوائية، والبارامترات الفيزيائية الكيميائية ، والبارامترات الميكروبيولوجية ، وإعادة استخدام الري، والخضروات، والحمأة.

Introduction générale

L'eau est un patrimoine universel qui doit être préservé, défendu et traité (Groenfeldt 2021). Elle ne peut pas être considérée comme un simple bien économique. C'est une ressource essentielle pour l'alimentation, la survie et la santé de l'humanité (Chowdhary et al ., 2020). Elle est également cruciale pour ses activités économiques et agricoles et a un impact direct sur la qualité de l'environnement (Mainardis et al., 2022). Mais elle sert de conteneur universel à toutes sortes de pollutions (Singh et al . ,2022). La répartition de l'eau sur la planète est incroyablement inégale. Toutes les nations devraient éventuellement faire face au problème de sa pénurie. Les pouvoirs publics ont toujours accordé une grande priorité à la mobilisation des eaux de surface (Devaux, 1999 ; Scotland, 2001). La population des pays vulnérables aux inondations continue de croître, et avec elle, la demande en nourriture et en eau augmente également. Ce problème a toujours été résolu en développant l'agriculture à grande échelle et/ou en mobilisant simplement davantage des ressources en eau conventionnelles désormais accessibles, mais ces réserves approchent actuellement de leurs limites naturelles (Zubaidi et al ., 2020). Néanmoins, ces mêmes ressources ont été soumises à une variété de polluants au cours des dernières décennies, ce qui restreint leur utilisation normale et leur fonction première, qui est l'approvisionnement en eau potable (AEP) (Fazio, 2001). L'épuration des eaux usées urbaines est un outil crucial pour répondre à cette crise et sauvegarder l'environnement, en particulier dans les pays hydrologiquement sensibles (Ghosh et Ghosh ,2021). D'une part, les eaux usées purifiées et chargées en nutriments comme le phosphore et l'azote constitueraient une source renouvelable et fiable d'eau supplémentaire et d'engrais pour l'agriculture (Khan et al., 2022). Cela permettrait cependant de relâcher la pression sur les ressources conventionnelles, mieux adaptées à l'approvisionnement en eau potable des populations. A l'heure actuelle, le volume total des eaux usées rejetées au Maroc est estimé à environ 750 millions de m^3, dont 48% sont rejetés dans les rivières et le milieu naturel et les 48% restants sont rejetés à la mer sans aucun traitement préalable (Mandi et Ouazani, 2013, Dahchour et El Hajjaji ,2023).

. Les besoins en eau douce augmentent, ce qui rend impossible de compter uniquement sur les ressources naturelles conventionnelles (Hssaisoune et al .,2020). La réutilisation des effluents traitées et la recherche de méthodes d'épuration adaptées sont apparues comme des alternatives viables et nécessaires (Ortega-Pozo et al., 2022). Même dans le cas d'eaux usées traitées provenant de stations d'épuration qui ne sont pas recyclées, ces effluents ont fréquemment une charge en

azote et en phosphore supérieure aux normes requises car beaucoup de ces stations ont des limites dans la rétention des ions phosphate et nitrate en traitement secondaire (Zhou et al 2022). Ceci afin de mobiliser de grands volumes d'eau et ainsi satisfaire une demande de plus en plus croissante, notamment dans les pays arides et semi-arides. Il existe un certain risque à libérer ces nutriments directement dans des environnements réceptifs (Fito et al 2021). Afin de mieux protéger les écosystèmes récepteurs du phénomène d'eutrophisation, des traitements complémentaires ou tertiaires sont nécessaires, l'enrichissement en azote minéral couplé au phosphore dans les milieux aquatiques étant nocif pour l'environnement et la santé publique (Marsalek et al, 2002 ; Vassel, 2007).

Les systèmes sol-plante, lagunage, boues activées, systèmes combinés biologiques et physico-chimiques, sont quelques-unes des méthodes permettant de réduire ces deux nutriments qui ont fait l'objet de recherches approfondies (Vassel, 1996 ; Liu et al., 1997, Kimisto et al 2022). Plus précisément, ils permettent d'éliminer environ 70 % du phosphate et de l'azote fournis par les effluents secondaires (Junger 2000 ; Lazarova et al, 2003, Nazari et al 2021).

Les boues d'épuration sont produites comme un sous-produit nécessaire du traitement des eaux usées domestiques et constituent l'une des meilleures alternatives à la mise en décharge et à l'incinération lorsqu'elles sont utilisées comme engrais dans l'agriculture (Hurynovich et al .,2021). A la base des informations provenant des rapports de l'EPA des États-Unis, il a été estimé que respectivement 16 et 22 % de toutes les boues sont mises en décharge ou brûlées (United States environnemental protection Agency, 2019). Il existe une reconnaissance mondiale du potentiel de l'utilisation agricole des boues d'épuration dans la gestion de cette ressource, car elle peut réduire la pollution de l'environnement et soutenir l'économie circulaire en convertissant les déchets en ressources (Kacprzak et al., 2007). Lorsque la boue est utilisée comme engrais organique, la teneur en matière organique paurait améliorer les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du sol et entraîner de bonnes réponses en matière de rendement des plantes (Usman et al ., 2012, Bittencourt ,2018). La sécurité de la réutilisation des boues d'épuration reste cependant le principal obstacle. L'accumulation de matières dangereuses comme les métaux lourds, les nouveaux contaminants et les micro-organismes pathogènes comme les œufs d'helminthes et les kystes de protozoaires rend la réutilisation des boues potentiellement dangereuse.

Plusieurs pays ont créé des lois régissant la réutilisation agricole des boues d'épuration pour surveiller les caractéristiques microbiologiques, en particulier les œufs d'helminthes, dans le but de réduire les risques pour la santé associés aux agents pathogènes (Ammar et al .,2020,

Sabbahi et al ., 2022). Tous les pays, à l'exception de la Russie, ont des lois qui interdisent l'utilisation de parasites ou de protozoaires. Cela est principalement dû au fait que les helminthes ont un cycle de vie plus compliqué que les kystes de protozoaires. De plus, comparé aux kystes de protozoaires, leur persistance environnementale dans le sol et les cultures dure beaucoup plus longtemps (Jiménez-Cisneros, 2006). Plutôt que l'exposition aux eaux usées ou aux boues, l'hygiène est le principal facteur prédisposant à un risque accru d'infections parasitaires (principalement des protozoaires), comme l'ont documenté Amoah et al. (2018) et Pham-Duc et al. (2011). Cependant, les producteurs et les consommateurs de légumes irrigués avec des eaux usées ou des sols altérés par des boues signalent une forte prévalence de maladies géohelminthiases. Ceci est soutenu par des enquêtes épidémiologiques. Selon Capizzi et Schwartzbrod (2001), une norme mondiale pour la réutilisation des boues d'épuration en agriculture est l'établissement d'une concentration maximale d'œufs d'helminthes viables dans les boues. Les références suivantes donnent un aperçu des niveaux maximaux recommandés de parasites intestinaux, définis par différents pays, dans les boues d'épuration destinées à la réutilisation agricole , (Hudcovà, et al., 2019, OMS, 2006).

Le principal objectif de cette étude est le suivant :

Traiter l'effluent par le lagunage aérée, afin d'avoir un effluent qui répond aux Normes de rejets marocaines en vigueur.

Pour arriver à cet objectif, nous devrons accomplir les objectifs spécifiques tels que :

-Traiter l' effluent par voie biologique tel que lagunage aérée.

- Etude de la caractérisation physico-chimique et bactériologique des eaux usées brutes et épurées de la station d'épuration de la ville d'Errachidia ,.

-Évaluation des éléments-traces métalliques et la dégradation de la pollution azotée par Lagunage aéré à l'entrée et à la sortie de la station d'épuration. .

-Étudier les performances épuratoires de la station d'épuration.

-Etudier la réutilisation des eaux épurées en irrigation de la laitue et la courgette .

Ce travail est structuré selon la répartition suivante :

- **Partie I :** la synthèse bibliographique.
- **Partie II :** matériel et méthodes nécessaire pour atteindre les objectifs cités.

- **Partie III :** Résultats et discussions, sont subdivisés en quatre chapitres.

• le premier chapitre est réservé à l'évaluation de la qualité des eaux usées brutes de la STEP de la ville d'Errachidia (Maroc).

• Le deuxième chapitre consiste à l'évaluation de la qualité des eaux usées traitées par lagunage aéré au niveau de la station d'épuration de la ville d'Errachidia (Maroc).

•Le troisième chapitre consiste à la réutilisation des eaux usées traitées de la station d'épuration de la ville d'Errachidia (Maroc) en agriculture: risque sanitaire

• Le quatrième chapitre consiste à l'analyse des boues de la STEP d'Errachidia en vue de leur valorisation en agriculture.

En fin une conclusion et perspectives.

Partie I : Synthèse Bibliographique

Chapitre I : Paramètres de qualité et traitement biologique des eaux usées.

I. Introduction

Les eaux naturelles sont très complexes car elles ont été modifiées par l'activité humaine après avoir été utilisées à des fins résidentielles, commerciales, industrielles, artisanales ou autres (Tariq et Mushtaq, 2023). Puisqu'elles sont considérées comme contaminées, elles doivent être traiter avant d'être réutilisées ou introduites dans des milieux naturels (Selghi, 2001). C'est la raison pour laquelle tous les effluents urbains ou industriels subissent un traitement ou une éradication de ses polluants afin de respecter les divers habitats naturels récepteurs. Selon Paulsrud et Haraldsen (1993), les traitements peuvent être appliqués individuellement ou en grands lots au sein d'une usine de traitement. La dépollution des eaux usées urbaines nécessite une série d'étapes impliquant des traitements physiques, physico-chimiques et biologiques (Patel et al., 2021). En plus, des polluants les plus importants présents dans les eaux usées, l'épuration doit permettre, au minimum, d'éliminer la majorité de la pollution carbonée (Shah et al .,2020). Une solution permettant de résoudre les différents problèmes de contamination des habitats aquatiques récepteurs est le traitement des eaux usées.

1. Pouvoir dissociant de l'eau

L'eau est un excellent solvant car elle dissout de nombreuses entités ioniques, y compris certains produits chimiques dangereux et sels qui produisent des ions (Gonella et al ., 2020). La raison de cette dégradation est que les molécules d'eau sont polaires, ce qui signifie que les signes opposés des ions polaires ou des molécules proches les attirent en raison de leurs charges positives et négatives (Gonella et al .,2020). En formant un écran autour de ces molécules ou ions polaires, ils contribuent à les disperser dans le liquide en les gardant éloignés de leurs congénères. En raison de cette caractéristique, l'eau est le support idéal pour les composés dangereux ou essentiels pour les plantes et les humains.

2. Définition d'une eau usée

La contamination de l'eau est définie comme toute altération préjudiciable ou défavorable des caractéristiques biologiques et physico-chimiques résultant d'une activité humaine directe ou indirecte et rendant les matériaux impropres à un usage régulier et établi (Salam and Sultana 2022). Toute eau qui pénètre dans les systèmes d'assainissement provenant de sources résidentielles, commerciales et agricoles et qui est contaminée par des matières nocives est considérée comme eau usée (Kesari et al., 2021). L'eau de pluie et sa charge polluante sont

Également considérées comme des eaux usées ; elles provoquent de nombreuses formes de contamination et de gêne dans le milieu récepteur (Dugniolle, 1980 ; Glanic et Benneton, 1989).

3. Origine des eaux usées

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

3.1. Eaux usées domestiques

Ils proviennent de nombreuses applications domestiques. Ce sont essentiellement des transporteurs de pollution organique (Koul et al., 2022). Elles sont séparées en deux catégories : les eaux noires et les eaux grises. Les eaux grises proviennent des cuisines et des salles de bains et sont généralement chargées de détergents, de graisses, de solvants et de déchets organiques. Ce sont des matières fécales et des bactéries fécales, ainsi qu'une variété de matières organiques azotées, qui sont rejetées par les toilettes (Libés 2010, Koul et al .,2022) .

3.2. Eaux usées industrielles

Les lixiviats des sites d'enfouissement, les eaux usées industrielles et minières et les pratiques de gestion des déchets solides peuvent tous produire des composés organiques dangereux comme des biphényles polychlorés (PCB), des hydrocarbures, des polluants organiques persistants (POP), des composés organiques volatils (COV), et des solvants chlorés (Razzak et al .,2022, Abdel-Shafy et al .,2024). Certains composés chimiques peuvent polluer d'énormes quantités d'eau en très petites quantités.

3.3. Eaux agricoles

L'agriculture utilisant des pesticides et des engrais, constitue une source majeure de contamination de l'eau (Srivastav et al., 2020). C'est la première cause de pollution diffuse. Le ruissellement agricole entraîne un excès d'éléments azotés ou phosphatés dans les eaux souterraines (Bijay-Singh et Craswell, 2021). Les eaux de ruissellement des terres cultivées chargées en engrais nitrates et phosphatés, à l'état ionique, ne seraient pas à terme absorbées par le sol et assimilées par les plantes

3.4. Eaux pluviales

L'eau de pluie accumulée dans les gouttières transporte des contaminants provenant de l'air, de la poussière, des débris, de la suie provenant des brûlures et des hydrocarbures provenant

des voitures en mouvement (Müller et al., 2020). L'eau de pluie est fréquemment déversée directement dans les rivières, polluant gravement l'écosystème aquatique. Alternativement, elle est généralement collectée avec les eaux usées, puis rejetée dans le réseau d'assainissement et transférée vers une station d'épuration (Oliveira et al., 2020).

II. Caractéristiques des eaux usées

Des indicateurs de qualité microbiologique et physico-chimique sont établis par des normes de rejet des eaux usées (Szklarek et al.,2021). De nombreuses analyses permettent de quantifier ce potentiel de pollution. Les analyses suivantes peuvent être appliquées aux eaux usées des habitations et des entreprises :

1. Paramètres physico-chimiques

Ils surviennent lorsque des substances sont introduites dans un environnement, le modifiant au cours du processus et modifiant généralement les propriétés physico-chimiques du milieu récepteur (Olabode et al ., 2020). Ces paramètres sont dosés en milieu naturel, à l'entrée et à la sortie de la station de traitement (STEP), ainsi qu'au niveau du rejet (Olabode et al., 2020).

1.1. La température

La température est un élément abiotique essentiel dans les milieux aquatiques (Bonacina et al., 2023). L'élévation de la température peut potentiellement modifier radicalement la vie aquatique (pollution thermique). La plage de températures idéale pour la nitrification est de 28 à 32°C. Néanmoins, elle cesse à des températures inférieures à 5°C et diminue significativement autour de 12 à 15°C (Rodier et al., 2005).

1.2. p H

En raison de la sensibilité des organismes aux changements des pH, la faune et la flore aquatiques ne peuvent se développer correctement que dans des milieux où le pH est compris entre 6 et 9 (Santore et al. ,2021). L'impact du pH se fait également sentir sur d'autres éléments, comme les métaux, modifiant ainsi leur toxicité. Le développement des bactéries et l'épuration d'un effluent sont fortement influencés par le pH. La nitrification n'est optimale que lorsque le pH est compris entre 7,5 et 9.

1.3. Turbidité

La turbidité est un indicateur de pollution qui indique la présence de débris colloïdaux ou organiques en suspension dans les eaux usées (Kastali et al., 2021). Elle est inversement

proportionnelle à la clarté de l'eau. Elle fluctue en fonction de la quantité de matières en suspension (MES) dans l'eau.

1.4. Matières en suspension (MES)

Elles représentent la portion composée de toutes les particules organiques (MVS) ou minérales (MMS) non dissoutes (Salem et Thiemann ,2022). Elles constituent un paramètre significatif qui illustre amplement le niveau de contamination d'un effluent industriel, et urbain.

Une abondance de matières minérales en suspension dans l'eau provoque une turbidité, qui à son tour affecte la luminosité et la productivité d'un cours d'eau (Echebiri et al ., 2023). Ceci, à son tour, provoque une diminution de l'oxygène dissous et ralentit les processus photosynthétiques qui aident à aérer l'eau. L'existence d'un pourcentage important de matières organiques utilisant de l'oxygène peut accélérer ce processus (Duguet et al.,2006).

1.5. Conductivité électrique (CE)

La capacité de l'eau à faciliter la circulation d'un courant électrique est connue sous le nom de conductivité électrique (Zhang et al., 2022). Elle donne un indicateur clair sur des sels dissous. La mesure de la conductivité permet d'évaluer la minéralisation de l'eau (REJSEK, 2002). Cette mesure est utile car elle permet de réduire la prolifération des micro-organismes là où on constate une diminution des performances enzymatiques au-dessus du seuil de salinité de 2500 µSm/cm.

1.6. Demande biochimique en oxygène (DBO5)

La DBO5 est la quantité d'oxygène que les bactéries consomment à 20°C, à l'obscurité et au cours de cinq jours d'incubation d'un échantillon préalablement inoculé (Onuoha et al., 2022). Cette durée d'incubation garantit l'oxydation biologique d'une partie de la matière organique carbonée. Ce paramètre calcule la quantité d'oxygène nécessaire aux bacteries aérobies pour l'oxydation des matières organiques.

1.7. Demande chimique en oxygène (DCO)

C'est la quantité d'oxygène nécessaire à la dégradation chimique de toutes les matières organiques présentes dans l'eau, qu'elles soient biodégradables ou non. Le coefficient de biodégradabilité et l'origine d'un effluent peuvent être déterminés en calculant le rapport DCO/DBO (Suschka et Ferreira 1986).

1.8. Biodégradabilité

La biodégradabilité interprète l'aptitude d'un effluent à être altéré ou oxydé par les micro-organismes qui sont impliqués dans le processus d'épuration biologique des eaux usées (Thanigaivel et al., 2022). La biodégradabilité est calculée par un coefficient K, tel que, K=DCO /DBO5 :

Si k < 1,5 : cela signifie que les matières oxydables sont constituées en grande partie de matières fortement biodégradables.

Si 1,5 < K< 2,5 : cela signifie que les matières oxydables sont moyennement biodégradables.

Si 2,5 < K< 3 : les matières oxydables sont peu biodégradables.

Si K> 3 : les matières oxydables sont non biodégradables

Un coefficient K extrêmement élevé indique la présence dans l'eau de substances telles que des sels métalliques, des détergents, des phénols, des hydrocarbures, etc., qui empêchent la croissance des bactéries. Le choix du systeme de traitement repose sur la valeur du coefficient K. Un traitement biologique est utilisé si l'effluent est biodégradable ; dans le cas contraire, un traitement physico-chimique est utilisé.

III. Principe de l'épuration biologique

Théoriquement, tout processus biologique impliquant les cycles du carbone, de l'azote, du phosphore et du soufre qui se déroule dans les eaux naturelles peut être utilisé dans le processus industriel du traitement de l'eau (Zhou et al. ,2022). Certains groupes bactériens utilisent leur métabolisme pour éliminer les molécules ou les ions indésirables de l'eau, comme les débris organiques, le fer, le manganèse et les composés azotés (Dwivedi et al ., 2021). Les micro-organismes qui exercent ces activités métaboliques fonctionnent dans les limites de leurs plages de pH et de température particulières.

Le fondement de toutes les méthodes de traitement des eaux usées urbaines est l'épuration biologique (Sathya et al.,2023). Les bactéries décomposent la matière organique dans l'environnement naturel en la dégradant en éléments plus simples et en gagnant ainsi plus de biomasse. La croissance des bactéries peut se produire naturellement ou être favorisée et accélérée par des germes supplémentaires en présence ou en absence de l'oxygène (Miquel, 2003).

Le traitement se réalise dans un réacteur où l'on place en contact des microorganismes épurateurs et l'eau à purifier. On distingue alors plusieurs procédés possibles :

- Culture fixée ou culture libre ;
- Processus aérobie ou anaérobie.

Nous désignons les micro-organismes filtrants en culture libre comme étant en suspension dans un bassin aéré, comme un processus de boues activées (Singh et al 2022). Les eaux usées sont injectées en continu dans le réacteur, et la biomasse modifie les polluants :

- par oxydation en CO_2 et H_2O, qui produit l'énergie nécessaire au fonctionnement et à la production de nouveaux matériaux cellulaires : transformation des pollutions dissoutes en gaz
- par conversion de la DBO5 en matière cellulaire : croissance de la culture bactérienne et des micro-organismes associés : insolubilité de la pollution

Pour créer l'énergie nécessaire, les eaux usées contiennent environ un tiers de matières organiques qui doivent être oxydées (Ouarda et al., 2020). Ainsi, les deux tiers restent sous forme de boues excédentaires. En très peu de temps, plus de 80 à 95 % de la charge organique injectée peuvent être éliminés de l'eau à traiter si les phases de l'eau purifiée et des boues excédentaires sont correctement séparées. Il y aura donc deux étapes :

- Phase biologique : transformation de la pollution dissoute en gaz ou en biomasse ;
- Phase physique : séparation de la biomasse épuratrice de l'eau épurée : décantation.

La plupart du temps, l'oxydation biologique élimine les polluants à l'aide de la microfaune aérée, composée principalement de métazoaires, de protozoaires et de bactéries chimioorganotrophes (figure 1) (Yeasmin et al . , 2023). Grâce au recyclage de la biomasse, la concentration élevée de micro-organismes (2 à 5 g/l) est maintenue et un taux de croissance constant est maintenu dans le bassin des boues activées. Lorsque le rapport DCO/DBO5 est inférieur à 2,5, indiquant un indice de biodégradabilité élevé de l'effluent, la filière biologique peut démarrer.Le rapport carbone/azote/phosphore de l'effluent est de 100/5/1, indiquant un équilibre nutritionnel favorable favorisant le meilleur développement possible de la biomasse épuratrice.

1. Métabolisme aérobie.

Les mécanismes de la métabolisation aérobie sont schématiquement indiqués sur la figure 1.

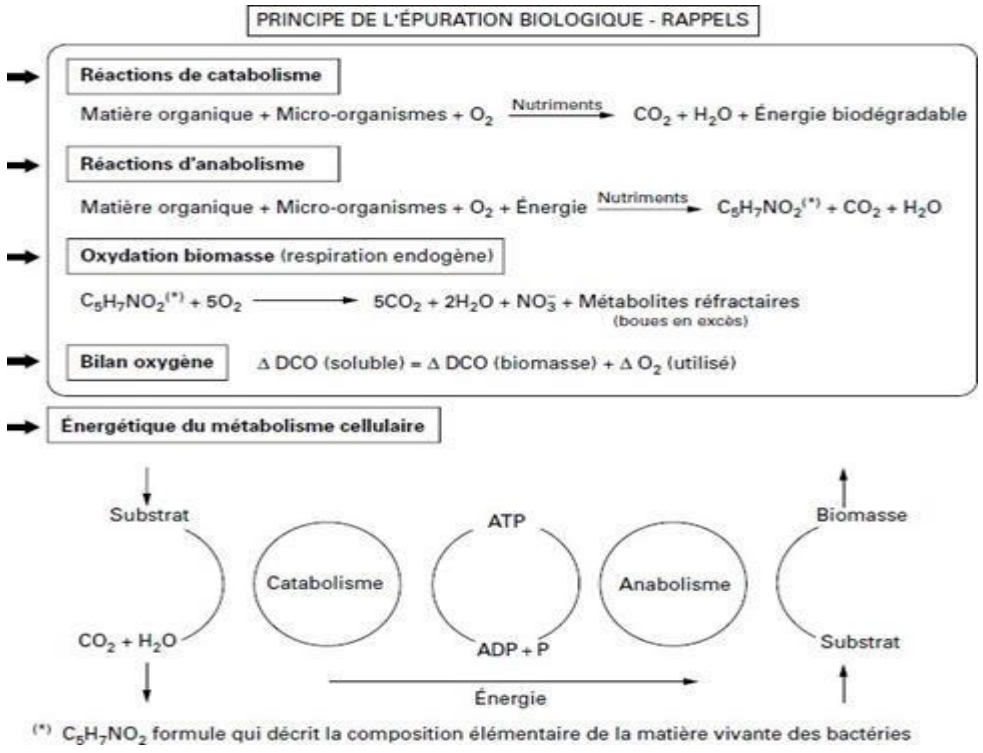


Figure 1 : Mécanismes réactionnels de la métabolisation aérobie de la pollution carbonée (Jean-Claude, B., 1998)

IV. Principaux procédés de traitements biologiques des eaux usées

Dans la grande majorité du temps, les processus biologiques qui reposent sur le développement des micro-organismes au détriment des matières organiques « biodégradables » qui leur servent de nourriture, sont responsables de l'élimination de la pollution carbonée et azotée (Doukani et al ., 2022). L'objectif des traitements secondaires, également appelés traitements biologiques, est de décomposer les matières organiques biodégradables présentes dans l'eau à traiter. Lorsqu'elles sont exposées à de l'eau contaminée, les micro-organismes absorbent les matières organiques, qui servent comme substrat (Chan et al ., 2022). Dans les bassins de traitement biologique, tous les polluants contenant des micro-organismes vivants se combinent pour générer une liqueur mixte, également appelée boue biologique. D'une manière générale, les souches aérobies strictes ou facultatives éliminent complètement tous les polluants organiques de ces étangs dans des conditions aérées (Rana et Gupta ,2022). A ce stade du processus de traitement biologique, il existe plusieurs processus. Il s'agit notamment des techniques d'épandage-irrigation, des procédés de décantation interne (lagunage), des

procédés de culture en suspension (également appelés procédés à boues activées), des procédés de culture fixes (tels que disques biologiques tournants, lits bactériens, etc.)**.**

1. Digestion anaérobie

Les lagunes anaérobies sont des bassins de 3 à 4 m de profondeur où la matière organique est minéralisée et où du CO_2, du CH_4 et potentiellement du H_2S sont libérés lors de la fermentation anaérobie (Cattaneo et al., 2023). Par décantation, ils répondent majoritairement à la pollution carbonée et conduisent à une diminution partielle des matières organiques solubles. Les dépôts qui en résultent, particulièrement importants, sont provoqués par la décantation des matières en suspension (Paing J. et al ., 2003). Les eaux usées domestiques et agro-industrielles peuvent être traitées par ce système, qui nécessite une température supérieure à 25°C pour fonctionner correctement (Charbonnel, 1989). En général, les premiers traitements des eaux usées urbaines ont une efficacité de 25 à 35 % pour la DCO et la DBO5, et de 40 à 60 % pour les MES. Les bassins anaérobies peuvent assurer un traitement primaire avec des rendements en DBO5 pouvant atteindre 60 à 70 %. Les débris organiques se déposent et se dégradent dans ces lagunes, entraînant une épuration (ONEP, 1998). La quantité de matières en suspension éliminées par la lagune anaérobie est comparable à l'accumulation de boues. Les boues au fond du bassin sont inégalement réparties et évoluent avec le temps. Les lagunes anaérobies ont un débit de boues plus faible en raison d'une digestion plus intense des boues, selon une étude menée à Mèze par Paing (2001). Cependant, dans le cas des lagunes anaérobies fonctionnant à faible charge, le premier curage devra être réalisé après 13 années de fonctionnement. Nous citons quelques chiffres pour la quantification de l'accumulation des boues:

- L'étude de Pescod (1995) montre à Alsamra (à Amman en Jordanie) une épaisseur moyenne d'accumulation de boue de 1.7 m après 44 mois de fonctionnement.
- Une étude faite par Picot et al. (2002) donne à Mèze 26 kg de solides secs/j équivalent à 0,017 m^3/an ou 10 cm/an.
- 0,04 m^3/ an de boue accumulée à 20°C (Mara et Pearson, 1998)
- 0,03 et 0,15 m^3/ an de boue accumulée (Gonçalves, 2000 cité par Paing, 2001).
- L'étude menée par Keffala et al. (2008) sur le site pilote du CERTE en Tunisie présente la répartition spatiale, les taux d'accumulation et les caractéristiques chimiques des sédiments dans une installation de bassin de stabilisation composée de deux bassins de maturation, d'un bassin anaérobie et d'un bassin facultatif de traitement des eaux usées en Tunisie. Selon cette étude, les taux moyens d'accumulation des boues obtenues varient de

0,0036 à 0,018 m^3/ h / an, soit 0,22 à 3,22 kg de matières en suspension par habitant /an. L'accumulation totale des trois bassins est représentée par une valeur moyenne de 0,029 m^3 par habitant / an. Aussi cette prospection a montré que l'allocation des boues est loin d'être cohérente, les épaisseurs de sédiments les plus importantes sont transcrites aux entrées et aux sorties des bassins.

Par conséquent, la majorité des gaz produits lors de la génération de biogaz sont le méthane (CH_4), suivi du dioxyde de carbone (CO_2) et d'autres gaz qui ne sont généralement pas mesurés (Kofoed et al .,2021). Cette production n'est pratiquement pas affectée par les modifications de la charge organique et dépend uniquement de la température (plus la température est élevée, plus la production est importante). Quelle que soit l'augmentation de la température, nous observons une plage de production optimale de 30 à 35°C, suivie d'un plateau et d'un déclin. Selon Sharpe et Harper (1999), cités par Paing (2001), un volume important de biogaz est produit près de l'entrée en raison d'une sédimentation accrue et d'une plus grande quantité de particules hautement biodégradables.

Picot et coll. (2002) estiment que 83 % du contenu du biogaz est constitué de méthane (CH_4), moins de 4 % de dioxyde de carbone (CO_2), moins de 1 % de sulfure d'hydrogène (H_2S) (allant de 75 à 4 770 ppm) , et 14 % sont des gaz (azote). Cependant, la production du gaz diminue lorsque la température dépasse un niveau optimal. Le méthane est un gaz à effet de serre plus puissant que le dioxyde de carbone. Pour des raisons énergétiques et environnementales, il devrait y avoir un regain d'intérêt pour sa valorisation énergétique dans les années à venir.

2- **Cultures fixes**

C'est un régime aérobie dont les micro-organismes utilisés demandent un apport continu d'oxygène. Nous distinguons :

2-1 Lits bactériens

Le filtre fonctionne en faisant passer l'eau à traiter, préalablement décantée, sur une muse en matériau de grande surface spécifique qui sert de support aux micro-organismes épurateurs (Selmi. B et Satin, 2006). Ces micro-organismes forment un biofilm assez épais, sous lequel une couche anaérobie peut se développer sous la couche aérobie, si son épaisseur est importante (Ministère de l'Environnement, 1994). Ce filtre est aussi parfois appelé filtre bactérien ou filtre percolateur (Selmi .B et Satin .M, 2006).

1.1. Disques biologiques

Les disques biologiques rotatifs sont les noms donnés à plusieurs types de lits bactériens (Waqas et al 2021). Une série de disques parallèles, généralement composés de polystyrène, partiellement immergés dans l'eau à traiter et tournant lentement (quelques tours par minute) autour d'un axe horizontal est appelé disque biologique. Ils mesurent de deux à quatre mètres de diamètre. Les biofilms, ou films biologiques, constituent la base des systèmes de disques biologiques. Les microbes sont apposés sur les disques au cours de ce processus. La rotation fait que la biomasse bactérienne fixée à la surface des disques entre en contact avec l'eau à traiter et l'oxygène de l'air ambiant. Les disques biologiques sont principalement utilisés pour traiter les eaux usées saisonnières issues du tourisme. Cette méthode a l'avantage de consommer moins d'énergie et nécessite moins de surveillance, mais elle nécessite également une couverture importante et une protection contre les intempéries, c'est pourquoi il est nécessaire d'organiser la biomasse bactérienne dans un espace clos.

3 - Les cultures libres (boues activées)

Le traitement biologique aérobie le plus largement utilisé est la boue activée (OMS, 1989). Le procédé consiste à permettre à une culture bactérienne de se développer en flocons (boues activées) dans un bassin d'aération agité, aéré et alimenté en eau filtrée (Awasthi et al ., 2023). Le mélange dans ce bassin a pour but d'éviter les dépôts et d'homogénéiser le mélange d'eaux usées et de flocons bactériens (appelé liqueur mixte). L'aération peut être réalisée en injectant de l'oxygène pur, du gaz enrichi en oxygène provenant du mélange ou de l'oxygène de l'eau .le but est de dissoudre ce gaz dans la liqueur mixte pour répondre aux besoins des bactéries épuratrices.La liqueur mixte est acheminée vers un clarificateur, également appelé décanteur secondaire, une fois qu'un temps de contact suffisant s'est écoulé. Le but du clarificateur est d'éliminer les boues de l'eau purifiée (Awasthi et al., 2023). Dans le but de maintenir une concentration des bactéries épuratrices suffisamment élevée, une partie de ces dernières est recyclée dans le bassin d'aération. Les boues secondaires en excès, sont retirées du système et envoyées vers une installation de traitement des boues. La teinte des boues activées de haute qualité est légèrement blond-rougeâtre. Le contrôle de la minéralisation des matières organiques est facilité par le fait que les organismes actifs dans le système ont un temps de séjour plus long que l'eau (Ministère de l'Environnement, 1994).

4-Lagunage

est une technologie de filtration biologique à grande échelle qui libère les eaux usées dans une série de bassins plus petits où la matière organique est naturellement transformée via la décomposition de la biomasse (Kumar et al ., 2020). Après avoir été éliminées des eaux usées, les matières contaminants se trouvent principalement dans les plantes et les sédiments déposés, avec des traces de méthane et d'azote gazeux trouvées dans l'atmosphère.

Les lagunes ou bassins de stabilisation sont reliés aux systèmes de traitement secondaire traditionnels, constituent également de bons dispositifs tertiaires permettant de réduire les dangers liés aux micro-organismes pathogènes (Ho et Goethals ,2020).

Les outils de l'épuration et le fonctionnement d'un lagunage simple peuvent être enduits par le schéma suivant :

Eau usée + oxygène + bactérie →boues + effluent traité + CO_2 + H_2O + energie

Les organismes qui sont présents puissent éliminer de 20 à 60 kg de DBO_5/hectare, (Ghoualem-Saouli, 2007).

Les lagunes peuvent être classées en fonction de leur emplacement au sein du système d'épuration ou de leur régime. Ainsi, conformément à la première exigence, nous disposerons de bassins de stabilisation ; anaérobie : type de prédigesteur exposé à l'air, aérobie : basé sur une symbiose commun entre bactéries et algues ; où la zone inférieure est anaérobie et la zone supérieure est aérobie ou facultatif ; Il existe differents types de lagunages :

- Lagunage complet : quand l'installation est immédiatement alimentée d'eau brute non décantée.
- Lagunage secondaire : quand l'installation est ravitaillée d'eau décantée.
- Lagunage tertiaire : pour une installation immédiatement alimentée d'un effluent traité suivant un procédé conventionnel (lits bactériens, boues activées, etc.).

Parmi les trois principaux paramètres qui déterminent le fonctionnement d'une lagune anaérobie, la température semble avoir la plus grande influence sur la capacité d'épuration du système, ce qui augmente l'efficacité de l'élimination de la DCO.

5-Filtration par percolation

Le traitement de l'eau en la faisant passer à Travers un lit filtrant ou le sol est connu sous le nom de percolation ou de filtrage (Vasel, 2007). Quelques centaines de litres d'eaux usées par

mètre carré de lit filtrant sont filtrés quotidiennement pour les effluents. Deux mécanismes sont en jeu:

1) La filtration des MES: une fixation plus profonde des MES se produit dans le sable plus grossier. Le filtre est alors colmaté par les MES. Il est donc nécessaire d'alterner les phases de filtration et de séchage afin d'éviter l'obstruction du lit filtrant; l'élimination des MES permet également d'éliminer les micro-organismes qui y sont accrochés.

2) Dans la partie supérieure du filtre, l'adsorption des bactéries libres par les grains de sable crée un film biologique.Cette couche permettra aux débris organiques et aux composés (phosphates, nitrates, etc.) dissous dans l'effluent d'être décomposés par les micro-organismes. Le film doit être périodiquement ventilé pour éviter l'asphyxie de l'atmosphère car cette détérioration consomme de l'O2 et produit du CO2. Par filtration/adsorption au début du lit filtrant, les techniques de filtration/percolation permettent d'éliminer les protozoaires et les helminthes. Le milieu poreux, le taux de percolation, l'épaisseur du lit filtrant et le degré d'oxydation de l'eau filtrée affectent l'élimination des bactéries et des virus (Faby, 1997).

6-Filtration par le sol et les plantes (filtres plantés)

Les rivières et le sol étaient les réservoirs naturels des polluants produits par l'activité humaine (Singh et al .,2020). Les méthodes de pointe désormais utilisées dans les installations de traitement des eaux usées urbaines ne servent qu'à améliorer les processus d'auto-épuration naturelle, (Guilloteau, 1992).

De nombreux chercheurs recommandent des procédés approfondis, tels que des systèmes de traitement des eaux usées artificiels ou naturels basés sur des zones humides (Vymazal 2022). Le lagon à micropyles et macrophytes, également appelé bassin de maturation, bassin facultatif ou bassin de stabilisation, est le plus connu d'entre eux (Lutta et al .,2022). Ce système offre une large gamme d'options d'adaptation à l'atmosphère normalement chaud, des pays en développement, propice à l'activité bactérienne et nécessaire à son fonctionnement optimal. Bien qu'il existe plusieurs plantes de traitement naturelles, elles sont rarement expérimentées..

Chapitre II : Réutilisation des eaux usées traitées en agriculture

I. Introduction

Les eaux usées qui ont été traitées et collectées après differentssystemes de traitements peuvent être considérées comme une source d'eau renouvelable peu coûteuse et non traditionnelle qui peut être utilisée pour l'agriculture à proximité des centres urbains (Vasel, 2007). Néanmoins, en raison de la composition variable de l'eau (sa quantité de constituants minéraux, organiques et biologiques), sa réutilisation doit être soigneusement gérée, surveillée et contrôlée par des experts qui évaluent les risques ou menaces pour les utilisateurs, l'environnement dans son ensemble, le sol et les cultures irriguées (Blumenthal, 1989).

1. Différentes utilisations des eaux usées traitées

Dans les pays hydrosensibles, la récupération et la réutilisation des eaux usées traitées se sont révélées être une solution efficace pour répondre à la demande croissante en eau. Les principales applications des eaux usées traitées dans le monde, telles que rapportées par la FAO et Aquastat (1998), sont :

-les applications urbaines incluent l'approvisionnement en eau des zones telles que les espaces verts, ainsi que la création d'utilisations périurbaines comme l'irrigation des terrains de golf.

- Utilisations agricoles: irrigation.
- Utilisation pour la lutte contre les incendies ;
- Usages industriels : Cette réutilisation est importante puisque les eaux de process sont fréquemment recyclées, ce qui est souvent justifié par une baisse de la consommation ainsi que par la valorisation des sous-produits. Cela peut également concerner le refroidissement des machines industriélles par l'eau.

2. Situation de l'utilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation agricole

La réutilisation des eaux usées à des fins agricoles est une activité courante et réglementée dans de nombreux pays (Pescod,1992, Mohammad et Mazareh,2003 ,AQUEREC, 2006). Ainsi, en 1995, respectivement 340 000 m^3/jour et 570 000 m^3/jour d'eaux usées étaient recyclés dans l'agriculture en Floride et en Californie, aux États-Unis. Avec 4 à 25 millions de m^3/jour d'eaux usées récupérées pour l'irrigation, l'expérience de Mexico semble être le plus grand projet de réutilisation des eaux usées au monde (Jiménez-Cisneros & Chavez-Mejia,

1997). En outre, nous pouvons énumérer les pays du Moyen-Orient et du Proche-Orient, notamment l'Égypte (550 000 m^3/j), le Koweït (140 000 m^3/j), l'Arabie saoudite (600 000 m^3/j), la Syrie (1 000 000 m^3/j) et les Émirats arabes unis (500 000 m^3/j) (FAO, Aquastat, 1998). De plus, ce recyclage doit répondre à la demande des cultures sans nuire aux habitations (Van der Hoek et al., 2002).

3. Critères de qualité des eaux usées pour l'irrigation

Il est tout à fait évident que les traitements disponibles sont capables de ramener les quantités de tous types de polluants à des niveaux jugés sûrs. Les qualités des composants physiques, chimiques et biologiques de toutes les eaux d'irrigation sont les mêmes, (Saravanan et al 2021).

3.1. Salinité

L'eau utilisée pour l'approvisionnement communautaire est généralement de faible salinité et de la meilleure qualité disponible dans la plupart des pays (Khondoker et al., 2023). Cependant, la salinité peut devenir un problème en cas de pénurie d'eau.

Pour déterminer si les eaux usées traitées conviennent à l'irrigation, le type et la quantité de sels présents sont des facteurs cruciaux à prendre en compte. La teneur totale en sel, le type de sel ou la surconcentration d'un ou plusieurs éléments sont des problèmes potentiels. Afin de résoudre le problème du sel dans les exploitations agricoles, les stratégies suivantes doivent être éffectuées :

a) Sélectionnez des plantes capables de résister à la salinité des eaux usées. Basé sur la salinité des eaux usées et la sensibilité des cultures au sel, le tableau 1 peut aider les agriculteurs à sélectionner le meilleur système de culture. La plupart des fruits et légumes peuvent être cultivés avec une salinité inférieure à 3 000 us/cm et avec une bonne gestion. La sélection des cultures devient difficile et se limite principalement au fourrage vert à mesure que le sel augmente (FAO, 1985).

Tableau 1: Tolérance à la salinité de quelques plantes cultivées (FAO, 1985)

Conductivité électrique de l'eau d'irrigation (us/cm)					
<1280	1280-1920	1920-2560	2560-3200	3200-4480	>4480
Citrus	Figues	sorgho	Soja	Carthame	Coton
Pommes	Olives**	Arachide	Palmier dattier***	Blé	Orge
Pêche	Brocoli	Riz	Phalaris aquatique	Betterave sucrière	Agropyre
Raisins	Tomates	Betteraves	Trèfle	Rye Grass	
Fraise	Concombre	Fétuque	Artichauts	Orge des rats	
Pommes de Terre	Cantaloup			Chiendent pied de Poule	
Poivrons	Pastèques			Sudax (sorgho hybride)	
Carottes	Epinards				
Oignons	Vesce commune				
Haricot	Sorgho du Soudan				
Maïs	Luzerne				

* * des niveaux de CE beaucoup plus élevés ont été observés pour des olives en Tunisie

* * * des niveaux plus élevés de CE ont été également observés pour des palmiers dattiers au Maroc.

b) Sélectionner un système d'irrigation qui offre la possibilité d'une irrigation fréquente, d'une application uniforme de l'eau et d'une grande efficacité (Maas, 1984). Une utilisation appropriée des systèmes d'irrigation contemporains peut entraîner des rendements plus élevés. Les systèmes goutte à goutte permettent une irrigation plus fréquente, ce qui réduit la salinité du sol autour de la plante irriguée (Papadopoulos et al, 1988).

c) L'installation d'un réseau de drainage est l'une des étapes essentielles pour arrêter la remontée de la nappe phréatique et la salinisation provoquée par l'irrigation dans les zones arides et semi-arides. L'association du drainage et d'un bon arrosage permet de libérer les sels excédentaires de la zone racinaire.

3-2 Alcalinité

Les types d'ions échangeables dans l'eau d'irrigation ont un impact significatif sur la structure du sol, la perméabilité à l'eau, la stabilité des agrégats et la dispersion de la phase colloïdale. Même en cas du lessivage, l'augmentation de l'alcalinité du sol qui peut résulter du traitement des eaux usées à forte concentration de Na diminue la perméabilité du sol, en particulier près de la surface. Ce comportement est associé à la dispersion et au gonflement de l'argile à des concentrations plus élevées de Na échangeable. Néanmoins, le taux d'infiltration change en réponse au niveau de salinité pour une valeur donnée du rapport d'adsorption du sodium (SAR) (Rhoades, 1977). Les trois options de gestion presentées ci-dessous sont suggérées.

4. Amendements chimiques

Lors de l'utilisation de l'eau avec un rapport d'absorbance spécifique (DAS) élevé pour l'irrigation, ou pour améliorer les sols avec une proportion élevée de Na par rapport à la CEC, l'application d'amendements calciques, tels que le gypse, est communément acceptée. Le calcium du gypse remplace le sodium du sol, réduisant ainsi la dispersion de la phase colloïdale.

5. Système d'irrigation adapté

Dans certaines régions du monde, le drainage est crucial et l'irrigation produit trois fois plus que l'agriculture pluviale. Actuellement, l'agriculture pluviale représente 16 % des terres cultivées, soit environ 320 millions d'hectares, et garantit 44 % de la production mondiale (Jamin et al . , 2011 ,HLPE, 2015 ; FAO AQUASTAT, 2016). Cette réussite peut être attribuée en grande partie à la protection qu'offre l'irrigation contre la menace omniprésente mais de plus en plus imminente de sécheresse provoquée par le changement climatique. Cette tendance explique pourquoi l'irrigation devient de plus en plus populaire dans le monde,

compte tenu de la tâche énorme qui consiste à nourrir plus de 9 milliards de personnes d'ici 2050 sur une planète aux ressources énergétiques et en eau limitées. En particulier, les systèmes « goutte à goutte » pour l'irrigation localisée se développent actuellement rapidement dans le monde entier en raison des recomendationsgouvernementales visant à économiser l'eau, qui incluent des subventions publiques aux agriculteurs, souvent dans le cadre de programmes de modernisation à grande échelle, ainsi que des dépenses privées effectuées par les agriculteurs (Venot et al., 2017). Par exemple, le Maroc a lancé un programme important de modernisation et de subvention de vastes espaces publics, dans le but de convertir plus de 450 000 hectares de terres traditionnelles irriguées par système localisé. Néanmoins, ces méthodes restent aujourd'hui plutôt insignifiantes au niveau mondial.

6. Matière organique

Le problème d'alcalinité peut également être résolu par l'addition de matière organique comme la paille, d'autres déchets végétaux et du fumier organique.

II. Les micropolluants

Les sources des micropolluants présents dans l'environnement sont extrêmement diverses. Leurs interactions avec le milieu environnant auront un impact significatif sur leur avenir environnemental et leurs effets potentiels sur de nombreux écosystèmes. Selon Gérin et al. (2003), ces polluants ont le potentiel de perturber les écosystèmes aquatiques sur une période prolongée, en particulier les producteurs primaires qui sont sensibles à la pollution organique et métallique.

1. Les micropolluants minéraux

Ils constituent le principal obstacle à la réutilisation des eaux usées traitées. Les métaux lourds sont des composants nécessaires et cruciaux à la vie à faibles concentrations, car ils sont des catalyseurs dans diverses voies métaboliques et servent d'ingrédient et de cofacteur à de nombreuses enzymes. Néanmoins, les métaux entravent la croissance et un certain nombre de fonctions cellulaires, comme la photosynthèse, la respiration, l'activité enzymatique, ainsi que la synthèse de pigments et de protéines, à des concentrations supérieures à celles requises pour un développement idéal. De plus, la division cellulaire peut être affectée. Les éléments métalliques observés comprennent le fer, le nickel, le zinc et le chrome, tous nécessaires en très petites quantités à la vie. En plus de leur capacité unique à s'accumuler de manière

bioaccumulable, les métaux lourds ne peuvent pas être complètement éliminés de l'organisme. Ils modifient simplement leur forme (Cauchi et al., 1996 ; Vilaginès, 2003).

Du point de vue de la gestion des éléments traces, la question est de savoir si les métaux lourds présentent un risque important pour la santé humaine et/ou l'environnement. Pour deux raisons principales, les éléments traces ne doivent pas être considérés comme un problème extrême ou grave sur notre site d'étude :

1/ Le faible niveau d'activité industrielle dans la région a entraîné une faible concentration de métaux lourds dans les eaux usées urbaines.

2/ En outre, les sols de la région contiennent généralement une forte teneur en CaO3, ce qui entrave la mobilité et la disponibilité des métaux lourds pour les cultures.

Les métaux lourds peuvent donc poser problème dans les milieux acides, et les précautions suivantes sont conseillées:

- Chaulage (application de carbonate de calcium). Ainsi, la solubilité des métaux lourds est diminuée et le pH est augmenté ;
- Utilisation des cultures tolérantes à certains métaux lourds ;
- Évitez les engrais acides.

2. Les micropolluants organiques

Dans les eaux usées, la teneur totale typique en micropolluants d'origine organique varie de 1 à 10 µg/l. La persistance est un facteur clé qui affecte la probabilité de contamination et les effets des micropolluants organiques sur l'environnement (Faby et Brissaud, 1997).

3. Les paramètres biologiques

Les micro-organismes sont constitués de bactéries, de protozoaires, de virus de champignions et d'helminthes. Ils proviennent dans la plupart des cas de déchets fécaux. La physiologie de la bactérie et la physiologie de l'hôte infecté sont deux aspects qui affectent le caractère pathogène des bactéries.

3.1. Les bactéries

La plupart des micro-organismes ne présentent aucun risque pour la santé. La quantité typique de bactéries dans les eaux usées est de 10^7 à 10^8/l. Selon Faby et Brissaud (1997), la concentration bactérienne nocive est d'environ 10^4/l. La quantité de bactéries dans l'eau des rivières après rejet urbain peut être doublée par 1 000 ; ainsi, suite à la zone de rejet d'une

installation de traitement des eaux usées qui collecte les eaux usées d'une grande ville, le nombre de coliformes fécaux passe de 10^3 à 10^6 par millilitre, (Miquel, 2003). La voie de contamination majoritaire est l'ingestion, comme le montre le tableau 2.

Tableau 2: Les bactéries pathogènes dans les eaux usées Asano (1998)

Agent pathogène	Symptômes, maladie	Voies de contamination principales
Salmonella sp	Typhoïde, paratyphoïde, salmonellose	Ingestion
Shigella sp	Dysenterie bacillaire	Ingestion
Escherichia coli	Gastro-entérite	Ingestion
Yersinia sp	Gastro-entérite	Ingestion
Campylobacter sp	Gastro-entérite	Ingestion
Vibrio sp	Choléra	Ingestion
Leptospira sp	Leptospirose	Cutanée/Inhalation/Ingestion
Legionella sp	Légionellose	Inhalation
Mycobacterium sp	Tuberculose	Inhalation

3.2. Les protozoaires

Les protozoaires sont des organismes unicellulaires plus gros et plus complexes que les bactéries dotées d'un noyau. En tant que créatures parasites, la majorité des protozoaires nuisibles se développent aux dépens de leur hôte. Un kyste est un type de résistance que certains protozoaires développent au cours de leur cycle de vie. En général, ce type résiste aux

méthodes de traitement des eaux usées. Nous pouvons citer *Entamoeba histolytica* à l'origine de la dysenterie.

3.3. Les helminthes

Les helminthes sont des vers dotés de nombreuses cellules. La majorité d'entre elles sont des espèces parasites. L'aspect nocif réside dans les œufs d'helminthes, qui sont extrêmement résistants et peuvent vivre sur le sol ou sur les plantes cultivées pendant plusieurs semaines, voire plusieurs mois. Selon Faby et Brissaud (1997), le nombre d'œufs d'helminthes dans les eaux usées se situe entre 10 et 10^3 œufs/l. Les principaux protozoaires et helminthes identifiés dans les eaux usées sont répertoriés dans le tableau 3 .

Tableau 3 : Les parasites pathogènes dans les eaux usées (Boutin 1987)

Organisme	Symptômes, maladie	Nombre par litre	Voies de contamination Principales
Protozoaires			
Entamoeba histolytica	Dysenterie amibienne	4	Ingestion
Giardia lamblia	Diarrhée, malabsorption	125 à 100 000	Ingestion
Balantidium coli	Diarrhée bénigne, ulcère du colon	28-52	Ingestion
Cryptosporidium	Diarrhée	0,3 à 122	
Toxoplasma gondii	Toxoplasmose : ganglions, faible Fièvre		Inhalation / Ingestion
Cyclospora	Diarrhée, légère fièvre, perte de Poids		Ingestion
Microsporidium	Diarrhée		Ingestion
Helminthes			

Ascaris	Ascaridiase : diarrhée, troubles Nerveux	5 à 111	Ingestion
Ancylostoma	Anémie	6 à 188	Ingestion / Cutanée
Necator	Anémie		Cutanée
Tænia	Diarrhée, douleurs musculaires		Ingestion de viande mal cuite
Trichuris	Diarrhée, douleur abdominale	10 à 41	Ingestion
Toxocora	Fièvre, douleur abdominale		Ingestion
Strongyloïdes	Diarrhée, douleur abdominale, Nausée		Cutanée
Hymenolepis	Nervosité, troubles digestifs, Anorexie		Ingestion

La quantité d'agents pathogènes qui doivent être ingérées pour que les symptômes de la maladie se manifestent chez au moins quelques patients est déterminée par la réponse de l'hôte et par la notion de dose minimale infectante (MID), (tableau 4) .

Tableau 4 : Doses minimales infectantes (DMI) au moyennes des agents pathogènes présents dans les eaux usées (Cauchi et al, 1996)

Micro-organismes	DMI
Bactéries	10^2 - 10^6/ml
Helminthes	1 – 10/l
Protozoaires	10 - 10^2/ml

III. Lois relatives à l'eau au Maroc

1. Introduction

Le Maroc a entamé une période de réflexion longue et approfondie qui a duré plus de dix ans et a conduit à la promulgation en 1995 de la loi 10/95 et en 2016 de la loi N° 36-15.

2- La loi 10-95

Le document qui constitue le fondement juridique de la politique de l'eau du Maroc est la Loi sur l'Eau. Son premier objectif est de fournir suffisamment l'eau, tant en termes de quantité que de qualité. Il s'agit d'une série d'outils législatifs conçus pour résoudre divers problèmes liés aux pénuries d'eau inégales, à la demande intense, et aux prix élevés de l'eau.

Afin de prévenir toute utilisation illicite de l'eau ou toute action susceptible de dégrader sa qualité, la loi prévoit des sanctions et la création d'une unité de police de l'eau. Un certain nombre d'articles, notamment sur les rejets et la qualité de l'eau, sont inclus dans la loi. L'article 51 établit les exigences minimales de qualité auxquelles l'eau doit répondre en fonction de l'usage auquel elle est destinée. De plus, les articles 52 et 54 interdisent le rejet d'eaux usées ou de déchets susceptibles de contaminer les eaux souterraines par infiltration. ou par ruissellement des eaux de surface, à moins que les autorités compétentes ne l'aient autorisé. Ainsi, l'article 84 stipule que si les eaux usées ne répondent pas aux normes réglementaires, elles ne pourraient pas être réutilisées à des fins agricoles. Le Comité des normes et standards (CNS) élabore toutes ces normes au niveau national.

3 -La loi N° 36-15

La loi n° 36.15 relative à l'eau a été créée en 2016 à la suite des modifications apportées à la loi 10-95. Il contient 163 articles.

Les principes essentiels de cette loi incluent la propriété publique de l'eau, le droit de chacun à accéder à l'eau et à un environnement sain, ainsi que des méthodes de gouvernance saines dans la gestion de l'eau. Outre les divers ajustements apportés aux dispositions relatives à l'eau de la loi no. 10-95, la législation récemment promulguée a apporté des nouveautés importantes, telles que : la création des conseils de bassins hydrauliques. L'objectif de ces comités consultatifs est d'examiner et de fournir des commentaires sur les plans directeurs de développement intégré des ressources en eau, ainsi que sur toute question relative à la gestion des ressources en eau au niveau du bassin. La création d'un cadre juridique qui autorisé la réalisation des projets de dessalement et le régime de concession auquel ces projets doivent adhérer. L'obligation de doter les agglomérations urbaines de plans directeurs

D’assainissement liquide en prenant compte les exigences en matière d’utilisation des précipitations et des eaux usées. Les installations de traitement des eaux usées et les réseaux d’assainissement liquide sont des nécessités essentielles pour ces communes. En outre, la loi impose l'autorisation et le paiement d'une redevance pour le rejet dans ces réseaux.

Chapitre III: La qualité microbiologique et parasitologie des boues de la station d'épuration biologique

I. Introduction

De plus grands volumes d'eau traitée sont produits par les stations d'épuration, et cette eau semble essentielle à l'agriculture, notamment dans les régions arides. Le traitement des eaux usées, qu'elles soient industrielles ou domestiques, génèrent de nombreux produits secondaires, comme des boues et de mauvaises odeurs. Depuis longtemps, les gens s'inquiètent des odeurs désagréables que dégagent les stations d'épuration des eaux usées (STEP), en particulier dans les zones voisines très peuplées. De plus, les boues qui en résultent contiennent des matières organiques, des minéraux et des microbes vivants. De nombreuses études ont montré que les boues des STEP contiennent diverses bactéries, à la fois dangereuses et utiles. Parmi les bactéries identifiées dans les boues des STEP figurent par exemple *Novosphingobium hétérotrophe, Flectobacillus filamentous, Raoultella ornithinolytica et Stenotrophomonas maltophilia*. Par conséquent, avant d'utiliser les boues à des fins agricoles ou autres, il est essentiel de chercher les micro-organismes qui y sont présents.

II. Boues résiduaires

Les boues sont définies différemment en fonction d'un certain nombre de facteurs, tels que leur origine, leur statut juridique et leur zone biogéographique c'est un mélange d'eau et de matières solides (fig 2), séparé par des procédés naturels ou artificiels des différents types d'eau qui le contiennent :c'est la définition des boues donnée par le Comité Européen de Normalisation. Les eaux usées des habitations ou des entreprises sont traitées pour produire des boues. Le produit final est de l'eau épurée qui est rejetée dans l'environnement avec les boues, qui constituent le principal résidu. Selon Bouchez et Menouer (2014), ces résidus sont composés de matières organiques, d'azote, de phosphore et de matières minérales inertes.



Figure 2: Boues résiduaires

III. Composition des boues

Le lieu d'origine des eaux usées, la saison ainsi que le type de conditionnement et de traitement effectué par la station d'épuration affectent toute la composition des boues. La composition des boues d'épuration change en fonction de la nature et des ingrédients d'origine des eaux usées brutes. Les boues résiduaires sont avant tout une matière première composée de plusieurs matières parmi lesquelles des agents pathogènes, des débris organiques, des oligo-éléments métalliques, des éléments fertilisants (N et P, etc.) et des oligo-éléments organiques. (Amir, 2005).

Le principal ingrédient des boues est l'eau. Sa quantité est déterminée par le type de boue (primaire, secondaire ou tertiaire) et la technique de stabilisation (aérobie, anaérobie). La teneur des boues brutes en eau varie de 93 à 99 %. Pour une utilisation ultérieure, il pourra être nécessaire de sécher (jusqu'à plus de 85 % de matière sèche) ou de déshydrater (jusqu'à environ 35 % de matière sèche). La substance sèche, composée à la fois de matières organiques et inorganiques, est le deuxième composant majeur.

1. **Matière organique**

La fourchette de concentration en matière organique est de 30 à 80 %. Ce sont des particules éliminées par gravité dans les boues primaires, lipides (6 à 19 %), polysaccharides, protéines et acides aminés (jusqu'à 33 % de la matière organique), lignine, produits de métabolisation et corps microbiens résultant de traitements biologiques (digestion , stabilisation) constituent la matière organique des boues. (Amir, 2005).

3-2 Éléments fertilisants

Selon la quantité utilisée, les boues peuvent répondre totalement ou partiellement aux besoins des cultures en soufre, calcium, magnésium, phosphore et azote. Le développement des plantes et des animaux dépend également des métaux traces présents dans les boues, comme le cuivre, le zinc, le chrome et le nickel (Amir, 2005).

3-3 Éléments traces métalliques (ETM)

Le chrome (Cr), le cadmium (Cd), le cuivre (Cu), le plomb (Pb), le nickel (Ni), le mercure (Hg), et le zinc (Zn) sont les sept métaux les plus fréquemment rencontrés. En faible quantité, certains de ces éléments (appelés oligo-éléments) ont un rôle vital dans l'organisme ; néanmoins, à un moment donné, ils deviennent généralement dangereux (Anonyme, 2012).

1. Production des boues

L'un des principaux sous-produits du processus de traitement biologique des eaux usées est la boue d'épuration, qui est produite en permanence. Elle contient un large éventail de matières dangereuses, notamment des agents pathogènes comme des virus et des œufs de vers, des métaux lourds et certains polluants organiques qui provoquent des odeurs. L'élimination et la réutilisation inappropriées des boues d'épuration ont des effets néfastes sur l'environnement et présentent un risque pour la santé humaine.

La Chine et le Japon produisent respectivement environ 3,0 et 2,0 tonnes de matière sèche par an. Compte tenu de l’utilisation croissante des STEP dans les pays en développement, il est raisonnable de s’attendre à une augmentation de ces chiffres dans un avenir proche. Les principales voies d'élimination varient d'un pays à l'autre en fonction du degré de développement économique. Les taux de réutilisation et d'élimination des boues d'épuration peuvent atteindre 94 % dans les pays riches comme les États-Unis et environ 97 % au Japon. Cela signifie que 52 % des boues sont recyclées pour être utilisées comme matériaux de construction et 12 % sont digérées de manière anaérobie pour la récupération de bioénergie.

2. Origine des boues

Un sous-produit du traitement des eaux usées est la boue municipale, parfois également appelée boue d'épuration. Il s'agit souvent d'un mélange de solides inorganiques provenant d'articles et de produits pharmaceutiques que nous utilisons, de particules de déchets alimentaires, de microbes, de composants organiques provenant de déchets humains et d'eau liée à ces éléments. Des traces de produits chimiques sont également présentes. Aux États- Unis, les boues d'épuration sont parfois appelées solides d'épuration.

Le terme « biosolides » est fréquemment utilisé pour décrire les boues suite à tout type de traitement.

Les installations industrielles (fabricants de produits alimentaires, usines de pâtes et papiers, usines de produits chimiques et de combustibles, etc.) peuvent également produire des boues. Ce sont des Sous-produits des processus industriels particuliers et la composition des boues industrielles varie considérablement selon l'industrie. Certains types de boues industrielles peuvent être transportés vers une usine de traitement des boues et combinés avec des boues d'épuration pour traitement.

IV. Polluants des boues

1. Polluants biologiques

Même après le développement continu de nouvelles technologies de traitement des eaux usées depuis la fin des années 1800, les eaux usées recyclées sont toujours considérées comme une source importante de contaminants organiques et inorganiques.

Les milliards de micro-organismes vivants présents dans les boues sont essentiels aux opérations d'épuration. Les micro-organismes pathogènes, tels que les virus, les bactéries, les protozoaires, les champignons et les helminthes, ne représentent qu'une très petite partie et se trouvent principalement dans les déchets humains ou animaux. L'industrie qui manipule des produits d'origine animale, comme les abattoirs, est une source majeure d'eaux usées contaminées, avec des concentrations variables de germes dangereux.

1.1. Virus

Un certain nombre de maladies aquatiques, notamment l'hépatite et la gastro-entérite, sont également causées par des virus en plus des bactéries (Hassine et al., 20122). Les eaux usées urbaines contiennent fréquemment des virus pathogènes pour l'homme, notamment le VHA, l'entérovirus et, plus récemment, le SRAS-COV-2. Ces virus sont responsables d'un nombre

important de maladies d'origine hydrique. (Rosa et al., 2020). Le virus d'hépatite À, par exemple, est endémique en Tunisie, avec un profil épidémiologique allant d'une endémicité élevée à intermédiaire, selon les données de l'Organisation mondiale de la santé et d'autres enquêtes de séroprévalence (Ibrahim et al., 2021). Par conséquent, pour empêcher la propagation du virus d'hépatite À, les eaux usées doivent être traitées pour l'éliminer correctement.

1.2. Bactéries

L'ensemble des bactéries présentes dans les boues sont représentées par la flore bactérienne, également appelée biomasse. Si les bactéries jouent un rôle majeur dans le traitement, les différentes formes vivantes qui les entourent. (protozoaires, métazoaires, etc.) . Sont toutes aussi importantes pour maintenir l'équilibre de l'écosystème. Les espèces sont indicatives du fonctionnement d'une station d'épuration et diffèrent selon le type de station.

1-3 Germes totaux

Les Germes totaux, souvent mésurer par la méthode des Flurescences des Microorganismes Aérobies Totaux (FMAT) sont des indicateursde la qualité Microbiologique des boues des STEP,Ces germes comprennent une vaste gamme de bacteries ,levures ,moisissurs et autres microorganismes aérobies present dans les boues , ils fournissent une estimation globle de la population microbienne dans les boues .une charge élevée en germes totaux peut indiquer une mauvaise performance du traitement des boues, ce qui pourrait augmenter les risques sanitaires si ces boues sont utilisées comme amendements de sol ou éliminées dans l'environement, (Sorensen, S .R ., & Aamand,J. 2020) .

1- 4 Coliformes totaux

Les entérobactéries, qui comprennent les bactéries qui habitent les intestins des animaux homéothermes ainsi que l'environnement en général (sol, végétation et eau), sont ce que l'on appelle les coliformes totaux. Ils incluent des bactéries d'origine fécale, comme *Escherichia coli,* Ce groupe bactérien est utilisé comme mesure de la qualité microbiologique de l'eau (CEAEQ, 2015a). Il s'agit de bactéries en forme de bâtonnet, facultativement anaérobies ou aérobies, qui émettent dans les milieux de culture un agent chromogène permettant de les identifier. Ils sont également équipés de l'enzyme ß-galactosidase (Edberg et al., 2000). Les primordiaux genres bactériens inclus dans le groupement sont : *Enterobacter, Citrobacter, Klebsiella, Escherichia-coli*, et *Serratia*. Presque La totalité des espèces sont non pathogènes.

1-5 Coliformes fécaux

Un sous-type de coliformes totaux appelés coliformes fécaux, ou coliformes thermotolérants, sont capables de fermenter le lactose à 44,5°C. Escherichia coli est l'espèce la plus couramment liée à ce groupe bactérien .Bien que la présence des coliformes fécaux témoigne habituellement d'une contamination d'origine fécale, plusieurs coliformes fécaux ne sont pas d'origine fécale, provenant plutôt d'eaux enrichies en matière organique, tels les effluents industriels du secteur des pâtes et papiers ou de la transformation alimentaire. C'est pourquoi il serait plus approprié d'utiliser le terme générique « coliformes thermo tolérants » plutôt que celui de « coliformes fécaux » (OMS, 1994).

Ces coliformes étant souvent aussi résistants dans l'environnement que les bactéries pathogènes et leur densité étant souvent corrélée au niveau de la pollution. Il est intéressant de les retrouver dans les boues comme organismes indicateurs générés à partir des excréments (ZERHOUNI J et al 2015). Bien que leur quantité soit inférieure à celle des coliformes totaux, ces germes sont néanmoins d'utiles marqueurs de l'efficacité du traitement de l'eau (Bennani,M. 2012).

1-6. Streptocoques fécaux

Les Streptocoques fécaux ,également appelés enterocoques ,sont des indicateurs microbiens importants de la contamination fécale et de l'hygiéne dans les systemes de traitement des eaux usées .Leur presence dans les boues activées des stations d'épuration des eaux usées (STEP) souleve des préocupation en matiére de santé publique .notament en ce qui concerne la gestion des boues et les risques environnementaux associés à leur utilisation,ainsi Streptocoques fécaux tel que *Enterococcus faecalis* et *Enterococcus faecium,sont utilisés comme indicateurs de contamination fécale dans les eaux usées .Leur presence dans les boues activées reflete la contamination d'origine humaine ou animale des eaux usées traitées .contrairement au aux coliformes fécaux, Les Streptocoques fécaux sont plus résistants au conditions environnementales ,ce qui en fait des indicateurs plus fiables pour évaluer l'éfficacité du traitement,(Ahmed,W et al., 2019).Egalement Les Streptocoques fécaux sont connus pour leur resistance aux conditions difficiles de traitement ,y compris les processus de désinfection tel que la chloration et ozonation.Cela pose un défit pour les systemes de traitements des boues ,car Les Streptocoques fécaux peuvent pérsister dans les boues résiduaires ,meme après le traitement .Leur survie dans les boues pose des risques potentiels pour la santé lors de l'utilisation des boues comme amendrment organique dans la griculture ;(Garcia-Armisen,T .,&Servais,P.2020).*

1-7 Les protozoaires

Les protistes hétérotrophes mobiles et eucaryotes unicellulaires sans tissus spécialisés sont appelés protozoaires .Cela contraste avec les autres protistes. Les protozoaires sont de petits organismes d'une taille maximale d'un millimétre.Il peut s'agir de cellules individuellees ou

de groupes de cellules.Les protozoaires particuliérement les ciliés, jouent un role crucial dans le control des bactéries filamentauses dans les boues activées.Ces bacteries, si elles se developpent de maniére excessive, peuvent causer des problemes tels que le moussage et des des difficultés dans la séparation des boues. Les protozoaires consomment ces bactéries, aidant aisi à maintenir un équilibre dans la communauté microbiénne, (Madoni, P .2011). Les protozoaires améliorent la clarté de l'effluent en consommant les particules en suspension,y compris les bacteries et autres autres microorganismes ,les protozoaires aident à clarifier l'éffluent final .Cela est essentiel pour respecter les normes de rejet d'eau traitée,en garantissant une faible une faible turbidité et une meilleure qualité de l'eau.(Zhang,T et al ., 2020)

1-8 Helminthes

Les deux principaux phylums de vers parasites, sont les nématodes (vers ronds) et les plathelminthes (vers plats) et sont inclus dans la famille d'helminthes. Les plathelminthes se composent de trois groupes principaux : les monogènes, les cestodes (vers solitaires) et les digènes, parfois appelés douves. Les nématomorphes, également connus sous le nom de Gordiens, les sangsues, les acanthocéphales et d'autres très petits groupes de parasites sont également inclus dans la collection. Chacune de ces créatures est le parasite d'un autre vertébré, et parfois d'un invertébré. Certains de ces parasites provoquent des maladies parasitaires tropicales ou européennes (filariose, bilharziose, helminthiases) et peuvent infecter l'homme ou les animaux domestiques.

En raison de leur faible dose infectieuse et de leur survie environnementale prolongée, l'OMS caractérise la présence d'helminthes parasites, en particulier les nématodes intestinaux (*Ascaris, Trichuris* et Ankylostoma), comme le principal obstacle à la réutilisation des eaux usées en agriculture.

Par exemple, la réviére de Sebou devient encore plus pollué lorsque les eaux usées urbaines de la ville de Kénitra, y sont déversées sans avoir été traitées au préalable. La méthode Bailenger modifiée est utilisée au laboratoire de parasitologie de l'Institut National d'Hygiène de Rabat pour analyser les échantillons d'eaux usées collectés à la sortie de l'émissaire (A.-Cl. Nsom Zamo, D. Belghyti et M. Lyagoubi, 2010). Après analyse des échantillons, les espèces d'helminthes parasites identifiées étaient Ascaris sp., Trichuris sp., Toxocara sp., Hymenolepis sp., Taenia sp. et Fasciola hepatica, avec des pourcentages de 55%, 9%, 22%,

6%, 4% et 4% respectivement. Sur les 25 échantillons analysés, un pourcentage élevé d'échantillons positifs (88 %) et de nématodes (86 %) se sont révélés plus répandus que les cestodes (10 %) et les trématodes (4 %). Compte tenu de cette charge parasite, il semble nécessaire de traiter l’eau avant de la recycler.

Partie II : Materiel et méthode

I. Situation de la ville d'Errachidia

La province d'Errachidia a été établie en 1956 située au Sud-est du Maroc. À l'Est se trouve la province de Figuig. A l'Ouest, il y a les provinces d'Azilal et Beni Mellal. La province de Boulmane s'étend au Nord, tandis qu'au sud, Errachidia est délimitée par les frontières maroco-algériennes.

1. Données générales sur la ville

La Région s'étend sur une superficie globale de 88.975 km². Elle est bordée par les régions de Fès-Meknès et de Béni Mellal-Khénifra au Nord, par la région de l'Oriental à l'Est, par les régions de Marrakech-Safi et de Souss-Massa à l'Ouest et par la frontière maroco-algérienne à l'Est et au Sud. C'est ainsi la région frontalière la plus vaste du Maroc**.** Sur le plan administratif, La région Drâa-Tafilalet regroupe 5 provinces : Errachidia, Midelt, Ouarzazate, Tinghir et Zagora, découpées en 125 communes dont 16 urbaines et 109 en milieu rural.

2. Contexte général

Le chef-lieu de la région est la province d'Errachidia. La région de Drâa-Tafilalet est un espace à dominance oasienne (les oasis occupent 88% de la superficie).

3. Situation géographique

La ville d'Errachidia est située sur la partie Sud-Est du Royaume, au sud de la chaîne du Haut Atlas. Elle est traversée par la route nationale RN 13 reliant la ville de Meknès à celle de Rissani, à une distance de 330 kilomètres au sud de la ville de Meknès. Les coordonnées Lambert moyennes de la ville d'Errachidia sont les suivantes :

X = 592.000 m

Y = 149.000 m

La situation géographique de la ville d'Errachidia est illustrée dans la figure 3 ci-après :

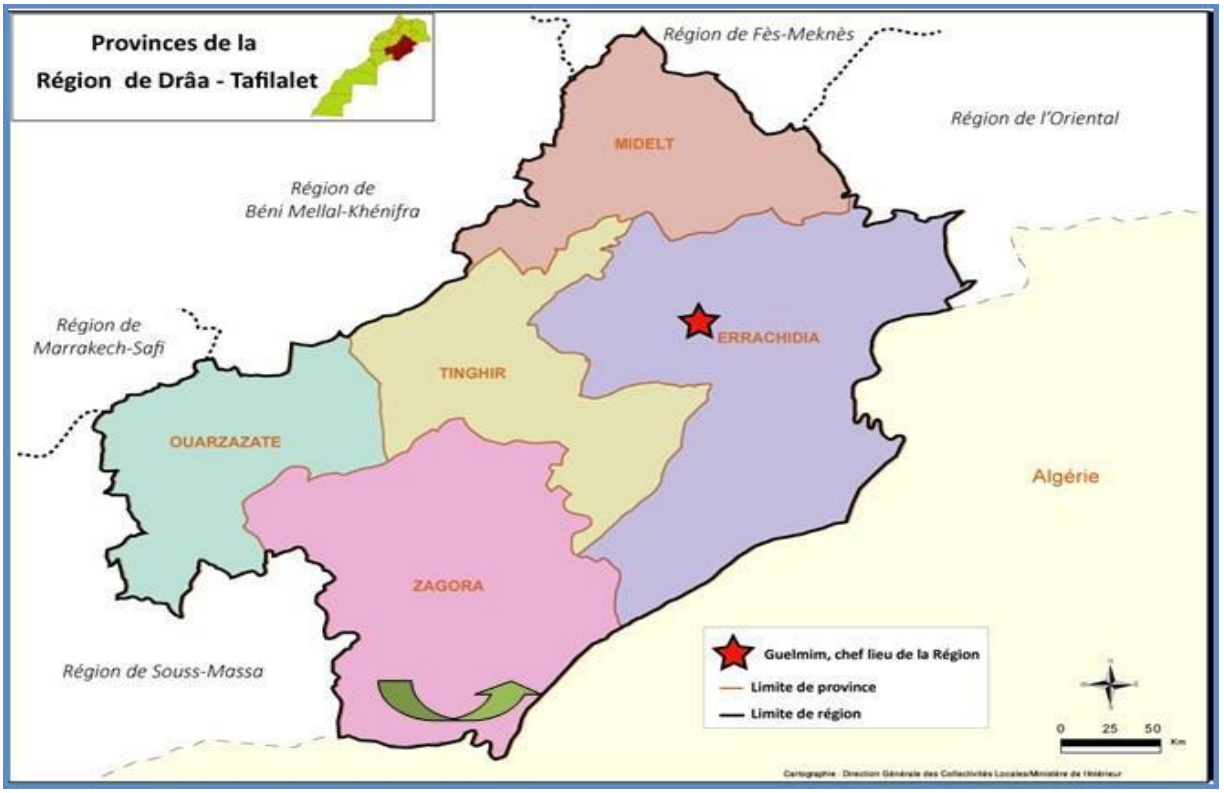


Figure 3: Situation géographique de la ville d'Errachidia

4. Hydrogéologie et hydrologie

La ville d'Errachidia au plan physique, présente un site peu accidenté, localisé sur un plateau d'une altitude moyenne de 1000 mètre, orienté au Nord-Sud et traversé par une rivière (Oued Ziz) qui partage la ville en deux parties inégales. L'Oued facilite le drainage des eaux pluviales et marque de façon notable le relief de la ville sans interdire l'installation d'ouvrages de franchissement**,** le Haut Atlas constitue le château d'eau de la vallée du Ziz. Le bassin versant de l'Oued Ziz de forme assez régulière comprend une partie amont, du côté Ouest de 1500 km^2 environ de superficie, dominée au Nord par des crêtes à plus de 3000 m. Le reste du bassin a une forme en éventail. La qualité des eaux de la nappe d'Errachidia est bonne (absence de salinité) .le principal niveau aquifère est un réseau karstique de calcaire turoniens (source de Meski). Le réseau hydraulique se limite à la rivière Oued Ziz, qui traverse la ville d'Errachidia dans la diagonale Nord/Ouest-Sud/Est et à son affluent Oued Lahmer. L'oued Ziz présente un régime à tendance saharienne avec un écoulement permanent, une année sur deux et des crues d'Automne et du Printemps. Le débit moyen annuel mesuré à Aît Athmane à proximité du barrage Hassan Addakhil est de 5.7 m^3/s, sans tenir compte des déviations pour l'irrigation estimées à 1.6 m^3/s. les crues sont soudaines et violentes, et la plus forte, a été observée en 1965, ayant atteint un débit de pointe de l'ordre de

5000 m^3/s. Le barrage Hassan Addakhil, situé à proximité et en amant de la ville d'Errachidia a été mis en eau en 1971 garantissant à l'aval un débit annuel minimum régularisé de 140 millions de m^3. Ce barrage joue également le rôle d'alimentation de la nappe souterraine par infiltration des eaux.

5. Climat

Le climat du centre Errachidia est du type semi-désertique à forte influence continentale. Il est caractérisé par un été chaud et sec et un hiver humide et froid. Cette caractéristique du climat désertique est accentuée par la présence de la chaîne du Haut Atlas, en tant que barrière naturelle, interceptant et réduisant considérablement les influences méditerranéennes.

5.1. Température

Les moyennes annuelles des températures sont élevées et confirment l'aridité du climat. On constate, généralement que le mois de juillet est le plus chaud et celui de décembre est le plus froid avec des moyennes respectives de 30,8 et 10,6 °C. Les températures journalières maximales sont enregistrées en juillet et les minimales en janvier. Le gel est limité aux mois d'hiver, mais il est rare que les températures minimales soient inférieures à 0 °C (ONEP ,2008)

5.2. Précipitations

La province d'Errachidia connaît un climat de type pré saharien au Nord et désertique au Sud. Les précipitations sont irrégulières et varient entre 200-250 mm/an (au Nord) et 50 mm/an (au Sud) ,(ONEP,2008). Les précipitations sont souvent violentes et de courte durée ; ce qui déclenche des crues dévastatrices qui ont généralement lieu à l'automne.

5.3. Les vents

Les vents d'Est et du Nord-est (Chergui) chauds et secs sont fréquents en été (entre mai et octobre), tandis que les vents d'Ouest et du Sud-ouest (Sahel), frais dominent au printemps .

II. Station d'épuration d'Errachidia

1. Station d'épuration de type lagunage naturel entre 2006 et 2011

1.1. Localisation de la station d'épuration

La station d'épuration des eaux usées de la ville d'Errachidia est destinée à l'assainissement collectif des eaux usées de la ville. Elle est située à trois kilomètres au Sud-Est de la ville, ses cordonnées GPS sont N 32° 1' 57.099'' W 4° 2' 14.912'', ses coordonnés Lambert moyennes sont :

X=594000 m

Y=147000 m

Z=1027 m

1.2. Présentation de la station et description des ouvrages

1.2.1. Présentation de la station

Les principales données de base sont résumées dans le tableau 5 .

Tableau 5: Présentation de la station type lagunage naturel

• Date de mise en service	28/02/2006
• Situation par rapport au centre de la ville	3 Km
• Situation par rapport aux habitations les plus proches	1 Km
• Superficie totale du terrain (m^2)	540000
• Superficie utile (m^2)	12860
• Type de STEP	Lagunage naturel
• Horizon de saturation	2010
• Capacité nominale en Equivalent -Habitant (E.H)	163000
• Débit nominal (m^3/j)	6000
• Débit de pointe horaire (m^3/j)	7158
• Capacité de traitement (kg DBO5/j)	2943
• Localisation des lieux de rejets de l'effluent épuré	OUED ZIZ
• Nature du milieu récepteur	Oued saisonnier

1.2.2. Description des ouvrages

La station d'épuration de type lagunage naturel, contient :

-Conduite d'amenée des eaux usées brutes :

-La station d'épuration est alimentée par la conduite de refoulement en provenance de station de pompage SP1 :

- Diamètre : 500 mm
- Matériau : Béton précontraint PC8
- Cote (altitude) du fil d'eau à l'arrivée: 1027,80 m

Ouvrage de réception

L'ouvrage de réception et de distribution installé à l'amont de la STEP, se compose :

• D'un regard de 2,00 m * 2,00 m * 2,30 m destinée à la tranquillisation des eaux refoulées ;

• D'un canal de 6,00 m * 0,80 m * 1,00 m doté d'un regard de 0,50 m * 0,50 m * 1,00 m destiné au mesure de débit (canal Parchal) ;

• D'un dégrilleur manuel à barreaux inclinés avec un écartement de 3 cm ;

• D'un regard composé de 4 compartiments :

• Un compartiment de 3,30 m * 1,50 m * 2,30 m destiné à l'arrivé, la régularisation et la distribution des eaux usées ;

• 4 compartiments de 1,00 m * 1,00 m * 1,10 m destinés à véhiculer les eaux vers les bassins anaérobies.

Bassins anaérobies :

• Nombre de bassins : 4 Unités en parallèle

• Dimensions fond de bassin : 58,40 x 18,43 m

• Dimensions à mi-hauteur d'eau : 66,20 x 26,20 m

• Dimensions crête de bassin : 74,00 x 34,00 m

• Profondeur d'eau : 4,00 m

• Profondeur de bassin : 4,50 m

• Hauteur de digue sur terrain naturel : 1,00 m à l'amont et 1,60 à l'aval

• Pente extérieur : 1,73

• Pente intérieur: 1,73

- Côte du radier de bassin : 1027,50 m NGM (Nivellement Géneral du Maroc) c'est un point dont l'altitude par rapport au niveau moyen des mers est connus avec précision.
- Côte de la crête de digue amont : 1023,00 m NGM
- Côte du niveau d'eau : 1027,00 m NGM Lagune des Boues

Lagune des Boues :

- Nombre de lits : 2
- Dimensions unitaires : 10 m x 25 m
- Dimensions totales : 50 m x 25 m
- Hauteur de Boues : 0,35 à 0,60 m

Evacuation de l'eau épurée :

Les eaux épurées issues des bassins anaérobies sont évacuées par les collecteurs de décharge. Chaque collecteur diamètre de 400 mm en PVC dessert 2 bassins. L'ensemble des eaux sont acheminées vers le point de rejet situé en extrême aval de la STEP pour être déversées dans l'oued Ziz.

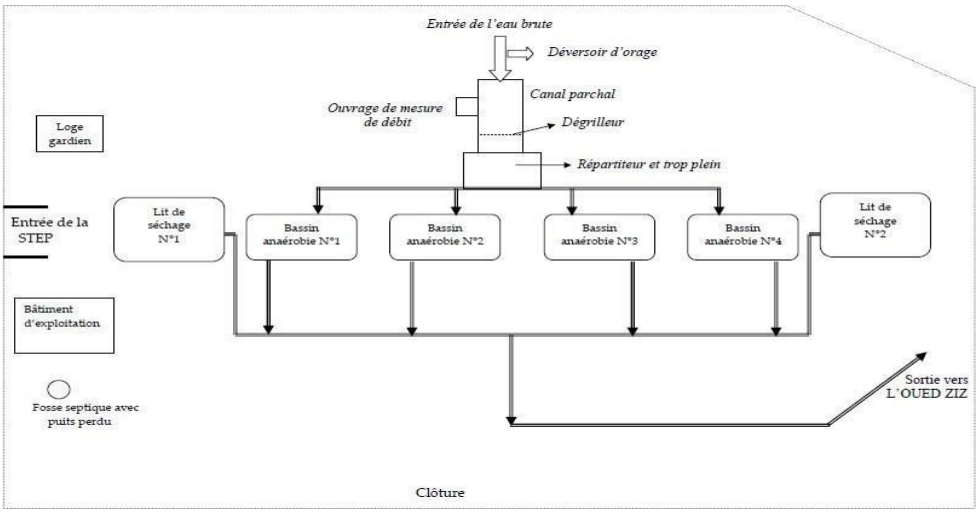


Figure 4: Schéma synoptique de la station d'épuration des eaux usées d'Errachidia type lagunage naturel

2. Station d'épuration type lagunage aéré après 2013

2.1. *Localisation de la station*

La station d'épuration du type lagunage naturel (précédemment décrite) a été transformée en lagunage de type aérée au cours l'année 2013. En effet, la station a connu des travaux de réhabilitation en vue de la modernisation du site et de l'amélioration de l'épuration.

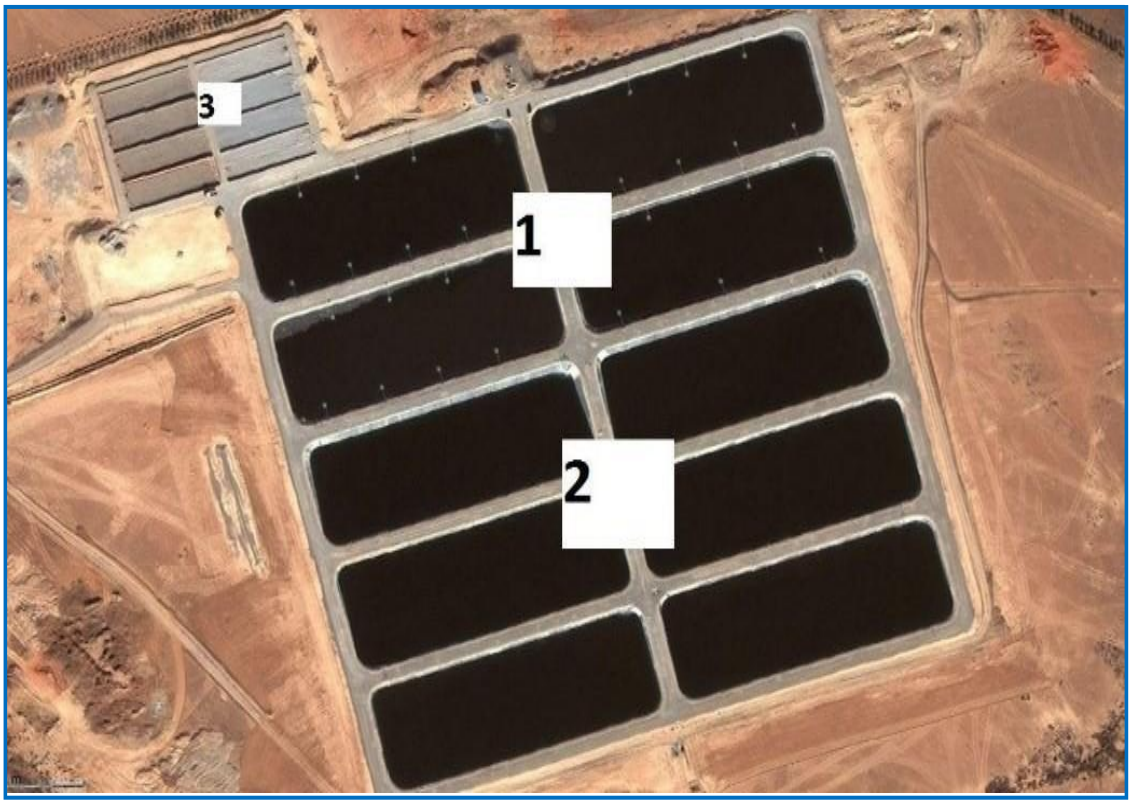


Figure 5: Schéma synoptique de la station d'épuration des eaux usées d'Errachidia type lagunage aéré (Ouhammi, M et al. ,2023) .

Le lagunage aéréest composé de :

- bassins aérés : 4
- bassins de maturation : 6
- lits de séchage des boues : 8

2.2. ***Présentation de la station***

Les principales données de base sont récapitulées dans le tableau 6:

Tableau 6: Présentation de la station type lagunage aéré d'Errachidia

Procédé	**lagunage aéré**
Nombre d'équivalents habitants (Standard International = 60 g DBO5/EH)	57.700
Débit moyen en temps sec y compris eaux parasites m^3/j	7.520
Débit de pointe journalière m^3/j	13.320
Charge moyenne Kg DBO5/j	3.460
Localisation des lieux de rejets de l'effluent épuré	Oued Ziz
Nature du milieu récepteur	Oued saisonnier
Concentration moyenne en sortie DBO5	< 120 mg/l
Concentration moyenne en sortie DCO	< 250 mg/l
Concentration moyenne en sortie MES	< 150 mg/l
Coliformes fécaux	< 1000 CF/100 mL d'eau épurée

La description composite de la nouvelle station type lagunage aéré :

- Un dégrilleur manuel à barreau incliné.
- Un canal Venturi pour la mesure de débit à l'entrée de la station
- Des répartiteurs de débits (REP)

- REP principale : situé à l'aval immédiat de l'ouvrage de mesure de débit du prétraitement et qui reçoit les eaux gravitaires de l'ouvrage de prétraitement et les acheminent vers les trois bassins du premier étage.

- REP 1, REP 2 et REP 3: Ces trois répartiteurs assurent la répartition du débit provenant du bassin AE4 sur les 6 bassins de maturation.

- Des batardeaux de sectionnement ;

• 4 bassins aérés, dont :

- 3 bassins pour le premier étage avec 7 aérateurs chacun ;
- 1 bassin pour le deuxième l'étage avec 5 aérateurs.

• 6 bassins de maturation, qui se composent de 3 étages et chaque étage comporte 2 bassins parallèles ;

• 2 aires comportant au total 8 lits de séchage de superficie globale de 6000 m^2.

• Conduites et ouvrages de communication entre lagunes munis des équipements nécessaires pour réglage des seuils déversants.

• Canal Venturi pour la mesure du débit à la sortie.

• Un ouvrage de rejet des eaux épurées vers l'oued Ziz.

2-3 Dimensionnement des bassins aérés

Les lagunes aérées sont dimensionnées sur la base des critères suivants :

• La charge volumique (CV) représente la quantité de pollution journalière amenée par les eaux brutes par unité de volume utile en épuration. La charge volumique doit être inférieure ou égale à 40 g DBO5/m^3j.

• Un temps de séjour minimal (Ts) permet d'assurer la stabilité de l'écosystème; ce paramètre (Ts) ne doit pas être inférieur à 5 jours.

• La hauteur d'eau dans ces lagunes est généralement fixée à une valeur comprise entre 2,5 à 4 m pour permettre une action optimale des dispositifs d'aération. La profondeur de ces bassins est définie en fonction du type de dispositif d'aération retenu et des conditions de calage et d'implantation des bassins. Ces dernières sont fonctions de nombreux paramètres tel que surfaces disponibles, morphologie du site, topographie, géotechnique. La profondeur choisie est de 3,70 m, compte-tenu de la nature rocheuse et de la morphologie du site.

• Le dispositif d'aération est dimensionné pour satisfaire les besoins en oxygène des microorganismes. L'apport spécifique brut en oxygène pour dégrader les substances polluantes est fixé à :

- 1,5 kg O2 / kg DBO5 éliminé

• Les aérateurs flottants généralement utilisés pour les bassins de lagunage, fournissent entre 0,8 et 0,9 kg O2/kWh. Pour le dimensionnement 0,85 kg O2/kWh a été retenu.

• Les dispositifs d'aération mis en place devraient également assurer une puissance volumique de 2 à 3 W/m^3 de bassin, afin d'assurer une homogénéisation et une circulation des effluents sans remettre en suspension les boues décantées au fond du bassin.

Les bassins aérobies sont dimensionnés en divisant la charge polluante biologique (DBO5) par la charge volumique considérée pour les bassins aérobie (Tableau 7)

Tableau 7 : Les volumes nécessaires aux horizons 2020 et 2030.

Bassins aérobies	**Unité**	**2020**	**2030**
Demande biochimique en oxygène: DBO5	kg/j	3 460	4 220
Charge volumique :Cv	g DBO5/ m3/j	40	40
Débit moyen y compris eaux parasites : Qm	m^3/j	7.520	9 160
Temps de séjour : Ts	J	12,3	12,6
Volume nécessaire du lagunage aéré basé sur la charge volumique (Cv)	m^3	92 100	115 150
Volume du lagunage choisi : V	m^3	92 108	115 135

Pour un meilleur rendement du traitement et de façon à avoir des bassins de taille acceptable, leur nombre a été fixé à 4 de caractéristiques identiques et deux étages ont été considérés.

Le premier étage couvre les 70% du volume (en 3 bassins) et le second 30% (en 1 bassin).

Le bassin aéré de deuxième étage alimente les bassins de maturation.

Les dimensions retenues des bassins sont celles indiquées dans le tableau 8.

Tableau 8: Caractéristiques techniques des bassins aérobies

Pente talus n =Horizontal/Vertical		2
Profondeur utile bassin	M	3,7
Longueur utile	M	143
Largeur utile	M	43
Surface utile d'un bassin	m^2	6 150
Volume utile d'un bassin	m^3	23 030
Nombre de bassins 2020		4
Volume utile total 2020	m^3	92 100
Nombre de bassins 2030		5
Volume utile total 2030	m^3	115 140
Bord franc	M	1
Profondeur totale en bassin	M	4,7
Longueur en crête du bassin	M	155
Largeur en crête du bassin	M	55
Surface totale du bassin en crête	m^2	8 424
Volume total du bassin en crête	m^3	31 540
Surface totale du bassins (hors digues et pistes)	Ha	4,21

Pour permettre la réutilisation agricole des eaux usées épurées sans restriction, il est nécessaire de pousser le traitement jusqu'au niveau tertiaire. Ceci nécessite des bassins de maturation pour atteindre moins de 1000 CF/100 mL et d'éliminer totalement les œufs d'helminthes et les kystes des protozoaires. Ces bassins serviront en même temps de bassin de décantation, particulièrement le premier étage de maturation, et du traitement tertiaire qu'ils doivent assurer

Le temps de séjour au niveau du bassin de décantation et dans chaque étage de maturation est de 3 jours. Ceci favorise le fractionnement en plusieurs étages de maturation améliorant ainsi le rendement épuratoire. Alors que le nombre de bassins de maturation en série est de 6 en paralleles. Pour avoir des bassins de dimensions raisonnables, chaque étage de maturation est composé de deux bassins dont les caractéristiques sont comme suit (ONEP, 2008) ,(Tableau 9).

Tableau 9: Caractéristiques des bassins de maturation

Pente talus =Horizontal/Vertical	m/m	2
Profondeur utile bassin	m	1,5
Longueur utile	m	151
Largeur utile	m	50
Surface utile d'un bassin	m^2	7 550
Volume utile d'un bassin	m^3	11 325
Nombre de bassins par étage de maturation	U ; unité	2
Volume utile par étage de maturation	m^3	22 650
Nombre d'étages de maturation (y compris des bassin de décantation)		3
Bord franc	M	0,5
Profondeur totale bassin	M	2
Longueur en crête de bassin	M	156
Largeur en crête de bassin	M	55
Surface totale bassin en crête	m^2	8 580
Volume maximum bassin (en crête)	m^3	15 536
Surface totale bassins maturation (hors digues et pistes)	Ha	5,21

III. Méthodes utilisées

L'épuration des eaux usées consiste à l'abattement de la pollution. L'efficacité et le bon déroulement des différents stades et procédés d'épuration. Ce suivi impose un certain nombre de contrôles et de mesures.

1. Modalités de prélèvement des eaux usées

Les échantillons des eaux usés destinés à l'analyse sont prélevés selon un mode d'échantillonnage composite. Un échantillon composite est un mélange de façon intermittente ou continue, en volume égale, dont on obtient la valeur moyenne de la caractéristique désirée. Les proportions d'échantillons sont généralement calculées à partir des mesures de temps ou de débit.

Pour notre cas, nous avons effectué un échantillonnage composite proportionnel au débit

Les échantillons composites proportionnels au débit sont particulièrement nécessaires pour la caractérisation de la qualité globale des eaux usées dont le débit et la qualité varient simultanément de façon significative (AFNOR, Norme ISO 5667-2-1991). Pour la constitution de l'échantillon composite sur 24 heures, il est extrêmement important de procéder automatiquement en fonction du débit écoulé (échantillonneur asservi au débitmètre). A partir d'une détermination préalable du débit journalier, le volume approximatif total sur 24 heures est calculé et l'échantillonneur est programmé avec un pas proportionnel à ce volume. A titre indicatif, le pas de volume peut être pris égal au 1/100 du volume journalier. Ce mode d'échantillonnage correspond en moyenne à une prise toutes les quinze minutes. Une prise de 50 ml donne un échantillon composite de cinq litres

La fréquence d'échantillonnage et d'analyse est comme suit :

- Pour les paramètres sur place (la température, le pH et la conductivité électrique, une seule fois par mois pendant la periode d'épuration des eaux usées par lagunage aéré.

- Pour les paramètres globaux de pollution (la demande biochimique en oxygène, la demande chimique en oxygène et la matière en suspension), l'analyse a été effectuée mensuellement pendant l'étude.

- Pour les coliformes fécaux, totaux et les streptocoques fécaux : la fréquence est mensuelle.

- Pour les métaux lourds (Aluminium (Al), Argent (Ag), Cadmium (Cd), Chrome (Cr), Plomb total (Pb),Cuivre (Cu), et monoxyde de carbone (Co)).le prélèvement a été effectué trimestriellement.

2. Analyses physico-chimiques

Les paramètres analysés pendant la période d'étude sont les suivants ;

2-1 La température

La température est mesurée à l'aide d'un thermomètre à mercure gradué de -10 à +60 °C, type immersion total 253 mm.

2-2 Le pH

La mesure du pH a été effectuée par un pH-mètre de type HACH modèle ,Sension 2.

2-3 La conductivité électrique

La conductivité a été mesurée à l'aide d'un conductimètre de type HACH modèle Sension 5,

2-3 La demande chimique en oxygène

La DCO a été analysée par oxydation au dichromate de potassium à chaud (150 °C) pendant 2 heures en milieu acide selon la NF 90-101-2001/NM 03.7.54-2013,(SOUDE Marilyn Karen and al 2018), Après l'excès des dichromate de potasium est titré avec la solution de sulfate de fer et d'ammonium .

2-4 La demande biologique en oxygène

La mesure de DBO5 a été effectuée selon la NF de1899-1 (AFNOR,1998)/ (Jesús Villalobos Garcia and al, 2019). L'échantillon d'eau usée est dilué dans un flacon par une eau saturée en oxygène dissous (grâce au barbotage à l'aide d'un bulleur). Le flacon est déposé dans un incubateur pendant 5 jours à 20 °C. La mesure de l'oxygène dissous, avant et après cinq jours d'incubation, est réalisé à l'aide d'un oxymètre de type HACH modèle

2-5 Les matières en suspension

La méthode déployée dans la mesure de MES est la méthode gravimétrique selon la NF en 872/2005 , (Jesús Villalobos, Garcia and al ,2019),(F. Merhabi, H. et al. , 2019) . Elle consiste à verser progressivement un volume Ve=100 mL d'eau à analyser sur un disque filtrant, ce dernier est placé dans un appareil de filtration mené d'un système d'aspiration, jusqu'à ce que l'appareil se vide. Le filtre est placé dans une étuve de 150°C pendant 1H, puis refroidie et pesé. Le même protocole est réalisé par un volume de 100 mL d'eau distillée sur un filtre, pour faire une pesée différentielle

2-6 Les formes azotées

2-6.1 Les nitrates (NO_3^-)

Selon la norme d'AFNOR T90-012, en présence de l'acide sulfosalycilique, les nitrates sont réduits en nitrites, aboutissant à la formation d'un dérivé coloré en jaune, en présence d'ammoniaque. Le dosage est par colorimétrie à 435 nm (Rodier J., 2009).

2-6.2 Les ions ammonium (NH_4^+)

L'ammonium (NH_4^+) est déterminé, selon la norme AFNOR T90-012 (Rodier J., 2009). C'est un dosage colorimétrique par un pectrophotomètre UV. Les ions ammonium sont melangés avec l'hypochlorite de sodium et le phénol dans un milieu alcalin, en présence du nitriprussiate de sodium comme catalyseur. Cette réaction donne le bleu d'indophénol qui est dosé par le spectrophotomètre à une longueur d'onde de 630 nm.

2-7 Dosage des métaux lourds dans les eaux usées brutes et épurées de la STEP

Pendant la période d'étude, l'ensemble des analyses des métaux lourds ont été effectuées selon les méthodes décrites par (Rodier, 2009), au sein de centre d'innovation à l'université Sidi Mohamed Ben Abdellah de Fes -Maroc.

2-8 Analyses des métaux lourds

La détection simultanée des éléments traces métalliques des échantillons liquides a été réalisée par une méthode analytique constituée d'une chambre de nébulisation, d'une torche à plasma et d'un détecteur .Il s'agit de la spectrométrie d'émission atomique par plasma à couplage inductif (ICP-AES). C'est pour cela que les échantillons sont filtrés à l'aide d'un filtre à papier de 0,45 µm de diamètre, puis les éléments cibles sont détectés à partir du rayonnement émis lors de leur ionisation. Dans cette étude, l'analyse par ICP-AES a été effectuée à la cité d'innovation de Fès méthode de spectroscopie de type Horiba Jobin Yvon (El Mouhri, 2022).

A l'aide des flacons en polyéthylène, nous avons effectué des prélèvements à l'entrée et à la sortie de la station d'épuration, Les échantillons ont été envoyés au centre d'innovation.

Pour le cas des eaux usées de la ville d'Errachidia, nous avons procédé à l'analyse des éléments suivants : l'Aluminium (Al), l'Argent (Ag), le Cadmium (Cd), le Chrome (Cr), le Fer (Fe), le Mercure (Hg), le Plomb total (Pb), le Nickel (Ni), le Manganèse (Mn), le Cuivre (Cu), le Zinc (Zn) et le Baryum (Ba).

Les eaux ont été filtrées sur papier WATTMAN de porosité 0,45 µm, et 100 mL de la solution obtenue est chauffé jusqu'à siccité. Le résidu résultant est traité par l'acide chlorhydrique jusqu'à dissolution totale de tous les sels. La solution obtenue est transvasée dans une fiole et jaugée par de l'eau distillée.

Le dosage a été effectué par spectrométrie d'absorption atomique, à l'aide d'un spectromètre PERKIN ELMER.

3 Analyses bactériologiques

Les analyses bactériologiques réalisées sont celles concernant les coliformes fécaux, totaux et les streptocoques fécaux. Les analyses ont été réalisées avec des méthodes couramment utilisées en analyses microbiologiques

3-2 Coliformes totaux

L'analyse bactériologique a porté sur la quantification des germes d'origine fécale: coliformes totaux (CT) selon la NM ISO 9308-1/2007 (Sadhana Kodali , et al.,2021).

3-3 Coliformes fécaux

L'analyse bactériologique a porté sur la quantification des germes d'origine fécale:coliformes fécaux (CF), selon la NM ISO 9308-1/2007 (Sadhana Kodali , et al .,2021).

3-4 Entérocoques intestinaux ou streptocoque fécaux

L'analyse bactériologique a porté sur la quantification des germes d'origine fécale : Enterocoque intestinaux selon la NM ISO 7899-2 / 2007(.Sadhana Kodali , et al .,2021)

4 Disposition de la parcelle expérimentale

L'étude s'est faite sur deux cultures qui sont les feuilles de laitue, qui se consomment à l'état cru et les légumes de courgette. La préparation des échantillons de courgettes et de laitue a été réalisée comme suit : nous avons semé les graines de laitue dans les boites contenant de la tourbe,et nous avons semé les graines de courgettes dans la terre directement. Après 10 jours de germination, nous avons déplacé les plantes (tiges de laitues) sur une parcelle de plus de 12 m^2 qui a été aménagée à côté du collecteur général . Ces deux types de plantes sont espacés durant tout le cycle de cultures allant du début de mois de février au mois de Juin 2021. Les plantes étudiées sont irriguées par l'eau usée épurée de la STEP de la ville D'Errachidia jusqu'à la maturation (Figures 6, 7, 8,9 et 10).



Figure 6: Photo de plantules de laitue



Figure 7 : Photos des plantules de laitue et courgette dans la parcelle expérimentale



Figure 8: Photos des feuilles de laitues matures



Figure 9: Photos des feuilles de laitues et légumes de courgettes



Figure 10: Photos des légums de courgettes matures

4-1 Méthodes d'échantillonnage des feuilles de laitue et de courgettes

La prise d'échantillons de feuilles de laitue et courgettes a été effectuée de façon à obtenir un échantillon représentatif et composite de la parcelle étudiée. A l'aide de pince stérile, les feuilles de laitue (feuilles internes et externes de la plante) et courgettes ont été enlevées sur des pieds différents, puis mises séparément dans des sachets stériles en plastique. Les échantillons sont ensuite conservés dans une glacière isotherme dans des flacons et acheminés au laboratoire de l'Institut pasteur de Casablanca, pour une évaluation de leurs qualités bactériologiques.

4-2 Analyses bactériologiques des feuilles de laitue et la courgette

Un échantillon de 10 g a été broyé et dilué dans 90 ml d'eau peptone saline et homogénéisé pendant 10 minutes à l'aide d'un agitateur. A partir du mélange obtenu, des dilutions décimales allant jusqu' à 10^{-5} ont été effectuées avec l'eau peptone à saline. Ensuite, 10 ml de

suspension ont été filtrés à travers une membrane filtrante qui a été incubée sur milieu sélectif pendant 24 h à 37 °C pour les coliformes totaux et à 44 °C pour les coliformes fécaux. Le dénombrement a été effectué respectivement par la méthode NMISO 4832 et, NM08.0.124, ainsi que la recherche *d'Escherichia coli* a été effectuée selon la NMISO16649-1.

Tableau 10: Méthodes de dénombrement des germes recherchés tel que : *Coliformes totaux, Coliformes fécaux, entérocoques intestinaux, Escherichia coli et Salmonella*

Germes recherchés	**Méthodes**
Coliformes totaux	NMISO 4832
Coliformes fécaux	NM08.0.124
Entérocoques intestinaux	/
Escherichia coli	NMISO16649-1
Salmonella	NMISO6579-1

Quant à la recherche des *salmonelles* selon la (NMISO6579-1, NF EN ISO 6579 , 2002). Elle comporte quatre étapes :

1. Pré-enrichissement : 10 g de feuilles de laitue ont été broyés et mises dans l'eau peptone tamponnée (bouillon nutritif) à une dilution de 10^{-1}. L'incubation est à 37°C pendant 18 à 24 heures.

2. Enrichissement : le bouillon Rappaport ensemencé avec 0,1 ml du bouillon nutritif est incubé à 44°C pendant 24heures.

3. Isolement : le milieu Hektoen (milieu sélectif) est ensemencé à partir du bouillon rappa port et incubé à 37°C pendant 18 à 24 heures.

4. l'identification des salmonelles au niveau des feuilles de laitue a été réalisée selon le même protocole d'identification des *salmonelles* dans les eaux d'irrigation décrit précédemment. De même la détermination d'*Escherichia coli* a été effectuée selon (la NMISO 16649-1, la norme ISO 16649-2,2001).

Les valeurs de concentration en coliforme totaux ,coliforme fécaux, *Escherichia coli*, *Entérocoques intestinaux* et *Salmonella* pour chaque flore (laitue, courgette) , ont été calculées puis comparées à la référence normative des critères microbiologiques des aliments

(Règlement CE N° 2073/2005) et (l'annexe de l'Arrêté conjoint du ministre de l'agriculture, de la pêche maritime, du développement rural et des eaux et forêts ,et du ministre de la santé n°293-19 , 2019) .

4-3 Analyse statistique

Après avoir été collectées, les données ont été classées dans Excel et examinées pour vérifier leur normalité. Tout d'abord, nous avons calculé la moyenne et l'écart type des paramètres étudiés tels que les coliforme fécaux, E. coli, Salmonella, en (UFC/g),ensuite, nous avons comparé chaque paramètre aux normes des plantes étudiées (Courgette et Laitue) avec un échantillon de T-Test. De plus, les paramètres microbiologiques ont été comparés entre les cultures avec un échantillon de test T. Les résultats ont été affichés sous forme de moyenne ± écart-type, avec un seuil de signification de 0.05 appliqué à chaque valeur.

IV. Analyse parasitologie des boues de la station d'épuration de la ville d'Errachidia

IV -1 Recherche des œufs d'helminthes

IV -1 – 1 Matériel utilisé :

- Centrifugeuse avec tube à centrifugation de 20 ml
- Flacon de 1.5 L

IV -1 – 2 Réactifs

Solution de nitrate de sodium à 500 g /l (P/v)

IV -1 - 3 Méthodologie :

La methodologie de la recherche des œufs d'helminthes a été suivi par les étapes suivantes :

Agiter l'échantillon d'eau usée,

Prélèver 1 litre et laisser décantée 8 h au moins délicatement, le surnageant (sans agiter le sédiment)

Rejeter le surnageant.

Introduir le sédiment dans une série de tubes de 20 ml à raison de 3 ml par tube.

Rincer les parois du flacon avec une pulvérisation.

Ajouter les eaux de rinçage au sédiment.

Centrifuger les tubes pendant 10 min à 700 tours

Eliminer le surnageant

Ajouter dans chaque tube 3 ml de solution de nitrates de sodium.

Centrifuger 3 min à 1000 tours et prélèver le surnageant où se trouvent maintenant les œufs d'helminthes.

Placer dans le flacon de 1,5 L contenant l L de l'eau diluée.

Effectuée 3 fois l'addition de nitrates de sodium et la suite des

opérations. Mettre les surnageants dans les flacons de 1.5 L.

Laisser déposer pendant plusieurs heures pour permettre aux œufs d'helminthes de sédimenter.

Retirer avec soin le surnageant.

Répartir les sédiments et l'eau de rinçage du flacon dans une série de tubes à centrifuger

. Centrifuge pendant 4 min à 1000 g.

Prélèver ensuite au fond de chaque tube, à l'aide d'une pipette pasteur 1 ml de culot de centrifugation.

Placer dans une cellule de numération pour compter les œufs sous un grossissement de 100.

Expression de résultats

On calcule le nombre d'œufs N par litre d'eau usée à partir de la formule suivante :

N= X/P *V/S

X=nombre d'œufs comptés

P=volume de suspension introduit dans la cellule de

numération V =volume total de suspension

S= volume d'échantillon d'eau usée.

Méthode par flottation Matériels spéciale

Le nombre d'œufs dénombrés correspond au nombre total d'œufs contenu dans un litre d'eau usée.

IV -2 Recherche des kystes des protozoaires.

Pour la recherche et l'isolement des kystes des protozoaires, on laisse sédimenter 1000 mL d'échantillon pendant 24 heures. Une fois le culot réparti dans différents tubes à essais, nous avons fixé à l'aide du formaldéhyde (10 %), puis nous avons coloré au Lugol simple et nous avons ajouté du sulfate de zinc pour favoriser la flottaison des kystes. L'ensemble a été porté dans une centrifugeuse à 500 tours par minutes pendant 5 minutes. Une fois prélevés et posés sur une lame, les kystes ont été portés au microscope Olympus pour observation. Les kystes ont été identifiés à l'aide des planches de l'OMS (1994).

Analyse des données : Le volume intégral (Vx) du culot a été enregistré ; après homogénéisation du culot, un volume précis (Vy) a été prélevé et a été réparti dans différents tubes à essais. Le culot final de chaque tube à essais a été réparti sur des lames, puis le nombre (x) de kystes contenu dans 1 L d'échantillon a été obtenu par la formule proposée par (Ajeagah et al. , 2010)

$$X = \frac{y * Vx}{Vy}$$

Avec Vx = volume du culot d'1 L

d'échantillon, Vy = volume du culot

utilisé pour observation, y = nombre de

kystes observé dans Vy

Partie III : Résultats et discussion

Chapitre 1 : Evaluation de la qualite des eaux usees brutes de STEP de la ville d'errachidia.

I. Introduction

Les différentes sources de pollution environnementale, surtout dans les pays moins sensibilisés par les risques sanitaires sont causées par l'accroissements de la population, l'économie et l'urbanisation.Parmi ces pollutions, les eaux usées qui sont souvent rejetées dans le milieu récepteur sans aucun traitement, (OMS,2012) et plus de 80% des eaux usées du monde sont rejetés dans l'environnement sans aucun traitement,entrainant ainsi la dégradation des écosystèmes (terrestres ou aquatiques) (OMS,2012). le volume total réel des eaux usées rejetées au Maroc est estimé à environ 750 millions de m^3 et 48% de ces eaux sont rejetées dans les rivières et le milieu naturel et le reste vers la mer, (Mandi et Ouazani, 2013). En plus, les eaux usées domestiques contiennent un pourcentage élevé des matières organiques et de microorganismes pathogènes; notamment les bactéries, les virus et les parasites (Shakir et al., 2017), La ville d'Errachidia n'échappe pas à cette règle d'où le traitement de ces rejets est nécessaire ,afin de lutter contre leurs effets nocifs, et exploiter cette source d'eau disponible en abondance et en continu pour une réutilisation en irrigation, ce qui a poussé la municipalité de la ville à réaliser une nouvelle station d'épuration à lagunage aéré en 2013, dans le but de s'appliquer aux normes marocaines, et d'augmenter le degré d'épuration .

la présente étude a pour objectif d'évaluer la qualité des eaux usées traitées en vue de leur réutilisation en irrigation.

II. Analyse des paramètres physico-chimiques

Les résultats détaillés des analyses physico-chimiques des eaux usées brutes de la STEP de la ville d'Errachidia sont effectués du mois de janvier au mois de décembre 2020 et sont présentés dans le tableau 11.

Tableau 11: Paramètres physico-chimique des eaux usées brutes à l'entrée de la station d'épuration d'Errachidia pendant l'année 2020.

Paramètres **Mois**	**T°C**	**PH**	**MES (mg/L)**	**DCO (mgO2 /L)**	**DBO5 (mgO2 /L)**
Janvier	14,9	6,5	120	650	298
Février	18	6,8	188	792	360
Mars	20	7,97	145	744	320
Mai	25	8,15	156	922	391
Juin	24	8,1	91.5	393.6	220
Juillet	25	8,06	413.5	930	460
Aout	18.5	8,02	325	960	451
Septembre	19	8	140.5	721.3	364
Octobre	20	8,02	160	1131.3	129
Novembre	21	8,02	165	1368	251
Décembre	21	8,1	145	1114.6	393
Moyenne	20,58	7,74	186,31	884,25	330,63
valeurs limites de rejet des eaux de surface ou profondeurs janvier 2018	30	5,5 -9,5	100	500	100

NB ; pas d'analyse au mois d'avril vue c'était la periode du Covid-19

1. La température

La température des eaux usées brutes à l'entrée de la STEP de la ville d'Errachidia, est comprise entre 14,9 °C et 25 °C, avec une moyenne de 20,58 °C, (tableau N°11). Ces températures enregistrées sont incluses dans la fourchette des valeurs limites de rejet des eaux de surfaces du Maroc qui doivent être inférieures à 30°C , et dans la fourchette des normes marocaines de qualité des eaux destinées à l'irrigation (S.E.E.E-2007, Maroc).

2. pH

A l'entrée de la station, le pH des eaux usées brutes varie entre 6,50 et 8,15. Ces valeurs se siuent dans la fourchette des valeurs limites de rejets qui sont comprises entre 5,5 et 9,5, et se situent dans la fourchette des normes marocaines de qualité des eaux destinées à l'irrigation (Maroc-SEEE-2007).

3 - La demande chimique en oxygène

La demande chimique en oxygène permet d'évaluer la concentration en matières organiques dissoutes ou en suspension dans l'eau, à travers la quantité d'oxygène nécessaire à leur oxydation chimique totale (J. RODIER, 2009). Les valeurs de la DCO à l'entrée varient entre 393,6 mg/L et 1368 mg/L au cours de l'année 2020. Ces valeurs sont inférieures à celles trouvées en 2013 dans la même station pour les mois mai, juin et juillet (Chaouki .H et al. 2014) et sont plus au moins similaires à celles obtenues à M'zar Agadir sud qui est de 1433,7 mg/l comme valeur maximale (Mansir, I.et al., 2021) .

4- La demande biochimique en oxygène

La demande biochimique en oxygène est la quantité d'oxygène utilisée pour la dégradation des matières organiques décomposables et biodégradables par des processus biochimiques (J. RODIER, 2009). Les concentrations de la DBO5 à l'entrée de la STEP de la ville d'Errachidia varient entre 129 mg/L et 460 mg/L.Ces valeurs sont similaires à celles trouvées à Agadir Maroc (Mansir, I et al., 2021) et inferieures à celles trouvées à la STEP de la ville Dar El Gueddari,Maroc (Ayyach et al.,2016).

5 - Les matières en suspension

L'ensemble des particules minérales et organiques contenues dans les eaux usées, représentent les matières en suspension ainsi la concentration des éléments colloïdaux dans les eaux usées. La quantité de la matière en suspension à l'entrée varie entre 91,5 mg/L et 413,5mg/L, avec une moyenne de 186,31mg/L, qui reste inférieure à celle trouvée en 2014 (chaouki . H et al.,2014). Cette valeur moyenne des MES à l'entrée de la STEP est supérieure aux valeurs limites de rejet Générale dans les eaux superficielles ou souterraines marocaine (norme marocaine, de rejet des eaux de surface,2018)

6 Analyse des paramètres métalliques : la teneur en métaux lourds dans les eaux usées brutes de la STEP

Les analyses des métaux lourds des eaux usées brutes de la STEP de la ville d'Errachidia ont été réalisées durant les mois d'octobre 2020 et février 2021 pour les métaux lourds, selon la norme marocaine des eaux destinées à l'irrigation (Norme de qualité des eaux destinée à l'irrigation (S.E.E.E, 2007)). Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous

Tableau 12 : La teneur en métaux lourds dans les eaux usées brutes de la STEP

Paramètres (mg/l)	Octobre	février	valeurs Limites des eaux de rejets (mg/l)
Ag (mg/l)	<0,02	<0,01	0,1
Al (mg/l)	<0,01	<0,01	10
Cd (mg/l)	0,045	<0,01	0,25
Co (mg/l)	<0,02	<0,01	0,5
Cr (mg/l)	0,054	<0,01	2
Cu (mg/l)	<0,02	<0,01	2
Pb (mg/l)	<0,02	<0,01	1

Les données du tableau 12 montrent que les concentrations en métaux lourds à l'entrée de la station d'épuration sont très faibles, ceci confirme la nature des eaux usées domestiques de la ville. Nous observons aussi que ces valeurs restent bien dans la fourchette des normes marocaines, Par ailleurs, ces concentrations pour tous les éléments traces métalliques restent inférieures à celles relevées dans la même station en 2014 sauf pour Ag et Cd.(Chaouki .H et al ., 2014).

7 Les ions ammonium

Les résultats d'analyse des composes azotés sont illustrés dans le tableau 13

Tableau 13 : Résultats moyennes d'analyses durant les cinq mois de suivi des formes Azoté à l'entrée de la STEP année 2021

Paramètres	**Température**	**NH_4^+ (mg/l)**	**NO_2^- (mg/L)**	**NO_3^- (mg/L)**
Janvier	14,9	0,749	1,22	0,257
Février	18	4,448	1,983	1,453
Mars	20	0,602	1,422	0,634
Avril	24	0,388	0,978	0,21
Mai	25	1,007	1,008	0,242
Moyenne	20,38	1,43	1,32	0,55

La charge éliminée de NH_4+ durant les cinq mois de suivi varie entre un maximum de 4,448 mg/l observé au mois Février et un minimum de 0,388mg/l observé au mois de d'Avril (tableau 13), ces résultats peuvent êtres expliquées par plusieurs conditions à savoir :

-la charge azotée de l'effluent brut.

-capacité d'oxygénation.

- L'élimination de la concentration des NH_4+ en nitrite NO_2- et en nitrate NO_3- en présence d'oxygène (O_2) est la nitrification, la population bactérienne impliquée est autotrophe et le déroulement de l'oxydation est résumé par la réaction chimique donné ci-dessous.

$$\mathbf{NH_4^+ + 2O_2 \longrightarrow NO_3^- + 2H^+ + H_2O.}$$

La gamme des températures favorable à la nitrification est large, et la limite inferieur est de 5°c (P.SERVAIS, et al.,1992), Alors que la limite supérieure se situe entre 40°c et 45°c (M. HENZE ,1991). Les microorganismes nitrifiants présentent une température optimale qui se situe entre 25°c et 36°c (GROENEWEG,et al 1994) .La valeur de la température au cours de cinq mois d'étude varie entre 14,9 C° et 25C° à l'entrée et entre 10 C° et 26C° à la sortie de la STEP (tableau13).Ainsi Cette aération continue par les aérateurs permet à la population bactérienne aérobie de transformer l'azote en ammonium qui par la suite sera nitrifié/oxydé et transformé en nitrite et ensuite en nitrates. En effet, dans les bassin de la STEP, l'élimination de l'azote se fait souvent sous forme gazeuse par des réactions de nitrification et qui nécessite un apport important d'oxygène pour les bactéries aérobies (S. Hebabaze et al .,2014). Ainsi, les conditions d'aération du bassin biologique sont favorables à la croissance de bactéries à développement lent tels que Nitrosomonas et Nitrobacter ce qui augmente le processus de nitrification (A.Cébron , 2004, A.Cébron et al 1994).

8 Les Nitrites

Les résultats des éliminations des ion nitrites pour les eaux usées brutes de la STEP d'après le tableau N°13 montre que les teneurs en nitrites varient selon les mois, pour les eaux brutes ou la concentration maximale est de 1,983 mg/l enregistrée pendant le mois Février , ou la température est de 18°c et un minimum entre 0,978 mg/l et1,008 mg/l pendant les mois avril et Mai ou les températures sont respectivement de 24°c et 25°c, d'où l'effet important de la température sur la multiplication bactériennes comme Nitrobacter et Nitrosomonas qui transforment l'ammonium (NH_4^+) en nitrite ($N0_2^-$) ,c'est la nitritation..Ces résultats des NO_2^- pour les eaux brutes restent inférieurs à ceux trouvées en ville D'OUARGLA (OUNOKi.S et al ., 2014).

9 Les Nitrates

Pour les nitrates (NO_3^-), qui constituent la forme d'azote la plus dominante dans les eaux épurées et d'après le tableau n°13 les teneurs en nitrates varient selon les mois, pour les eaux brutes ou la concentration maximale est de 1,453 mg/l enregistrée pendant le mois Février ou

la température moyenne est de 18°C et un minimum de 0,21 pendant le mois d'avril ou la température est de 24°c, d'où l'effet positif de la température sur la biodégradabilité azotée ainsi ces résultats des NO_3^- pour les eaux brutes restent encore inférieur à ceux trouvées en litteratures (SERVAIS .P et al 1992) ,et ces valeurs en nitrates des eaux brutes (tableau 13) restent inférieures à la valeur limite des 30 mg/l préconisée par NMEDI (Norme Marocain de qualité des eaux destinées à l'irrigation; S.E.E.E, 2007).

10 - Parametres bacteriens

Les résultats de la concentration des germes recherchés dans les eaux usées brutes (entree STEP) sont illustrés dans le tableau 14.

Tableau 14 : Valeurs moyennes des coliformes totaux; fécaux et streptocoques fécaux des eaux usées à l'entrée de la station d'épuration d'Errachidia pendant l'année 2020

mois	coliforme totaux (UFC/100ml)	coliforme fécaux (UFC/100ml)	Streptocoque fécaux (UFC/100ml)
Janvier	1400	1200	1900
Février	95	44	89
Mars	1400	950	280
Mai	78	30	91
Juin	150	73	190
Juillet	93	30	78
Aout	14000	980	25
Septembre	23600	1160	0
Octobre	81500	3593	6300
Novembre	74000	14800	0
Décembre	433000	64000	3100
Moyenne annuelle	57210	7896	1095

10-1 Coliformes totaux

Les résultats des analyses bactériologiques à l'entrée de la station d'épuration révèlent la présence des germes indicateurs de la contamination fécale. La charge moyenne en coliformes totaux (CT) est de l'ordre de 57210 germes par 100 ml (Tableau 14)

10-2 Coliformes fécaux

Les résultats des analyses bactériologiques à l'entrée de la station d'épuration révèlent la présence des germes indicateurs de la contamination fécale. La charge moyenne en coliformes fécaux (CF) est de l'ordre de 7896 germes par 100 ml (Tableau n° 14)

10-3 Streptocoque fécaux

La charge moyenne en streptocoques fécaux (SF) à l'entrée de la STEP représente 1095 germes par 100 ml (Tableau n° 14). Le rapport CF/SF est supérieur à 1, ce qui signifie que la pollution fécale des eaux usées de la ville d'Errachidia est d'origine humaine.

11 Conclusion

Notre étude nous a conduit à mettre en évidence des valeurs moyennes de fortes charges organiques qui peuvent atteindre 884,25 mgO2 /l (tableau 11) pour la DCO et 330,63 mgO2 /l (tableau 11) pour la DBO5, aussi une concentration moyenne élevée en MES de 186,31 mg/l durant l'année 2020. Et toutes ces valeurs respectivement pour la DCO ; DBO5 et les MES sont toutes supérieures aux valeurs limites de rejet des eaux de surface et de profondeurs du Maroc (tableau 11) .D'autre part, cette forte charge organique est biodégradable du fait que la faible valeur du rapport DCO/DBO5, est de 2,67 qui est inférieur à 3. Ceci signifie que les eaux usées de la ville d'Errachidia sont de nature domestique, et implique la présence d'une grande proportion de matières biodégradables faciles à dégrader.

A partir de ces résultats nous pouvons déduire qu'une chaine d'épuration de type biologique (lagunage aérée) sera suffisante pour l'épuration des eaux usées de la ville d'Errachidia, c'est notre objectif dans le deuxième chapitre.

Chapitre 2: Evaluation de la qualité des eaux usées traitées par lagunage aéré au niveau de la station d'épuration de la ville d'Errachidia (Maroc)

I. Introduction

La présente étude a pour objectif, la caractérisation physico-chimique et bactériologique des eaux usées épurées de la STEP de la ville d'Errachidia, durant l'année 2020, afin d'évaluer l'efficacité du traitement des eaux usées de la station d'épuration, de type lagunage aérée, et voir leur réutilisation en irrigation. Les résultats mensuels moyens des analyses physico-chimiques des eaux usées épurées réalisées du mois de janvier au mois de décembre 2020 sont : DBO5=93mg O2/l ; DCO = 227mgO2/l ; MES= 87.67 mg/l, et qui montrent une conformité aux valeurs limites générales de rejet des eaux de surface Marocaine, ce qui protège l'environnement. Ainsi les résultats bactériologiques montrent la présence de divers germes avec des valeurs moyennes annuelles telles que; coliformes fécaux (CF) sont de 680 UFC/1OOml; coliformes totaux (CT) sont de 2810 UFC/100 ml et streptocoques fécaux sont de 46 UFC/100 ml, qui restent inférieurs aux valeurs limites recommandées par les normes d'irrigation Marocaines (CF < 1000 UFC/100ml), ce qui permet leurs exploitations et leurs réutilisations en irrigation.

II. Les paramètres physico-chimiques

Les résultats détaillés des analyses physico-chimiques des eaux usées épurées de la STEP de la ville d'Errachidia sont effectués depuis le mois de janvier au mois de décembre 2020 et sont présentés dans le tableau 16.

Tableau 15: L'analyse physico-chimique des eaux usées épurées de la STEP de la ville d'Errachidia, au cours de l'année 2020

Paramètres **Mois**	**T°C**	**PH**	**MES (mg/L)**	**DCO (mgO2 /L**)	DBO5 (mgO2 /L)
Janvier	10	6,7	90	227	90
Février	17	8	100	240	88
Mars	17	8,13	75	242	70
Mai	26	7,93	86,5	202	125
Juin	25	7,92	70	280	171
Juillet	25	8,0	47	203	121
Aout	19	8,15	78	220	100
Septembre	19	8,13	98,14	464,6	142
Octobre	20	8,15	100,5	498	25
Novembre	20	8,22	105	608	31
Décembre	20	7,98	104,5	548	76
Moyenne	19,81	7,93	86,78	339,32	94,45
Valeurs limites de Rejet des eaux de Surface ou de Profondeur du Maroc (2018)	30	5,5-9,5	100	500	100

Tableau 16: Paramètres physico-chimiques à l'entrée et à la sortie de la station d'épuration avec les taux d'abattement pendant l'année 2020

Mois	Paramètre	MES (mg/L)	DBO5 (mgO2 /L)	DCO (mgO2 /L)
Janvier	Entrée	120	298	650
	Sortie	90	90	227
Février	Entrée	188	360	792
	Sortie	100	88	240
Mars	Entrée	145	320	744
	Sortie	75	70	242
Mai	Entrée	156	391	922
	Sortie	86,5	125	202
Juin	Entrée	91,5	220	393,6
	Sortie	70	171	280
Juillet	Entrée	413,5	460	930
	Sortie	47	121	203
Aout	Entrée	325	451	960
	Sortie	78	100	20
Taux d'abattement(%)		76	77,82	97,91
Septembre	Entrée	140,5	364	721,3
	Sortie	98,14	142	464,6
Taux d'abattement(%)		30,14	60,98	35,58
Octobre	Entrée	160	129	1131,3
	Sortie	100,5	25	498
Taux d'abattement(%)		37,18	80,62	0,20
Novembre	Entrée	165	251	1168
	Sortie	105	31	608
Taux d'abattement(%)		36,36	87,64	47,94
Décembre	Entrée	145	393	1114,6
	Sortie	104,5	76	548
Taux d'abattement(%)		27,93	80,66	50,83
Moyenne annuelle	Entrée	186,31	330,63	884,25
	Sortie	86,78	94,45	339,32
Taux d'abattement Moyens annuels en %		53,42	71,43	61,62

Tableau 17: Paramètres physico-chimiques à l'entrée et à la sortie de la station d'épuration des saisons estivales (Mai, Juin, Juillet, Aout) et saison hivernale (Octobre, Novembre, Décembre) avec des taux d'abattement pendant l'année 2020

mois	Paramètre	MES (mg/L)	DBO5 (mgO2 /L)	DCO (mgO2 /L)
Juillet	Entrée	413,5	460	930
	Sortie	47	121	203
Taux d'abattement(%)		88,63	73,69	78,17
Aout	Entrée	325	451	960
	Sortie	78	100	20
Taux d'abattement(%)		76	77,82	97,91
Septembre	Entrée	140,5	364	721,3
	Sortie	98,14	142	464,6
Taux d'abattement(%)		30,14	60,98	35,58
Moyen des Taux d'abattement(%) en saison estival		64,92	70,83	70,55
Octobre	Entrée	160	129	1131,3
	Sortie	100,5	25	498
Taux d'abattement(%)		37,18	80,62	0,20
Novembre	Entrée	165	251	1168
	Sortie	105	31	608
Taux d'abattement(%)		36,36	87,64	47,94
Décembre	Entrée	145	393	1114,6
	Sortie	104,5	76	548
Taux d'abattement(%)		27,93	80,66	50,83
Moyen de Taux d'abattement (%) de saison hivernale		33,82	82,97	32,99

Les taux d'abattement moyens annuels des paramètres de pollution organique qui sont de 71.43%,61.62% et 53.42% respectivement pour la DBO5, la DCO et les MES (Tableau 16) indiquent que l'efficacité du traitement de la STEP est meilleure pour la DBO5, moyenne pour la DCO et pour les MES. Le faible abattement des matières en suspension s'explique par un dysfonctionnement du système de dégrillage qui laisse passer les déchets dans le bassin anaérobie, de même la température joue un rôle très important dans l'abattement de la charge organique ,de ce fait , on note que si la température à l'entrée de la STEP augmente, la charge organique diminue à la sortie de la STEP et inversement. D'où son importance dans l'abattement de la charge organique. Cette importance de la température dans la réduction de la charge organique est également mise en évidence dans une étude sur l'épuration des eaux usées par lagunage naturel, (T. U. ONIFADE, 2011). Ainsi les valeurs de la moyenne des taux d'abattement de la saison hivernale pour la DBO5 sont de 82,97%, et celle de la saison estivale est de 70,83 %. De même les valeurs de la moyenne des taux d'abattement de la saison hivernal pour les MES est de l'ordre de 33,82 %, alors que celle de la saison estivale est de 64,92%,ainsi pour la DCO la moyenne des taux d'abattement de la saison hivernale est de 32,99 % alors que la moyenne des taux d'abattement de la saison estivale est de 70,55 % et donc le taux d'abattement de la saison estivale pour la DCO et les MES est supérieur à celui de la saison hivernale,D'où l'importance de la température dans l'abattement de la charge organique.Les concentrations de ces paramètres à la sortie de la STEP sont inférieures à la norme marocaine ainsi que les taux d'abattement restent inférieurs à ceux trouvés à la STEP Mediona casa Blanca, Maroc qui dépassent globalement les 90 % avec un système de traitement qui est Réacteur Biologique Membranaire (RBM), (Nahli A and al, 2016)

II –1 La température

Il y a une une légere différence entre les valeurs de température des eaux usées à la sortie et l'entrée (fig 11) de le STEP de la ville d'Errachidia.La température des eaux usées épurées est comprise entre 10 °C et 26 °C, avec une moyenne de 19,81 °C (tableau 15).Ces températures enregistrées sont incluses dans la fourchette des valeurs limites de rejet des eaux de surfaces du Maroc qui doivent être inférieures à 30°C , et dans la fourchette des normes marocaines de qualité des eaux destinées à l'irrigation (S.E.E.E-2007, Maroc).

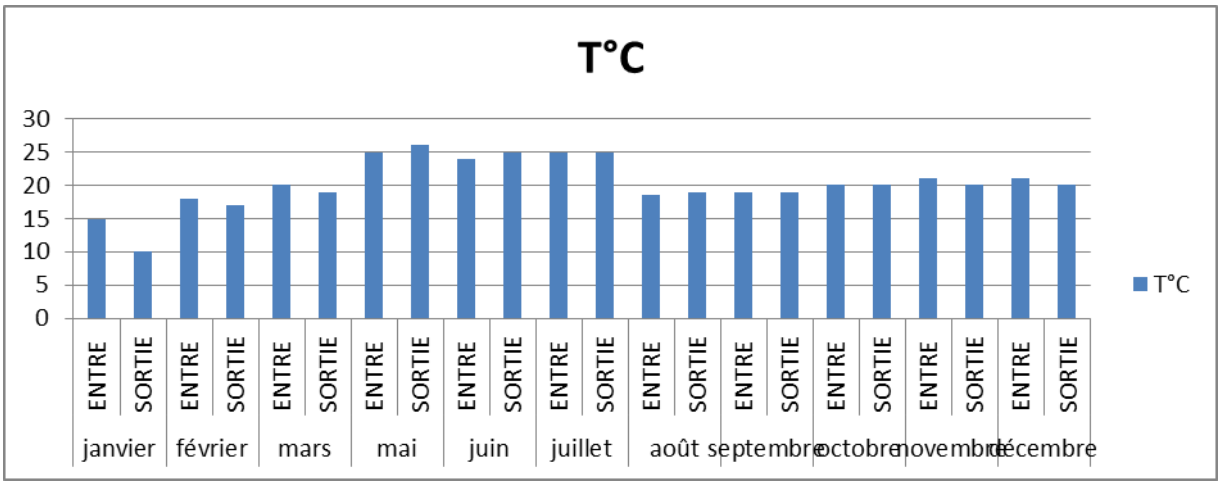


Figure 11: Variation des valeurs moyennes de la température à l'entrée et à la sortie de la station

II-2 pH

L'épuration nous a conduits à des valeurs stables de pH comprises entre 6,7 et 8,22, (tableau 12), mais ces valeurs restent dans l'intervalle des limites de rejets et se situent dans la fourchette des normes marocaines de qualité des eaux destinées à l'irrigation (S, E, E, E, 2007).

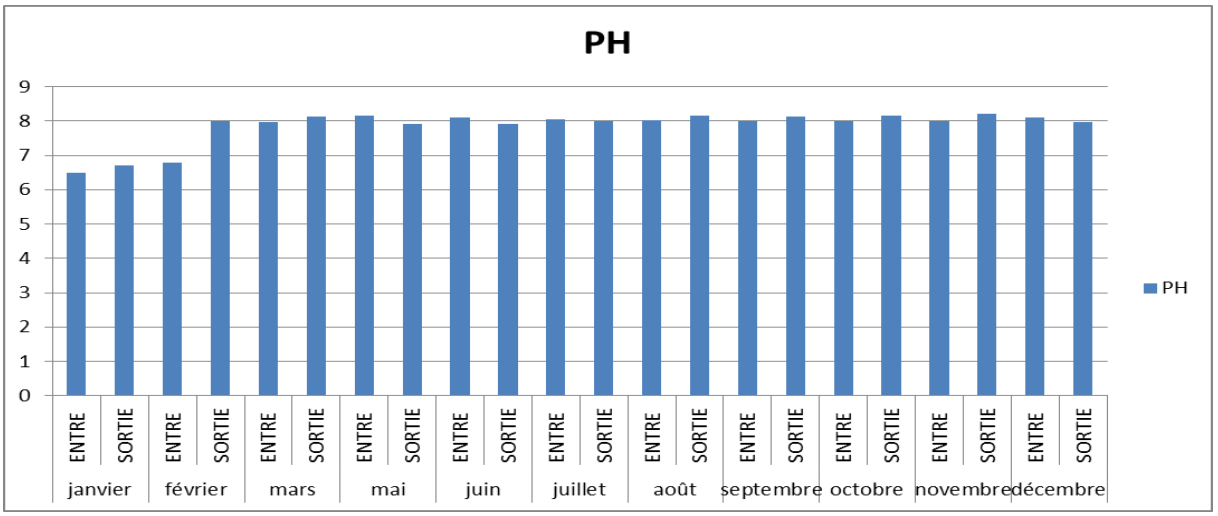


Figure 12: Variation des valeurs moyennes de pH à l'entrée et la sortie de la station

II- 3 demande chimique en oxygène

Les résultats des analyses de la DCO à l'entrée et à la sortie de la STEP durant l'année 2020 Sont représentés dans la figure 13.

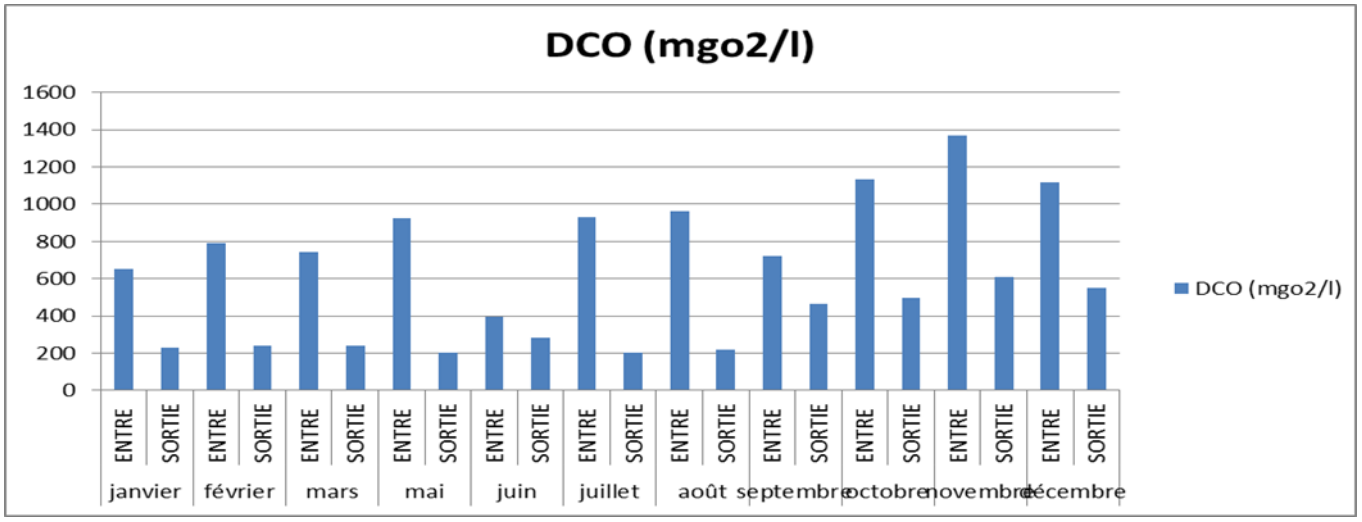


Figure 13: Variation des valeurs moyennes des DCO à l'entrée et la sortie de la station

La demande chimique en oxygène permet d'évaluer la concentration en matières organiques dissoutes ou en suspension dans l'eau, à travers la quantité d'oxygène nécessaire à leur oxydation chimique totale (J. RODIER, 2009)., Les valeurs à la sortie varient entre 202 mg/L et 608 mg/l avec une moyenne de 339,32 mg/L, ces valeurs à la sortie de la STEP sont inférieures à celles trouvées à la STEP de la ville Dar El Gueddari,Maroc (AYYACH et al.,2016) du mois de Janvier au mois d'Aout mais ces valeurs de la DCO du mois de septembre au mois de décembre sont supérieures à celles de la sortie des STEP de la ville Dar El Gueddari.

En utilisant les résultats du Tableau 17 le rapport DCO/DBO5 pour les eaux usées à la sortie de la STEP est inférieur à 3 (DCO/DBO5<3) indiquant que les effluents sont biodégradables pour les mois Mai, Juin, Juillet et Aout. Alors que le rapport DCO/DBO5 est supérieur à 3 pour les mois d'octobre au mois de décembre, et donc leur biodégradabilité est difficile. Ceci est dû à la nature de l'effluent issue de l'activité des petites unités industrielles connectées au réseau d'assainissement et aussi à une baisse de la température. Ces valeurs nous montrent un abattement moyen des bassins aérés vis-à-vis de la pollution carbonée, qui atteint une valeur moyenne annuelle de 61,62% (tableau 17) qui est inférieure à celle trouvée en 2013 (chaouki ,H et al .,2014) ,qui est de 83%. Mais, ces valeurs de la DCO des eaux épurées enregistrées restent conformes aux valeurs limites de rejet des eaux superficielles ou profondes du Maroc.

II- 4 La demande biochimique en oxygène :

Les résultats des analyses de la DBO5 à l'entrée et à la sortie de la STEP durant le l'année 2020 sont représentées dans la figure 14

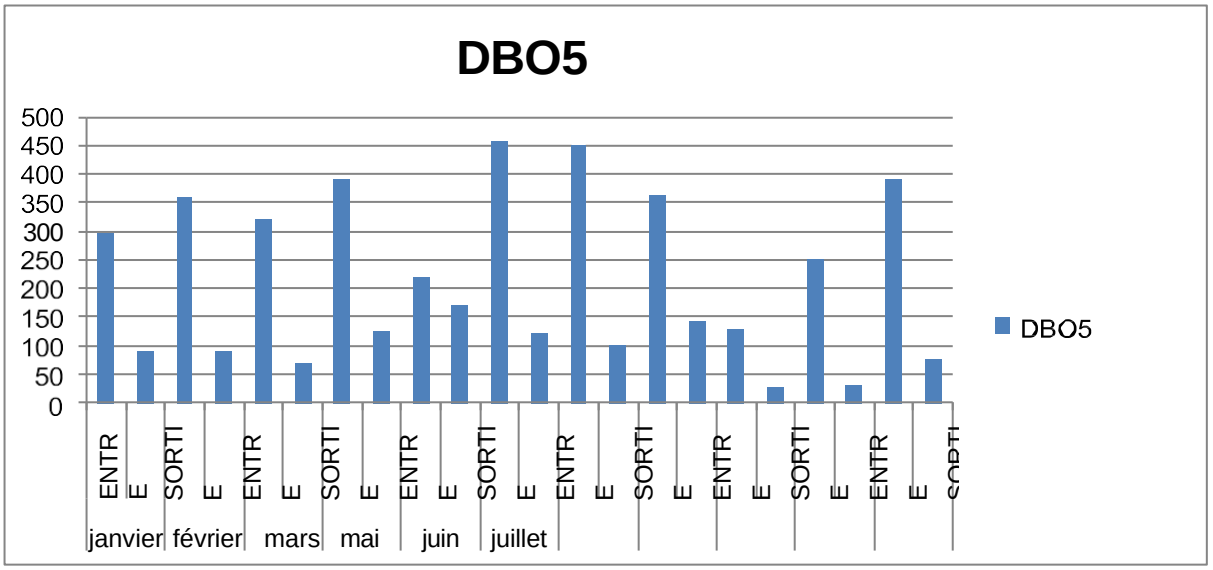


Figure 14: Variation des valeurs moyennes de la DBO_5 à l'entrée et à la sortie de la station

La demande biochimique en oxygène est la quantité d'oxygène utilisée pour la dégradation des matières organiques décomposables et biodégradables par des processus biochimiques (RODIER, 2009). Les valeurs moyennes à la sortie varient entre 25 mg/L et 171 mg/l avec une moyenne de 94,45 mg/l (tableau 16). Ces valeurs à la sortie nous renseignent sur le meilleur abattement des bassins aérés vis-à-vis de la pollution carbonée et dont les abattements peuvent atteindre 71,43%, (tableau 16) d'une part, et qui restent inférieurs aux valeurs trouvées dans la même station en 2014 (chaouki,H et al .,2014). D'autre part, ces valeurs enregistrées de la DBO_5 à la sortie sont conformes aux valeurs limites de rejet des eaux de surface ou souterraines marocaine.

II- 5 Les matières en suspension

Les résultats des analyses des matières en suspension à l'entrée et à la sortie de la STEP durant l'année 2020 sont représentés dans la figure 15.

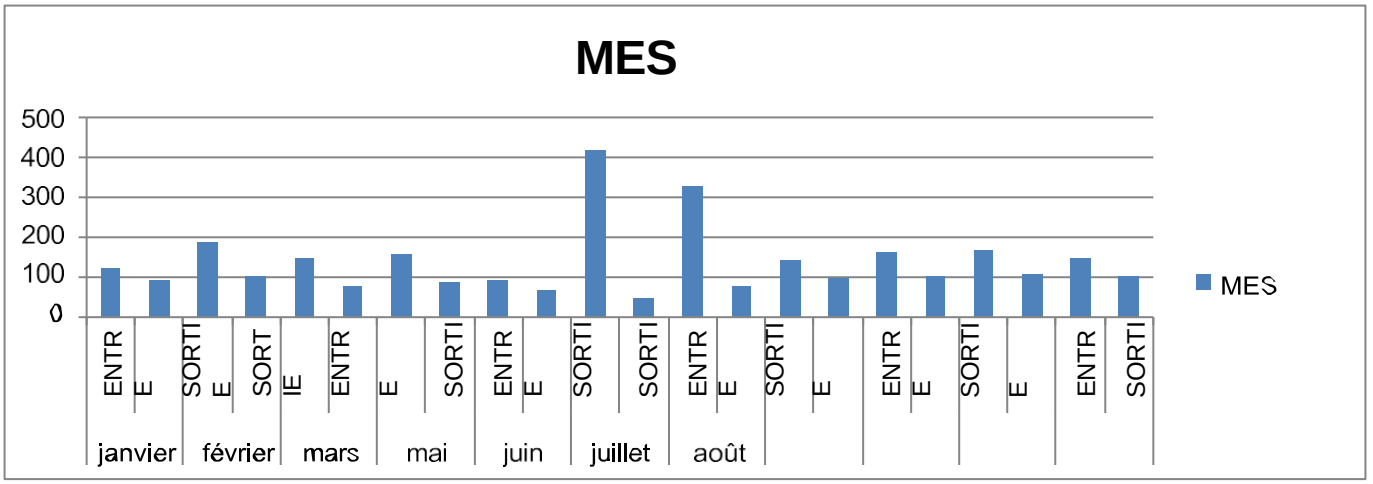


Figure 15: Variation des valeurs moyennes des MES à l'entrée et à la sortie de la station

L'ensemble des particules minérales et organiques contenues dans les eaux usées, représentent les matières en suspension ainsi la connaissance de la concentration des éléments colloïdaux dans les eaux usées est importante pour évaluer l'effet de la pollution sur l'écosystème aquatique. La quantité de la matière en suspension à la sortie de la STEP varie entre 47 mg/L et 105 mg/L, avec une moyenne de 86.78mg/L (Tableau 16). Ces valeurs de MES à la sortie de la STEP répondent aux valeurs limites de rejet général des eaux superficielles ou souterraines marocaines. Ainsi ces valeurs à la sortie de la STEP nous renseignent sur un abattement des bassins aérés vis-à-vis de la pollution et dont les valeurs peuvent atteindre 53,42 %, (tableau 17) qui restent inférieures aux valeurs trouvées dans la même station en 2014 (Chaouki .H et al., 2014).

II- 6 Les paramètres métalliques

Les analyses des métaux lourds des eaux usées épurées de la STEP de la ville d'Errachidia sont réalisées durant les mois d'octobre 2020 et février 2021. Ces valeurs sont négligeables (tableau 18) et ne dépassent pas ceux de la norme marocaine de qualité des eaux destinée à l'irrigation (S.E.E.E, 2007)).

Tableau 18 : La teneur en métaux lourds dans les eaux épurées de la STEP

Paramètres (mg/l)	Octobre	février	valeurs Limites d'irrigation (mg/l)
Ag (mg/l)	<0,02	<0,01	0,1
Al (mg/l)	<0,01	<0,01	5
Cd (mg/l)	0,045	<0,01	0,01
Co (mg/l)	<0,02	<0,01	/
Cr (mg/l)	0,054	<0,01	0,1
Cu (mg/l)	<0,02	<0,01	0,2
Pb (mg/l)	<0,02	<0,01	5

Les résultats des analyses physico-chimiques effectuées ont montrés que les eaux usées de la STEP de la ville d'Errachidia présentent de faibles concentrations en métaux lourds pour les eaux épurées, ce qui justifie le caractère domestique des eaux usées de la ville. Ainsi le traitement par lagunage aéré des eaux usées brutes de la STEP abouti à des eaux épurées conforme à la norme Marocaine de rejet (valeur limite de rejet des eaux de surface ou de porfeondeur,2018), et au norme de réutilisation des eaux usées épurées en irrigation (Norme Marocain de qualité des eaux destinées à l'irrigation,S.E.E.E,2007).

II-7 Les paramètres azotés

Les résultats d'analyses des paramètres azotés sont illustrés dans le tableau 19.

Tableau 19 : Résultats d'analyses des paramètres moyens azotés durant les cinq mois de suivi à la sortie de la STEP d'Errachidia

Paramètres	**Température**	**NH_4^+ (mg/l)**	**NO_2^- (mg/L)**	**NO_3^- (mg/L)**	**Abattement NH_4^+, NO_2^-et NO_3^- en %**		
Janvier	10	0,619	0,785	*0,054*	*61,9*	*35,65*	*78,98*
Février	17	3,978	0,867	0,158	10,56	56,27	89,12
Mars	19	1,037	0,472	0,11	72,25	66,8	82,64
Avril	25	0,19	0,807	0,0887	51,03	17,48	57,76
Mai	26	0,33	0,327	0,035	67,22	67,55	85,53
Moyenne	19,4	1,11	0,76	0,089	52,56	48,75	78,80

La concentration des ions NH_4^+ durant les cinq mois de suivi varie entre un maximum de 3,978 mg/l observée au mois de Février et un minimum de 0,19 mg/l observée au mois d'Avril (tableau 19). Ces résultats peuvent être expliqués par plusieurs conditions à savoir :

- ✓ La charge azotée de l'effluent brut
- ✓ Le taux d'aération
- ✓ La température

L'élimination de la concentration des NH_4^+ en nitrite NO_2^- et en nitrate NO_3^- en présence d'oxygène (O2) est la nitrification. La population bactérienne impliquée est autotrophe et le déroulement de l'oxydation est résumé par la réaction chimique donnée ci-dessous.

$$NH_4^+ + 2O_2 \longrightarrow NO_3^- + 2H^+ + H_2O$$

La gamme des températures favorable à la nitrification est large. La limite inferieure est de 5°C (JONES Ronald et al,,1980, P.SERVAIS et al.,1992). Alors que la limite supérieure se situe entre 40°c et 45°c (HENZE ,1991). Les microorganismes nitrifiants présentent une température optimale qui se situe entre 25°c et 36°c (GROENEWEG et al, 1994).La valeur de

La température au cours des cinq mois d'étude varie entre 10 C° et 26C° à la sortie de la STEP (tableau 19).Ainsi l'aération effectuée par les aérateurs permet à la population bactérienne aérobie de transformer l'azote organique en ammonium qui par la suite sera nitrifié/oxydé et transformé en nitrite et ensuite en nitrate. En effet, dans les bassins de la STEP, l'élimination de l'azote se fait souvent sous forme gazeuse par des réactions de nitrification et qui nécessite un apport important d'oxygène pour les bactéries aérobies (S. Hebabaze et al ,2014). Les conditions d'aération du bassin biologique sont favorables à la croissance des bactéries comme Nitrosomonas et Nitrobacter ce qui favorise le processus de nitrification (A. Cébron et al .,2014, E.Trouve et al .,1994).

II-6 Les Nitrites

Les résultats d'élimination des ions nitrites pour les eaux usées épurées de la STEP d'après le (tableau 19) montrent que pour les eaux traitées, la valeur la plus élevée des $NO2^-$ est de 1,037 mg/l où la température est de 19°C en Mars et un minimum de 0,327 mg/l où la température est de 26 C° en mois de Mai. D'où l'effet important de la température sur la multiplication bactérienne comme *Nitrobacter* et *Nitrosomonas* qui transforment l'ammonium en nitrite. Ces valeurs des NO_2^- pour les eaux épurées restent inférieures à celles trouvées à la Ville D'ouargla en Algérie (OUNOKI et al.,2014).

12 Les Nitrates

Pour les nitrates, qui constituent la forme d'azote la plus dominante dans les eaux épurées et d'après (le tableau 19) les concentrations varient selon les mois, pour les eaux traitées et la concentration la plus élevée est de 0,15 mg /l où la température est de 18°C enregistrée en février et un minimum de 0,035 mg/l où la température est de 26 C° au mois de Mai (tableau 19).D'où l'effet positif de la température sur la réduction azotée ainsi ces résultats des NO_3^- dans les eaux épurées qui restent encore inférieurs à ceux trouvés dans les travaux de (P.SERVAIS et al 1992) .Ces teneurs en nitrates des eaux épurées (tableau 19) restent inférieurs à la valeur limite marocaine,(S.E.E.E, 2007).

13 Les germes fécaux

Les résultats de la concentration des germes recherchés dans les eaux uses brutes (entrée STEP) et épurées (sortie STEP) avec leurs taux d'abattement sont illustrés dans le tableau 20.

Tableau 20: Valeurs moyennes des coliformes totaux; fécaux et streptocoques fécaux des eaux usées à l'entrée et la sortie de la station d'épuration d'Errachidia avec les taux d'abattements pendant l'année 2020

mois		coliforme totaux (UFC/100ml)	coliforme fécaux (UFC/100ml)	streptocoque fécaux (UFC/100ml)
Janvier	Entrée	1400	1200	1900
	Sortie	91	36	130
Taux d'abattement (en %)		93,5	97	93,15
Février	Entrée	95	44	89
	Sortie	63	23	36
Taux d'abattement (en %)		33,68	44,72	59,55
Mars	Entrée	1400	950	280
	Sortie	360	130	180
Taux d'abattement (en %)		74,28	86,31	35,71
Mai	Entrée	78	30	91
	Sortie	28	18	20
Taux d'abattement (en %)		**64,10**	40	79,02
Juin	Entrée	150	73	190

	Sortie	120	52	110
Taux d'abattement (en %)		20	28,76	42,10
Juillet	Entrée	93	30	78
	Sortie	40	16	23
Taux d'abattement (en %)		**56,98**	46,66	70,51
Aout	Entrée	14000	980	25
	Sortie	1200	820	5
Taux d'abattement (en %)		**91,42**	16,32	80
Septembre	Entrée	23600	1160	0
	Sortie	8900	180	0
Taux d'abattement (en %)		**62,28**	84,48	0
Octobre	Entrée	81500	3593	6300
	Sortie	1820	1340	0
Taux d'abattement (en %)		97,76	62,70	100
Novembre	Entrée	74000	14800	0
	Sortie	1350	310	0
Taux d'abattement (en %)		98,17	97,90	0
Décembre	Entrée	433000	64000	3100

	Sortie 17800	3700	0
Taux d'abattement (en %)	95,88	94,21	100
Moyenne	Entrée 57210	7896	1095
	Sortie 2888	602	45
Moyenne Taux d'abattement (en %)	71,64	63,55	42,00

D'après le Tableau 20 nous remarquons que les coliformes totaux à la sortie de la station varient entre 28 et 17800 UFC/100 ml, alors que les coliformes fécaux varient entre 16 et 3700 UFC/100 ml avec une moyenne de 602 UFC/100 ml, et les streptocoques fécaux varient entre 5 et180 UFC/100ml, avec une moyenne de 45UFC /100ml. Ces valeurs sont comparables à celles trouvées dans la station d'épuration de la ville d'Agadir (Maroc) pour les eaux usées filtrées (CF) et (SF) (Mansir I.et al., 2021) et ne dépassent pas la norme marocaine des eaux destinées à l'irrigation , ce qui nous permet de déduire aussi que le traitement effectué dans les bassins de finition engendre des rendements inférieurs aux valeurs exigées par les normes de l'OMS et Marocaine NMEI (SEEE-2007) qui doivent être inférieures à 1000 UFC/100 ml.aissi

1. Les coliformes totaux

D'après le tableau 20 nous avons remarqué que les coliformes totaux à la sortie de la station varient entre 17800 et 28 UFC/100 ml, avec une moyenne de 2888 UFC /100ml et ces valeurs sont supérieures à celles trouvées dans la même STEP en 2013 (chaouki.H et al .,2014), mais avec un taux d'abattement de 71,64 %, ce qui nous a permis de déduire que le traitement adopté par les bassins de finition engendre des valeurs acceptables.

14 Les coliformes fécaux (CF)

D'après le tableau 20 nous avons remarqué que les coliformes fécaux à la sortie de la station varient entre 3700 et 16 UFC/100 ml avec une moyenne de 680 UFC/100 ml et un taux d'abattement moyen de 63,55%,5 (tableau 20) Ces valeurs sont comparables à celles trouvées dans la station d'épuration de la ville d'Agadir (Maroc) pour les eaux usées filtrées (Mansir I

et al. , 2021) et ne dépassent pas la norme marocaine des eaux destinées à l'irrigation , mais ces valeurs sont supérieures à celles trouvées dans la même STEP en 2013 (Chaouki H. et al ., 2014),ce qui nous permet de déduire aussi que le traitement effectué dans les bassins de finition engendre des concentrations inférieures aux valeurs exigées par les normes de l'OMS et Marocaine. Ce qui nous permet de déduire que le traitement adopté par les bassins de finition permet d'éliminer au maximum les CF qui restent inférieurs à ceux de la norme (1000 UFC/100 ml) , **(S.E.E.E, (2007).**

15 Les streptocoques fécaux

D'après le tableau 20, à la sortie de la station les streptocoques fécaux varient entre 5 et 180 UFC/100ml,avec une moyenne de 46 UFC /100ml et un taux d'abattement moyen de 42 %, Ces valeurs sont comparables à celles trouvées dans la station d'épuration de la ville d'Agadir (Maroc) pour les eaux usées purifiées;(Mansir I et al., 2021) et ne dépassent pas la norme marocaine des eaux destinées à l'irrigation.Ce qui nous a permis de déduire aussi que le traitement effectué dans les bassins de finition engendre des concentrations inférieures à celles exigées par les normes de l'OMS et Marocaine NMEDI (SEEE-2007).Donc les bassins de stabilisation participent au traitements éfficaces des eaux usées par la réduction des matiéres organiques ,des nutriments et des agents pathogénes, (.Mara,D.D.,&Pearson,H,W .2019).ainsi le taux d'abattement nul des streptocoques fécaux au mois de septembre et nouvembre peut etre dus à plusieurs causes ,tel que l'insufisence du processus de traitement comme un temps de séjour hydraulique insuffisant ,conditions d'aeration ineffcaces et manque d'exposition au rayons UV naturels en plus de la qualité des eaux brutes tel que une charge initiale élevée et des apports ponctuels massifs.

16 Conclusion

L'évaluation des paramètres physico-chimiques et bactériologiques des eaux usées de la station d'épuration d'Errachidia au cours de l'année 2020 montre que Les tauxd'abattement avec le lagunage aéré ont atteint des valeurs moyennes de 71,43%, 61,62% et 53,42% respectivement pour la DBO5, la DCO et les MES (tableau 17) et restent inférieures à celles trouvées en 2014 pour la même station (82%, 83% et 88%) (chaouki,H et al.,2014). Quant aux germes indicateurs de contamination fécale leurs taux d'abattements sont de 71,64% pour les coliformes totaux ; 63,55%s pour les coliformes fécaux et de 42,00% pour les streptocoques fécaux (tableau 20) . La qualité des eaux épurées de la station est conforme aux valeurs limites générales de rejet des eaux superficielles et souterraines Marocaine. Ces valeurs montrent une bonne performance épuratoire de la STEP, grâce à l'efficacité des bassins de

maturation qui ont pour rôle l'élimination et la réduction des microorganismes et au bon dimensionnement des bassins d'aération et l'adaptation des micro-organismes à la dégradation de la matière organique. De ce fait, la qualité des eaux épurées permet leur réutilisation en agriculture (Catégorie A) selon le tableau de classement des eaux épurées

Destinées à l'irrigation NMEDI. Aussi, ce travail avait pour objectif l'évaluation de la pollution métallique et des polluants organiques azotés dans les eaux usées de la ville d'Errachidia. Ainsi, les résultats des analyses physico-chimiques effectuées ont montré que les eaux usées de la STEP de la ville d'Errachidia présentent de faibles concentrations en métaux lourds dans les eaux usées brutes, (tableau 12), ce qui justifie le caractère domestique des eaux usées de la ville. Le traitement par lagunage aéré des eaux usées brutes de la STEP aboutit à des eaux épurées conforment à la norme Marocaine de rejet, et à la norme de réutilisation des eaux usées épurées en irrigation, (tableau 18).

.

Chapitre 3 : Réutilisation des eaux usées traitées de la station d'épuration de la ville d'Errachidia en agriculture: risque sanitaire

I. Introduction

Les changements climatiques sont caractérisés ces dernières années par l'augmentation de la température moyenne et par une raretée de pluie, et ont pour conséquence la dégradation de la qualité de l'eau (Nicolas et al.,2015).

Des mesures d'adaptation qui peuvent aider à réduire la pression sur les ressources en eau conventionnelles (eaux de surface ou eau souterraines), comprennent le recyclage, le dessalement et la réutilisation des eaux usées (Iglesias et Garrote, 2015).

L'irrigation des cultures avec les eaux usées traitées, mal traitées, diluées et même brutes est une pratique répondue dans les zones urbaines et périurbaines dans la plupart des pays en développement (Gemmel et Schmidt, 2010 ; Ncola et al. 2015, Gatto D'Andrea et al . 2015) . Ces eaux usées constituent une ressource importante et possèdent un pouvoir fertilisant mais aussi leur disponibilité (Gemmell et Schmidt, 2010; Arborea et al., 2017). Cependant, ces eaux usées sont employées généralement sans traitement préalable ou avec un traitement partiel dans les pays en développement favorisant ainsi une contamination des légumes. En effet, les eaux usées contiennent de nombreux polluants tels que les matières en suspension,les microorganismes pathogènes et une variété de produits chimiques comme les métaux lourds, les détergents et les pesticides. Ce qui peut rendre ces eaux inutiles pour l'irrigation (Khan et al., 2013; Gatto D'Andrea et al., 2015), Ainsi le risque lié à l'utilisation des eaux usées urbaines a été évalué par plusieurs auteurs en agriculture (Howord et al., 2003 Keraita et al., 2003 ; Keraita and Drechsel 2004 ; Faruqui et al. 2004; Amoah et al., 2006, 2007). Notre travail a pour objectif l'évaluation d'un risque sanitaire, par l'analyse bactériologique des CF ; CT ; SF ; *Escherichia coli* et *Salmonella* au niveau des légumes tels que la courgette et la laitue aprés l'irrigation avec les eaux usées épurées de la STEP de la ville d'Errachidia , et vérifier s'il existe un danger pour les consommateurs de la courgette et la laitue qui consomment à l'état cru.

II. Résultats et discussion

1. Analyses physico-chimiques des eaux d'irrigation de la STEP de la ville d'Errachidia

La caractérisation physicochimique des eaux usées épurées de la STEP d'Errachidia a été réalisée du mois de janvier au mois de Juin 2020. (Figures 16, 17, 18, 19 , 20 et 21).

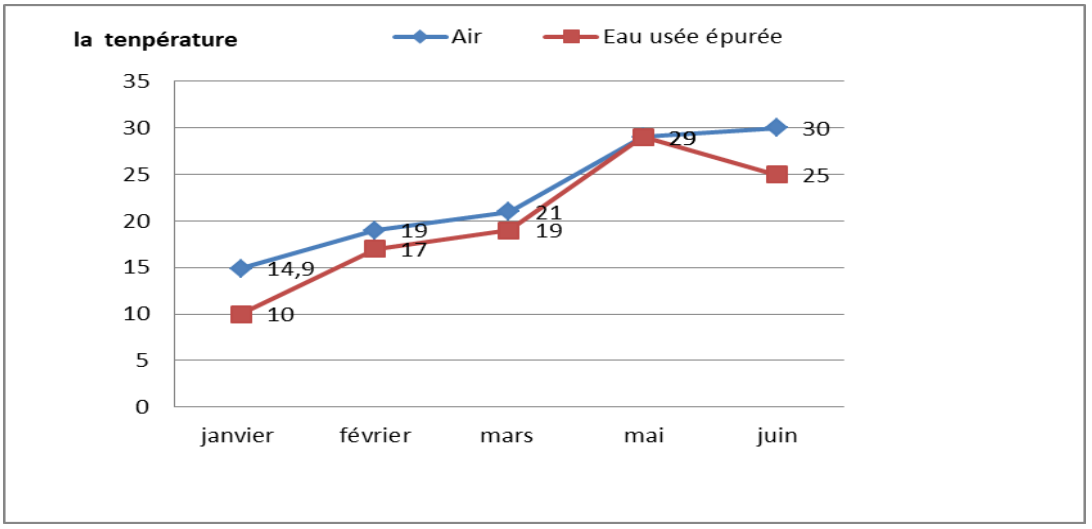


Figure 16: Variation des valeurs moyennes des températures pendant les mois de janvier au mois de juin de l'année 2020

la température (T°C) des eaux usées épurées (Fig.16) présentent une évolution saisonnière qui suit celle de la température de l'air, élevée pendant l'été (30°C) et doux pendant l'hiver (14,5 °C) .Ces valeurs de température sont inférieures à celles trouvées pour les eaux usées d'irrigation à la saison pluviale et sèche dans le plus grand périmètre maraîcher de la ville de Parakou au Nord-Est du Bénin (Innocent DJEGBE1et al., 2018)

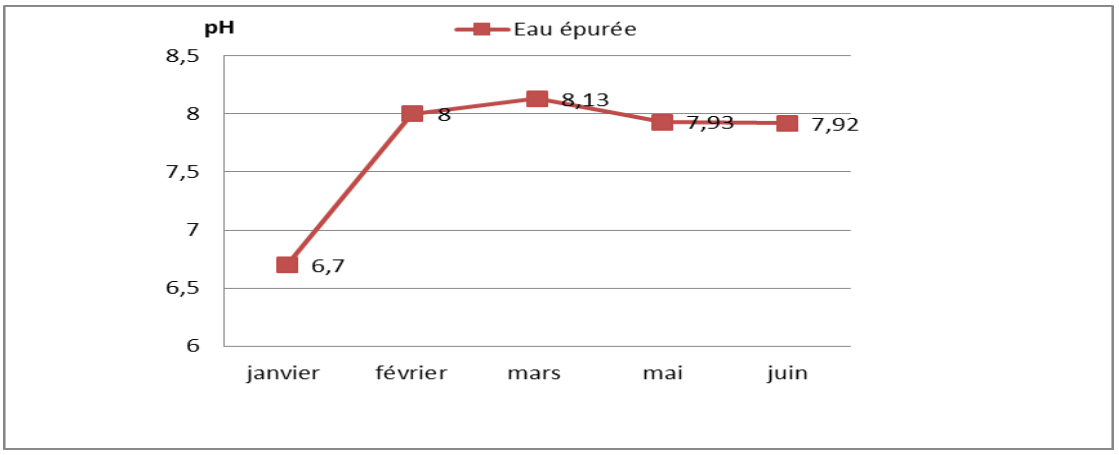


Figure 17: Variation des valeurs moyennes du pH pendant les mois de janvier au mois de juin de l'année 2020

Pour le pH (Fig. 17), aucune variation significative de ce paramètre n'a été relevée (pH relativement neutre). La valeur moyenne du pH des eaux du site d'étude (pH= 7,73) est une valeur acceptable pour l'irrigation à cause de sa neutralité en tenant compte des normes Marocaines de qualité des eaux destinées à l'irrigation (SEEE, 2007).

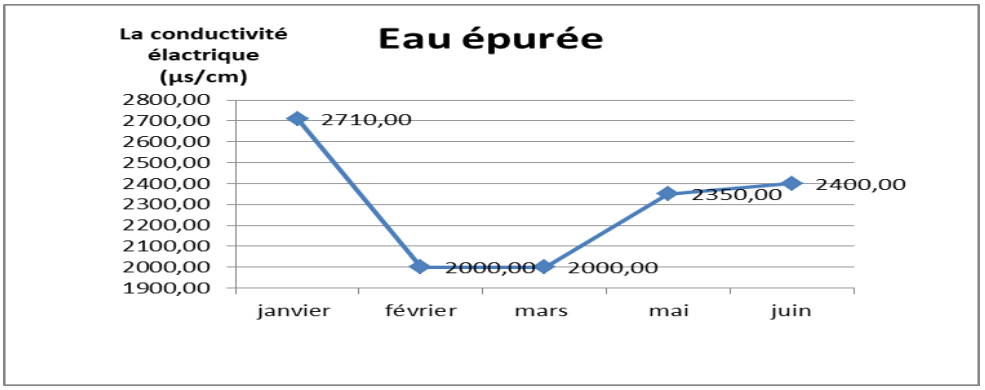


Figure 18: Variation des valeurs moyennes de la conductivité électrique pendant les mois de janvier au mois de juin de l'année 2020

La conductivité électrique des eaux usées d'irrigation suit à son tour l'évolution saisonnière (Fig. 18). Les maxima ont été enregistrés (2710 µs/cm) pendant le mois de janvier et (2400 µs/cm) pendant le mois de juin et les minima pendant les mois Mars et Mai (2000 µs /cm, 2400 µs/cm, cette augmentation significative de conductivité électrique dans les eaux traitées est généralement attribuée à une concentration accrue en sels dissous notament les ions sodium (Na+) chlorure(cl-),calcium (ca^{2}+),magnésium (Mg^{2}+) et sulfate (so_4^{2-}) . ces ions proviennent de divers sources telles que les détergents ,les rejets industriels et les apports domestiques .Selon Rodier (1996).la conductivité électrique de l'eau varie en fonction de la température et est étroitement liée à la concentration des substances dissoutes et à leurs natures. Ces valeurs sont supérieures à celles trouvées pour les eaux usées d'irrigation à la saison pluviale et sèche dans le plus grand périmètre maraîcher de la ville de Parakou au Nord-Est du Bénin (Innocent DJEGBE1et al., 2018).

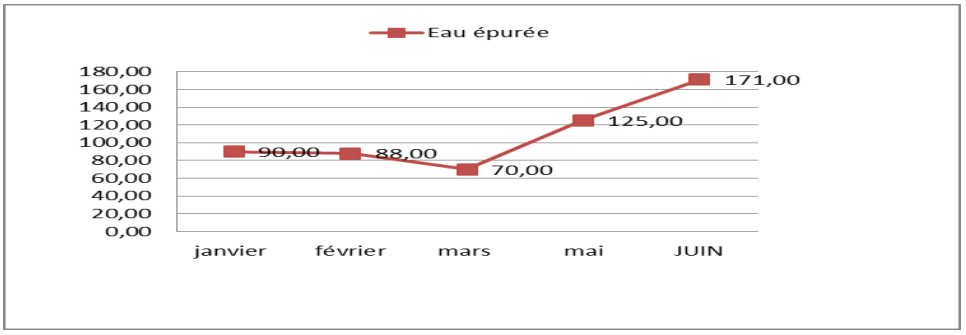


Figure 19: Variation des valeurs moyennes de la DBO5 en mg/l pendant les mois de janvier au mois de juin de l'année 2020

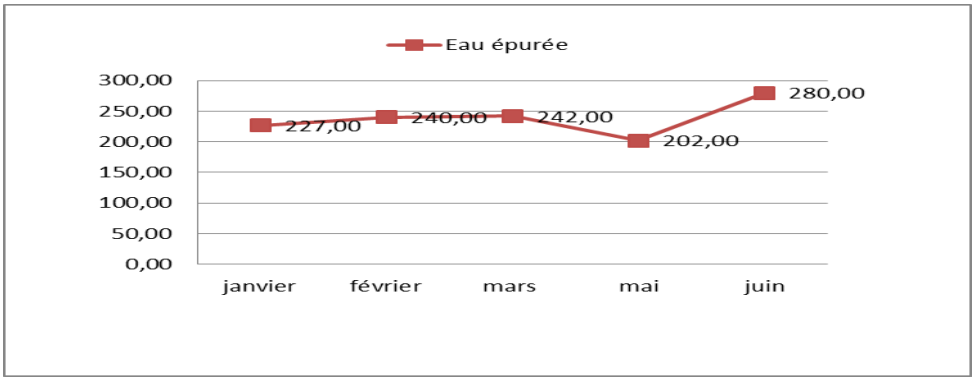


Figure 20 : Variation des valeurs moyennes de la DCO en mg/l pendant les mois de janvier au mois de juin de l'année 2020

La charge organique apportée par les eaux usées épurées d'irrigation est représentée par la DCO et la DBO5. L'évolution de la DCO est plus au moins parallèle à celle de la DBO5 et suit un régime saisonnier (Figures. 19 et 20).Les valeurs minimales de la DCO (202 mg d'O2/l) sont supérieures à celles trouvées dans les eaux usées d'irrigation des cultures maraîchères à Dschang, Ouest-Cameroun .Ainsi la valeur minimale de la DBO5 (70 mg d'O2/l) est supérieure à celles trouvées au sud-est du Cameroun (Honorine NTANGMO TSAFACK et al.,2019). Les faibles teneurs en DCO sont enregistrées du mois de janvier au mois de mai (fig20) et de Janvier au mois de Mars pour la DBO5 (fig. 19).Celles - ci sont dues sans doute à une dilution par les eaux de pluie mixte. Mais les fortes teneurs en matière organique enregistrées pendant le mois de juin pourraient être expliquées par l'absence de pluie et une augmentation de la température de l'eau et de l'air, ce qui permet un apport de matières organiques dans l'eau d'irrigation.

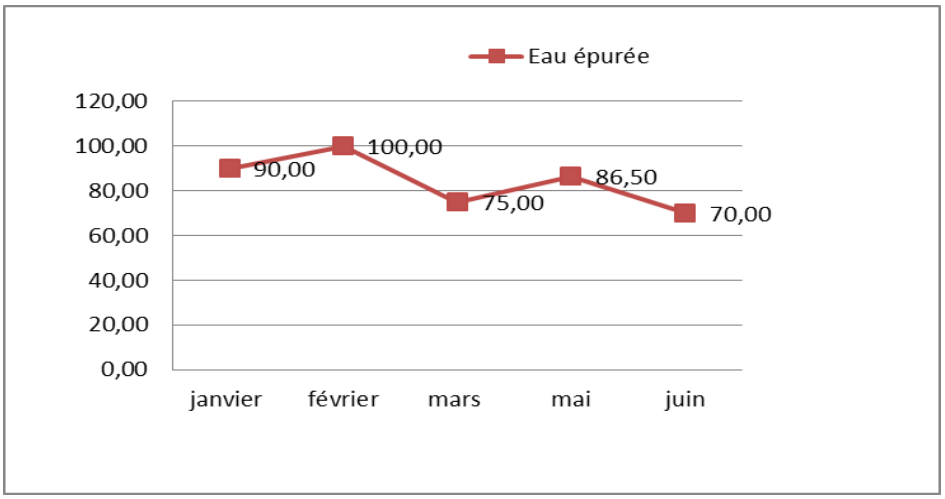


Figure 21: Variation des valeurs moyennes des MES en mg/l pendant les mois de janvier au mois de juin de l'année 2020

Ces valeurs de MES à la sortie de la STEP répondent aux valeurs limites de rejet général des eaux superficielles ou souterraines marocaines. Ainsi ces valeurs à la sortie de la STEP nous renseignent sur un abattement des bassins aérés vis-à-vis de la pollution et dont les valeurs peuvent atteindre 53,42 %, (tableau 17).

Les résultats de l'analyse en composantes principales sont présentés dans la figure 22 Les résultats obtenus ont été présentés en deux composantes avec une variance estimée à 99,37 %.. De plus, le mois de juin a été caractérisé par une DCO et une DBO5 plus élevées. En revanche, le pH et la température étaient indifférents selon les mois d'échantillonnage.

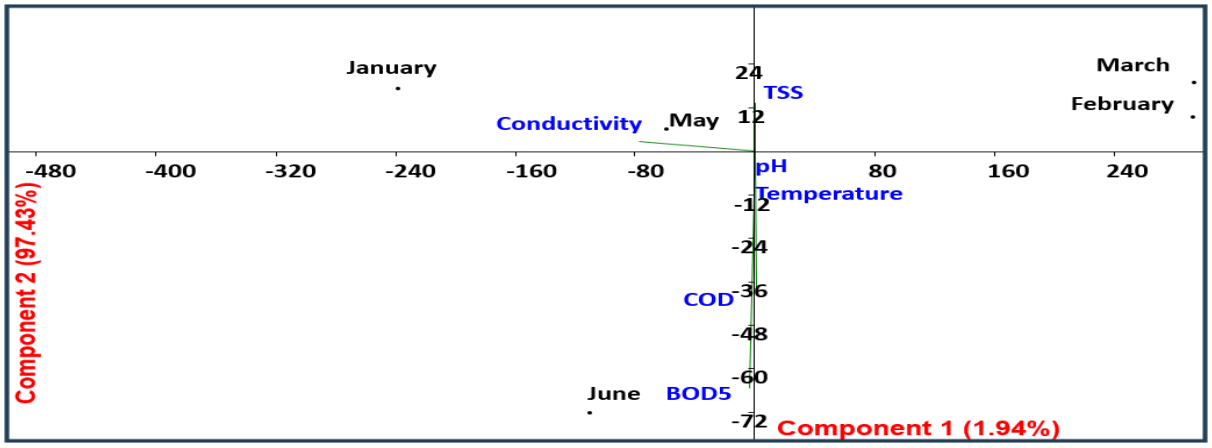


Figure 22: Evolution de (PCA) des paramètres physico-chimiques de janvier à mai des eaux usées des lagunes aérées d'Errachidia

2 -Analyses des indicateurs de contamination fécale dans les eaux d'irrigation de la Laitue et la courgette

La caractérisation bactériologique des eaux usées épurées de la STEP d'Errachidia telle que : les coliformes totaux, les coliformes fécaux et entérocoques intestinaux a été réalisée du mois de Janvier au mois de Juin.

Tableau 21: Valeurs moyennes des coliformes totaux, coliformes fécaux et entérocoques intestinaux des eaux usées épurées à la sortie de la station d'épuration pendant l'année 2020.

mois	coliforme totaux UFC/100ml	coliforme fécaux UFC/100ml	Entérocoque intestinaux UFC/100ml
Janvier	**91**	**36**	**130**
Février	**63**	**23**	**36**
Mars	**360**	**130**	**180**
Mai	**28**	**18**	**20**
Juin	**120**	**52**	**110**
Moyennes (UFC/ml)	**132**	**52**	**95**

La valeur moyenne de l'abondance des coliformes totaux est de l'ordre de 132 UFC/100 ml dans les eaux usées d'irrigation Les coliformes fécaux (CF) viennent en deuxième position avec une moyenne de l'ordre de 52 UFC/100 ml pour les eaux usées traitées (tableau 21). Ces valeurs sont inférieures à celles trouvées dans les eaux usées d'irrigation en saison sèche et en saison pluviale au site maraîcher de Bawéra dans la ville de Parakou au Bénin (Innocent DJEGBE et al 2018). En ce qui concerne le cadre réglementaire de ces eaux pour l'irrigation, on constate que les eaux usées d'irrigation de la laitue et la courgette présentent une charge en coliformes fécaux qui ne dépassent pas la valeur- limite fixée par la norme marocaine des eaux destinées à l'irrigation (S.E.E.E, 2007). Cette norme fixe la valeur limite en CF dans les eaux destinées à l'irrigation des cultures consommées cru à 1000 CF/100 ml. Quant aux entérocoques intestinaux, la valeur moyenne de ces germes est de l'ordre de 95 UFC/100 ml (tableau 21) pour les eaux usées d'irrigation.

3 La qualité bactérienne de la laitue et la courgette irriguées par les eaux usées traitées de la STEP de la ville d'Errachidia

Les résultats de la concentration des germes recherchés dans les 10 échantillons de courgettes analysés sont illustrés dans le tableau 22.

Le tableau 22 illustre la moyenne et l'Ecart-type des résultats de la concentration des germes recherchés dans les 10 échantillons de courgettes analysés et ont été comparées avec les normes marocaines (Tableau 24).

Tableau 22: Concentration des coliformes fécaux, d'E. coli et de Salmonella dans 10 échantillons de courgettes analysés

Recherche / Recensement	**Méthodes**	**Résultats (UFC/g) pour les salmonelles (25 UFC/g)**													
		échantillons	**N1**	**N2**	**N3**	**N4**	**N5**	**N6**	**N7**	**N8**	**N9**	**N10**	Moyenne	Ecart-type	**Norme marocaine**
coliforme fécaux	NM08.0.124	9		8	7	9	6	4	8	9	8	9	7,7	1,636391694	en dessous de100 UFC/g
Escherichia coli	NMISO16649-1	8		7	9	9	8	6	5	4	8	9	7,3	1,766981104	(Annexe a l'arrêté n°293-19 2019) 0 UFC/g
Salmonella	NM ISO 6579-1	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(Annexe a l'arrêté n°293-19 2019) 0 UFC/g
Coliformes Totaux	NM ISO 4832	310		9	640	8	7	6	7	8	9	8	101,2	211,8106072	/
Entérocoques intestinaux	-	210		39	5600	8	7	6	5	9	8	7	589,9	1761,507211	/

Les résultats de la concentration des germes recherchés dans les 17 échantillons de laitues analysés sont illustrés dans le tableau 23.

Le tableau 23 illustre la moyenne et l'Ecart-type des résultats de la concentration des germes recherchés dans les 17 échantillons de laitues analysés et ont été comparées avec les normes marocaines,(Tableau 24).

Tableau 23: Concentration des coliformes fécaux, *d'E. coli* et de Salmonella dans 17 Échantillons de laitues analysés.

Research/ Census	Methods	échantillons	résultats (UFC/g) pour les salmonelles (25 UFC/g)																	Moyenne	Ecart-type	Norme marocaine
			N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12	N13	N14	N15	N16	N17			
coliforme fécaux	NM08.0.124	9		8	7	890	6	8	7	28	9	7	8	137	9	89	5	7	8	73,05882353	213,5402394	en dessous de100 UFC/g
Escherichia coli	NMISO16649-1	9		7	8	5	6	9	7	6	8	4	9	8	6	8	9	7	6	7,176470588	1,5097209	(Annexe a l'arrêté n°293-19 2019) 0 UFC/g
Salmonella	NM ISO 6579-1	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(Annexe a l'arrêté n°293-19 2019) 0 UFC/g
Coliformes Totaux	NM ISO 4832	5700		410	390	600	220	10000	320	1600	31000	8000	576	684	54	51	30	214	350	3541,176471	7700,176961	/
Entérocoques intestinaux	-	11000		580	80	9	150	95000	380	24000	18000	8500	492	466	60	75	73	120	250	9366,747706	23221,47938	/

4 Contamination microbiologique des cultures irriguées

Les résultats des paramètres microbiologiques étudiés sur les cultures irriguées de laitue et de courgette sont présentés dans le tableau 24. Les analyses statistiques ont montré que les paramètres étudiés sont significativement différents par rapport à la norme chez les deux espèces végétales étudiées. Chez la courgette, les résultats des coliformes fécaux sont estimés à 7,7±1,64 UFC/g, ce qui est nettement inférieur aux normes des coliformes fécaux (UFC/g) au Maroc (100 UFC/g). Pour Salmonella, elle est absente, ce qui répond à la norme marocaine (00±00 UFC/g). En revanche, les résultats obtenus estiment E. coli à a une concentration de 7,3 ± 1,77 UFC/g, ce qui est significativement supérieur à la valeur de la Norme Marocaine estimée à 00 ± 00 UFC/g.

Pour la laitue, les résultats sont comparables à ceux de la courgette. Les résultats des coliformes fécaux sont estimés à 73,06±2, ce qui est nettement inférieur aux normes des

coliformes fécaux (UFC/g) au Maroc (100 UFC/g). De même, les résultats de Salmonella sont estimés à 0,00 UFC/g, ce qui est comparable aux normes marocaines (00±00b). En revanche, les résultats obtenus estiment que E. coli enregistre une valeur de 7,18 ± 1,51 UFC/g, ce qui est significativement supérieur à la valeur des standards estimée à 00 ± 00 UFC/g.

La comparaison des paramètres microbiologiques entre les plantes étudiées a été réalisée avec le test T et les résultats sont inclus dans le tableau 24. Les valeurs des coliformes fécaux étaient significativement supérieures dans la laitue par rapport à celles enregistrées dans la courgette.

Tableau 24: Comparaison des paramètres microbiologiques avec les normes chez courgette et la laitue (<* (entre les deux plantes), a>b (entre chaque paramètre et sa Norme) statistiquement différents) .**

Plantes		**Courgette**	**Laitue**
Paramètres	*coliformes fécaux*	7.7±1.64b*	73.06±2.13.54b**
	E. Coli	7.3±1.77a*	7.18±1.51a*
	Salmonella	00±00a*	00±00a*
	Norme coliformes fécaux (UFC/g)	100±1.42a	100 ±2.29a
	Norme d'E.coli (UFC/g)	00±00b	00±00b
	Norme Salmonella (UFC/g)	00±00a	00±00a

L'analyse multi-variée des paramètres microbiens sur les cultures irriguées et les eaux usées est présentée dans la Figure 23. Les résultats de l'analyse des correspondances sont présentés en deux axes avec un pourcentage total de variance estimé à 99,99 %. De plus, les eaux usées traitées étaient caractérisées par des concentrations plus élevées d'entérocoques intestinaux. En plus, les courgettes étaient dominées par des concentrations plus élevées de coliformes totaux. Une concentration plus élevée d'Escherichia coli a été observée dans la laitue. En

revanche, Salmonella. était absente dans toutes les cultures testées. Les coliformes fécaux ont montré des valeurs comparables entre les cultures et les eaux usées.

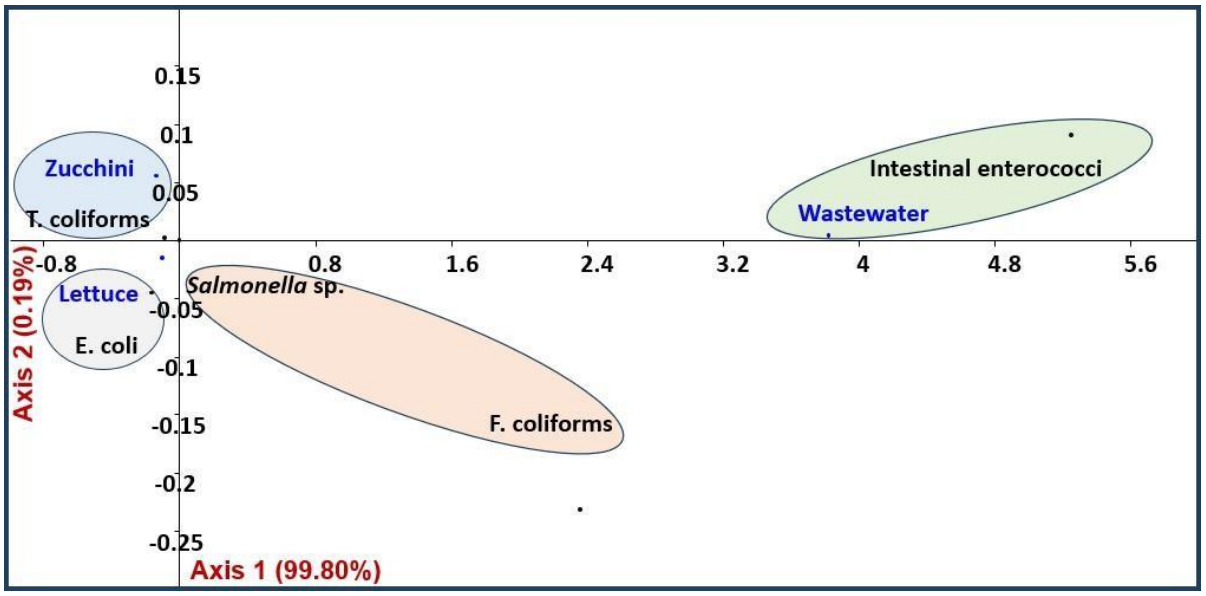


Figure 23: Analyse des correspondances des paramètres microbiens entre les cultures irriguées et les eaux usées

Actuellement, les activités humaines et le changement climatique conduisent à exercer une pression croissante sur les ressources en eau (Guermazi et al., 2019 ; Han et al., 2019). Cette situation est aggravée dans les zones arides où les eaux de surface et souterraines sont rares. Par conséquent, le manque d'eau d'irrigation et l'extension des terres agricoles conduisent à l'utilisation des eaux usées pour l'irrigation des cultures (Ungureanu et al., 2020). Cependant, l'utilisation des eaux usées a entraîné la contamination des cultures et des sols par des produits chimiques, des micro-organismes pathogènes et des métaux lourds (Minhas et al., 2022 ; Obayomi et al., 2020). Il est donc indispensable d'examiner la qualité et les risques sanitaires des eaux usées avant de les réutiliser à des fins d'irrigation. Cette étude vise à analyser la qualité et le risque sanitaire des eaux usées de la station d'épuration d'Errachidia, située au sud-est du Maroc. Nous avons étudié la qualité physico-chimique et les risques sanitaires liés à la contamination bactériologique de leur utilisation pour irriguer deux plantes agronomiques, la courgette et la laitue. Les résultats obtenus ont montré de nouvelles données sur les caractéristiques physico-chimiques et la contamination microbienne des eaux usées testées.

En termes de caractérisation physico-chimique, les eaux usées traitées de la station d'Errachidia ont montré des résultats variables. La température a présenté une évolution

Saisonnière suivant le climat marocain, avec des valeurs plus élevées en été et des températures plus basses en hiver. De même que la conductivité électrique des eaux usées d'irrigation a suivi l'évolution saisonnière.Les valeurs maximales ont été enregistrées en janvier et juin, tandis que les valeurs minimales ont été trouvées en mars et mai. Concernant la matière organique, les faibles niveaux de DCO et de DBO5 ont été enregistrés de janvier à mai pour la DCO et de janvier à mars pour la DBO5. En revanche, le pH est resté stable pendant toutes les saisons. En termes de comparaison, différentes études ont abordé les paramètres physico-chimiques des eaux usées dans les zones d'Afrique du Nord dominées par un climat aride (Ababsa et al., 2020 ; Bourouache et al., 2019 ; Guemmaz et al., 2020 ; Kajeiou et al., 2023 ; Lejri et al., 2022 ; Sai et al., 2023). Ces études ont montré des résultats différents selon les zones d'étude, la nature des eaux usées, les approches de traitement et les conditions environnementales. Par exemple, (Bourouache et al., 2019) ont étudié les propriétés physicochimiques des eaux usées traitées de la station d'épuration de Mzar, dans le sud-ouest du Maroc. Les résultats montrent que les valeurs du pH étaient semi-neutres et stables, tandis que les températures, la conductivité et la matière organique variaient considérablement selon les saisons et les zones d'échantillonnage. Les températures se situaient en moyenne entre 19,1 °C et 20,9 °C, avec une conductivité allant de 2 170 à 3 340 µS/cm. Les concentrations extrêmes de DBO5 étaient respectivement de 1 720 mgO2/L et 11 mgO2/L, en amont et en aval du Mzar. Dans une autre étude, (Kajeiou et al., 2023) ont étudié les paramètres physico-chimiques des eaux usées de la station d'épuration d'Oujda, dans l'est du Maroc, et les possibilités de réutilisation en irrigation. En conséquence, les valeurs du pH étaient statistiquement stables de janvier à août. La température était plus basse en janvier (12,7°C) et plus élevée en juillet (29,69°C). La conductivité électrique était supérieure en février (2 769,5 µS/cm) et inférieure en avril (2 224,5 µS/cm). Les concentrations de DBO5 des eaux usées brutes vont de 450 mg à 568 mg d'O2/l, avec une moyenne de 511 mg d'O2/l. La valeur DCO typique des eaux usées brutes varie de 739 mg d'O2/l à 868 mg d'O2/l, avec une moyenne de 799 mg. En Algérie, (Anwar et al., 2021) ont évalué les propriétés physico-chimiques des eaux usées de la station d'épuration de Tlemcen, située au nord-ouest de l'Algérie. Selon les données, en fonction de la saison algérienne, le pH variait de 7,2 à 8,15 et la température de 9 ° C à 30 ° C. De plus, les niveaux de DCO variaient de 11 à 82 mg/l, tandis que les valeurs de DBO5 variaient de 5,50 à 66,80 mg/l. Dans notre cas, la variation de température est directement liée au climat de l'air à Errachidia, puisque la température plus élevée des eaux usées a été enregistrée en été. De plus, la variation de la DCO et de la DBO5 est très probablement liée au type de rejet qui arrive à la STEP ainsi qu'à la mauvaise qualité

de l'eau riche en polluants et composés organiques, comme le rapportent de nombreux auteurs aux mêmes endroits (Anwar et al., 2021 ; Bouzidane et al., 2023 ; Hajji et al., 2021).

Cette étude a évalué le risque sanitaire des eaux usées dans les stations d'épuration après l'irrigation de la laitue et des courgettes avec de l'eau traitée. En détail. Nous avons évalué la contamination microbienne des deux plantes après leur irrigation avec les eaux usées traitées de la STEP d'Errachidia. La concentration en coliformes totaux était supérieure à celle des coliformes fécaux dans les eaux usées de la STEP d'Errachidia. Actuellement, de nombreuses études ont abordé le risque microbien dans les eaux usées de différents types de stations d'épuration au Maroc, en Algérie et en Tunisie (Belloulid et al., 2019 ; Gharbi-Khelifi et al., 2023 ; Guemmaz et al., 2020 ; Hajji et coll., 2021). Ces études ont montré des résultats différents par rapport à ceux de notre étude. En Algérie, (Guemmaz et al. 2020) ont évalué la qualité bactériologique des ressources en eaux de surface ayant reçu des effluents d'eaux usées courantes dans les oueds de Biskra, les zones arides du nord-est de l'Algérie. Les résultats acquis ont indiqué l'importante charge de contamination des familles bactériennes examinées : coliformes fécaux de 457 à 6.100 CFU/100 mL), 56.917 à 76.167 CFU/100 mL de coliformes totaux, 1.432 à 5.217 CFU/100 mL de streptocoques fécaux et les clostridium sulfitoréducteurs, de 886 à 5,217 CFU/100 mL. Ces résultats sont supérieurs à nos résultats et dépassent les normes de l'OMS. (Gharbi-Khelifi et al., 2023) ont étudié la qualité microbiologique des eaux usées traitées en Tunisie en utilisant des argiles brutes et chimiquement modifiées de la région de Sidi Bouzid. Les résultats ont indiqué que les quantités de bactéries entériques variaient de 1381 à 1,4 10^8 UFC/100 mL. Tandis que la concentration de champignons variait de 1331 à 1,781 10^4 CFU/100 mL. Ces valeurs sont supérieures par rapport à nos résultats. Dans une autre étude (Kajeiou et al., 2023) a examiné la caractérisation biologique de l'installation de traitement des eaux usées d'Oujda (Maroc oriental) et le potentiel de réutilisation en irrigation. Dans les résultats, la pollution fécale a été estimée à 3,2 10^7 à l'entrée de la station et 4,4 x 10^3 à la sortie de la STEP.

L'aspect le plus pertinent dans notre étude est l'analyse microbienne après l'irrigation des laitues et des courgettes avec les eaux usées traitées dans la STEP d'Errachidia. Les résultats obtenus ont montré des concentrations plus faibles d'Escherichia coli, de Salmonella , de coliformes totaux et de coliformes fécaux sur les cultures irriguées. Les valeurs obtenues étaient inférieures aux normes marocaines. Actuellement, (Kajeiou et al., 2023) ont évalué la contamination microbiologique des eaux usées de la station d'épuration d'Oujda (Maroc oriental) et ont enregistré que les concentrations de Salmonella et des vibrions cholériques

étaient inférieures aux normes marocaines. En revanche, la concentration en coliformes fécaux était nettement supérieure aux normes marocaines. Dans une autre étude (Ouansafi et al.,2021) ont examiné les paramètres microbiologiques de l'aubergine (Solanum melongena L.) irriguée avec les eaux usées traitées de la STEP de Casablanca, au nord-ouest du Maroc. Les résultats ont montré que les concentrations des contaminants, notamment les coliformes fécaux, les coliformes totaux, Salmonella sp Escherichia coli, Vibrio cholerae et les streptocoques fécaux, étaient plus faibles dans les cultures irriguées à la fois avec des eaux usées (WW) et des eaux usées traitées (TW). Les valeurs étaient inférieures aux Normes marocains. Ceux-ci sont en accord avec nos résultats et confirment l'utilité de nos eaux usées pour l'irrigation des cultures. Au lieu de cela, il est suggéré d'utiliser les eaux usées pour augmenter la croissance et le rendement des cultures (Ofori et al., 2021 ; Ungureanu et al., 2020), car les eaux usées sont riches en minéraux et en matière organique nécessaires aux cultures (Chatzistathis et Koutsos. , 2017 ; Saliu et Oladoja, 2021). De même, l'utilisation des eaux usées de l'EWTO d'Errachidia dans le respect des normes marocaines contribue bien à réduire la pression sur les eaux souterraines et superficielles dans cette zone aride (Ait Bahammou et al.,2021 ; Roubil et al., 2022).

III. Conclusion

Nous avons présenté une étude sur les caractéristiques physico-chimiques et microbiologiques des eaux usées de la STEP d'Errachidia. Nous avons également évalué la contamination microbiologique des courgettes et des laitues irriguées avec des eaux usées traitées.Les résultats obtenus présentent de nouvelles données sur les propriétés physiques et chimiques des eaux usées, ainsi que sur la charge microbienne. De même, la conductivité était variable avec des valeurs plus élevées en janvier. De plus, la DBO5 et la DCO étaient significativement plus élevés en été. En termes de charge microbienne, la concentration en coliformes totaux était supérieure à celle des coliformes fécaux dans les eaux usées de la STEP d'Errachidia. Toutefois, ces concentrations étaient inférieures aux normes marocaines. Celles-ci ont été confirmées après la réutilisation en irrigation.Ces résultats ont montré la moindre contamination des eaux usées traitées dans la STEP d'Errachidia, ce qui favorise leur réutilisation pour l'irrigation des cultures. Ceci est suggéré pour offrir des sources d'irrigation alternatives dans ces zones arides où les eaux souterraines et de surface sont rares. Cependant, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour évaluer les contaminations virales et par les métaux lourds de ces eaux usées avant leur utilisation massive**.**

Chapitre 4: La qualité parasitologique des boues de la station d'épuration de la ville d'Errachidia

I. Introduction

Les boues des stations d'épuration des eaux usées (STEP) contiennent une variété de microorganismes, dont les protozoaires les plus préoccupants en termes de santé publique et qui sont *Giardia lamblia* et *Cryptospridium parvum* .Ces protozoaires sont résistants à de nombreux traitement de désinfection conventionnels et peuvent causer des infections gastro-intestinales séveres (Betancourt et al ., 2004),des helminthes qui sont des vers parasites comme les nématodes, les cestodes et les trématodes, Ces parasites peuvent survivre dans les boues et poser des risques importants lorsqu'ils sont appliqués sur des terres agricoles, *Ascaris lumbricoides*, *Trichuris trichura* et Taenia spp sont parmi les helminthes les plus communs trouvés dans les boues (Jiméres.2007,Alouini et al 2017),et des germes pathogènes, y compris des bactéries des virus et des champignons .Les bactéries pathogènes comme Salmonella spp, Escherichia coli et Staphylococcus aureus sont fréquemment présents dans les boues, Les virus tel que les entérovirus,les rotavirus et les adénovirus peuvent également être trouvés et sont résistant à certaines traitements (Pepper I. et al., 2006 ; Vian E. et al, 2009)

L'objectif de notre travail est:

- l'étude de la qualité parasitologique des boues activées utilisées dans l'épuration des eaux usées de la station d'épuration d'Errachidia qui reçoit tous les rejets urbains de la ville.

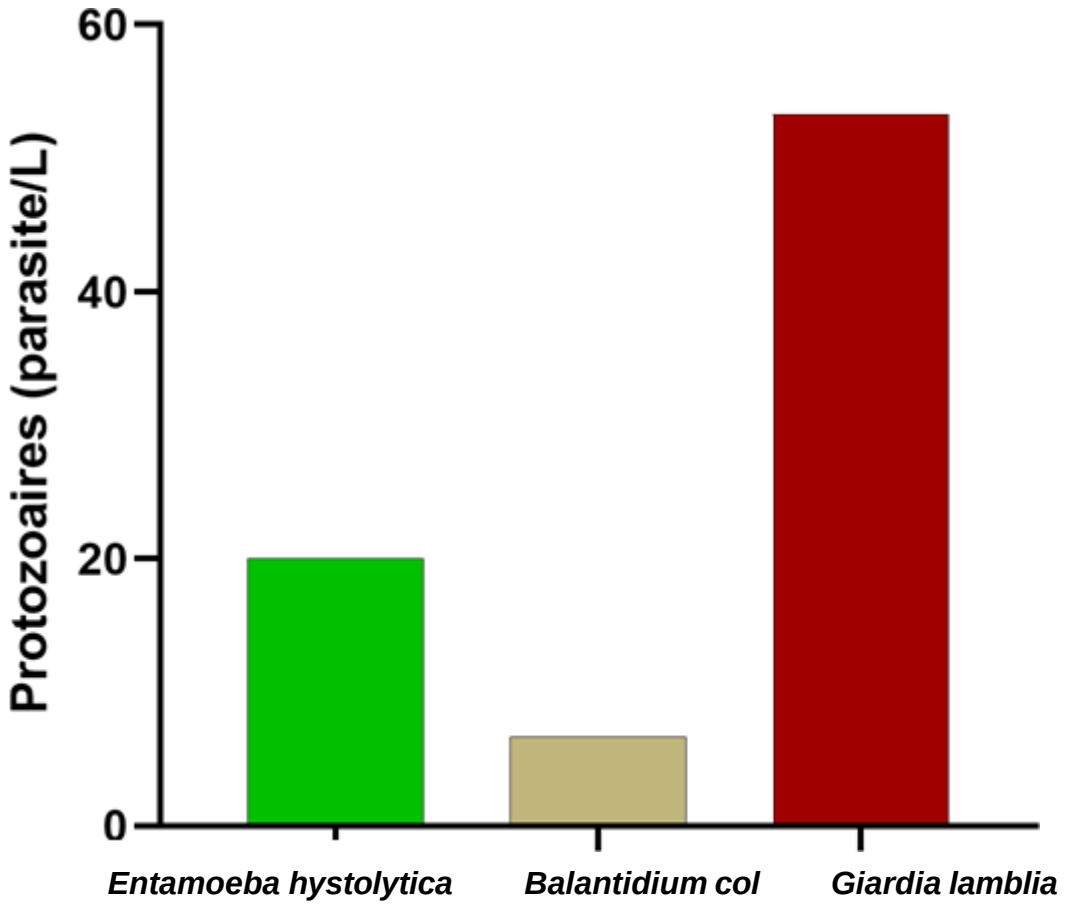
Pour la réalisation de cet objectif nous avons procédé à l'analyse parasitologique des boues du bassin facultatif de la STEP.

II. Résultats et discussion

1. Concentration moyenne des kystes des protozoaires dans la boue brute.

La figure 23 présente les protozoaires trouvés dans les boues activées de la STEP d'Errachidia. Au total, trois espèces de protozoaires ont été recensées, dont *Entamoeba hystolytica*, *Balantidium coli* et *Giardia lamblia*. L'analyse des échantillons a montré des concentrations différentes selon les espèces de protozoaires. La concentration la plus élevée estimée à 53,3 kystes par litre a été enregistrée pour *Giardia lamblia*, mais cette concentration est faible par rapport à celle trouvée dans les eaux usées urbaine en Yaoundé (Cameroun) ; (Ajeagah et al., 2016).De plus, *Entamoeba hystolytica* a montré une concentration moyenne

estimée à 20 kystes par litre. La concentration la plus faible a été enregistrée pour *Balantidium coli* avec 6,7 kystes par litre.



Espèces de protozoaires

Figure 24: Espèces de protozoaires enregistrées dans les boues activées de la STEP d'Errachidia

2. Concentration moyenne des œufs d'helminthes dans la boue brute.

Les helminthes retrouvés dans les boues activées de la STEP d'Errachidia sont présentés dans la figure 24. Au total, six espèces, avec des concentrations variables, ont été relevées. La concentration la plus élevée de *Tænia saginata* et de *Schistosoma haematobium* était de 33,3 parasites par litre. De plus, la concentration moyenne *d'ascaris lumbricoides*, *Enterobius vermicularis* et *Trichuris trichura* a été évaluée à 26,7 parasites par litre. *Ancylostoma duodenale* avait la concentration la plus faible, qui est de 6,7 parasites par litre.

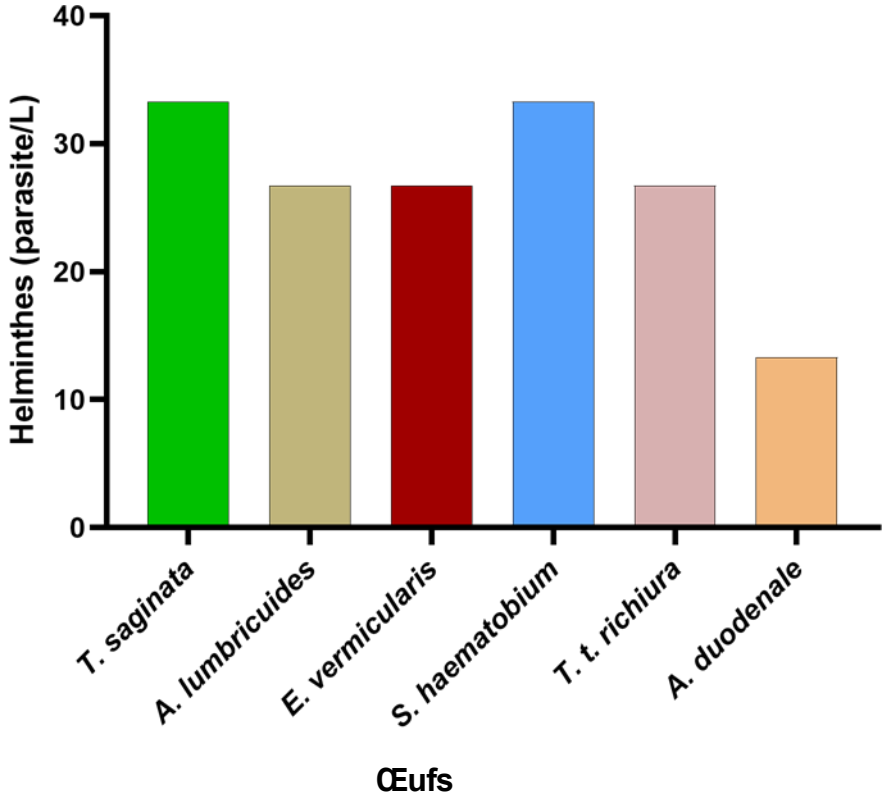


Figure 25: Espèces d'helminthes enregistrées dans les boues activées de la STEP d'Errachidia

Au cours du siècle dernier, de nombreuses études ont porté sur les composants des STEP, notamment l'eau et les boues, en raison du besoin des ressources nouvelles et durables dans l'agriculture (Kumar et al., 2017, Gherghel et al., 2019, Silva 2023). Concernant les boues, les investigations ont porté sur la qualité, la contamination physico-chimique et parasitaire (Chaoua et al.,2018, Droste et Gehr 2018). Dans notre travail, nous avons étudié la contamination parasitaire des boues résultant du traitement des eaux usées par des lagunes aérées. Nous avons analysé les protozoaires et les helminthes des boues extraites de la STEP d'Errachidia. Les résultats enregistrés ont montrés des charges importantes, des études similaires sont menées actuellement dans des pays d'Afrique du Nord, dont le Maroc, l'Algérie et la Tunisie, et ont enregistré des résultats similaires (Hamaidi-Chergui et al 2019, Bourouache et al 2021, Sabbahi et al 2022). Par exemple, El Fels et al.,2019 ont étudié la contamination des boues activées provenant du système de traitement des eaux usées par lagunage et par infiltration-percolation sous le climat semi-aride du Maroc. Les résultats ont montré une variété d'espèces de parasites. La classe des nématodes est la plus diversifiée avec 5 taxons ; œufs d' Ascaris sp., Capillaria., Trichuris sp., Toxocara sp. et Ankylostome sp., Viennent ensuite la classe des cestodes, qui est représentée par les œufs de Tænia sp. La

classe des trématodes est représentée par Schistosoma sp. La station lagunaire de Chichaoua présente la charge la plus élevée, avec 7 espèces telles que : Ascaris 21 œufs/g ; Capillaria., 11 œufs/g ; Trichuris sp., 6 œufs/g ; Toxocara sp., 2 œufs/g et Ankylostome sp., 1 œuf/g ; Taenia sp., 2 œufs/g ; et Schistosoma sp., 1 œuf/g.

III. Conclusion

Dans cette étude, nous avons étudié la contamination parasitaire des boues résultant du traitement des eaux usées par des lagunes aérées. Nous avons analysé les protozoaires et les helminthes des boues extraites de la STEP d'Errachidia. Les résultats enregistrés ont montré des charges importantes des micro-organismes étudiés. Au total, trois espèces de protozoaires ont été recensées, parmi eux Entamoeba hystolytica, Balantidium coli et Giardia lamblia. L'analyse des échantillons a montré des concentrations différentes selon les espèces de parasites. Six espèces d'helminthes, avec des concentrations variables, ont été trouvées. La concentration la plus élevée de Taenia saginata et de Schistosoma haematobium a été enregistrée.. Ces parasites contribuent à éliminer les germes pathogènes des eaux usées traitées, en vue d'une réutilisation dans l'agriculture et à d'autres fins industrielles. Cette étude est proposée comme référence pour les recherches comparatives dans le même domaine.

Conclusion générale et perspectives

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la mise en évidence des paramètres de pollution issue des eaux usées de la ville d'Errachidia et l'analyse des performances épuratoires de la station d'épuration à lagunage aéré, et de l'élimination des principaux paramètres de pollution en vue de réutiliser ces eaux épurées en irrigation agricole.

L'identification des paramètres physico-chimiques, bactériologiques et traces de métaux lourds à l'entrée et à la sortie de la station, de leur comparaison aux normes Marocaines de rejets et de réutilisation en irrigation, la maitrise des facteurs susceptibles d'influencer ces paramètres, sont des étapes importantes pour une meilleure optimisation des rendements de la station. Et ceci dans le but d'améliorer la qualité des eaux épurées destinées à l'irrigation et d'éviter les risques sanitaires qui peuvent être engendrés pendant la réutilisation de ces eaux.

Notre étude s'est intéressée dans un premier temps à l'évaluation de la caractérisation physico-chimique des eaux usées de la ville, qui nous a montré que ces eaux présentent de fortes charges organiques, mais qui sont biodégradables du fait du rapport de DCO/DBO5, qui est faible 2,67. Ceci signifie que les eaux usées de la ville sont de nature domestique et implique la présence d'une grande proportion de matières biodégradables faciles à éliminer. Une chaine d'épuration du type biologique sera suffisante pour l'épuration des eaux usées de la ville. Après cette phase, nous avons procédé à faire une évaluation de la technique de lagunage aéré nouvellement utilisée dans la STEP d'Errachidia. Pour cela, nous avons étudié les paramètres physico-chimiques et bactériologiques des eaux brutes et épurées de la station. Cette dernière étude, nous a permis de conclure que:

• Le rendement épuratoire a connu une amélioration avec la technique du lagunage aéré. En effet, ces rendements ont atteint des valeurs de 70,47%, 60,21% et 44,02% respectivement pour la DBO5, DCO et MES , mais qui restent inférieurs à ceux trouvés dans la même station en 2013 .

Des rendements de biodégradabilité bactériologiques ont atteint des valeurs de 94,987%, 92,51% et 95,79% respectivement pour les coliformes totaux, les coliformes fécaux et les streptocoques fécaux.

•La qualité des eaux épurées de la station est conforme aux valeurs- limites spécifiques de rejet domestique;

•Grâce à l'efficacité des bassins de maturation de la technique de lagunage aéré, la qualité des eaux épurées permet leur réutilisation en agriculture.

Nous avons également étudié la teneur des métaux lourds et des polluants organiques dans les effluents de la STEP. À cet effet,, nous avons fait une série d'analyses qui nous ont montré que les eaux usées de la ville d'Errachidia présentent de faibles concentrations en métaux lourds à l'entrée qui justifie la nature domestique des eaux usées de la ville. Après épuration dans la station, la teneur des eaux épurées est conforme à une réutilisation agricole. Il est de même pour les polluants organiques tels que : les ions, $NH4^{+}$, $NO3^{-}$ $NO2^{-}$ qui ont présenté également un bon résultat d'abattement.

Ainsi, nous avons également effectué et étudié les analyses bactériologiques des feuilles de laitue irriguées par ces eaux traitées de la STEP d'Errrrachidia qui ont montré une charge moyenne en germes de contamination fécale. Les concentrations des bactéries indicatrices de contamination fécale (73,06 UFC/g de CF) sont inférieures à celles enregistrées au niveau des feuilles de laitue irriguées par les eaux usées brutes de Batha à la ville de Fès au Maroc. Ainsi les coliformes totaux et les entérocoques intestinaux, montrent des valeurs moyennes supérieures à la norme marocaine, ainsi pour Escherichia coli qui est de 7,18 UFC/g. Donc la qualité sanitaire de la laitue irriguée par les eaux usées traitées de la STEP de la ville d'Errachidia, est mauvaise et présente un danger pour la santé publique. Par conséquent, le risque pour la santé du consommateur est plus élevé lors de la consommation des feuilles de laitue non rincée ou non soumises à un lavage adéquat. Pour les courgettes, les analyses bactériologiques des coliformes fécaux, ont une moyenne de 7,56 UFC /g qui est inférieure aux valeurs fixées par la norme marocaine (100 UFC/g) (Annexe a : l'arrêté n°293-19- 2019) pour Escherichia coli avec une valeur moyenne de 7,22 et qui supérieure à la valeur de la norme marocaine. Pour Salmonella, nous ne l'avons pas trouvé dans les courgettes.

En guise de synthèse, cette étude nous a permis de conclure que le lagunage aéré utilisé dans la station d'épuration de la ville d'Errachidia présente des rendements épuratoires efficaces, mais qui restent inférieurs à ceux trouvés dans la même station en 2013 et des biodégradabilités bactériologiques efficaces ce qui a permis de valoriser les eaux épurées de la ville en vue de leur réutilisation en irrigation agricole et contribuer à la préservation de l'environnement et à l'économie des sources en eau dans cette région à climat saharien. Mais il est préférable une cuisson adéquate des courgettes avant la consommation et un traitement par les ultra-violets (UV), ou par chloration des eaux usées épurées réutilisées en irrigation,

permettant de réduire considérablement les problèmes de contamination des produits (OMS, 2012).

Pour compléter cette étude sur l'amélioration des rendements épuratoires de la technique de lagunage aéré utilisées dans la STEP d'Errachidia, et sur la réutilisation des eaux épurées en agriculture, d'autres études devraient etre réalisées en perstective qui sont les suivantes ;

- Etude de la contamination des légumes par les métaux lourds issues de l'irrigation avec les eaux usées épurées.
- Etude du traitement des boues produites au niveau des bassins aérés, devraient etre valorisées en vue de leurs réutilisations comme fertilisants en agriculture.
- Evaluer la contamination biologique des cultures irriguées par les eaux usées ou des cultures poussant sur le sol, y compris les boues des stations d'épuration.

Références Bibliographiques

A ; RIOU G ; Simon P, (2006). Réglementation et traitement des eaux destinées à la Consommation humaine. 1ère édition. ASTEE (Association Scientifique et Technique pour l'environnement).

A Gherghel, C Teodosiu, S De Gisi A review on wastewater sludge valorisation and its challenges in the context of circular economy- Journal of cleaner production, 2019.

A Hurynovich, M Kwietniewski… Evaluation of the possibility of utilization of sewage sludge from wastewater treatment plant–case study- Desalin Water Treat, 2021.

A Müller, H Österlund, J Marsalek… The pollution conveyed by urban runoff: A review of sources - Science of the Total …, 2020.

A Patel, A Arkatkar, S Singh, A Rabbani, JDS Medina… Physico-chemical and biological treatment strategies for converting municipal wastewater and its residue to resources- Chemosphere, 2021.

A Saravanan, PS Kumar, S Jeevanantham, S Karishma… Effective water/wastewater treatment methodologies for toxic pollutants removal: Processes and applications towards sustainable development- Chemosphere, 2021.

A Tariq, A Mushtaq - Untreated wastewater reasons and causes: a review of most affected areas and cities. Int. J. Chem. Biochem. Sci, 2023.

A.Cébron, Ph.D Thesis, Paris VI – Pierre et Marie Curie Univ. (2004) 287.

A.-Cl. Nsom Zamo, D. Belghyti et M. Lyagoubi ,2010 .Etude parasitologique (œufs d'helminthes) des eaux usées brutes de la commune urbaine de la Maâmora (Kénitra-Maroc) , Journal européen d'hydrologie (34) -245-250.

Ababsa, N., Kribaa, M., Tamrabet, L., Addad, D., Hallaire, V., Ouldjaoui, A., 2020. Long-term effects of wastewater reuse on hydro physicals characteristics of grassland grown soil in semi-arid Algeria. Journal of King Saud University - Science 32, 1004–1013. https://doi.org/10.1016/j.jksus.2019.09.007.

Abdelmajid, S., Mukhtar, A., Baig, M.B., Reed, M.R., 2021. Climate Change, Agricultural Policy and Food Security in Morocco, in: Behnassi, M., Barjees Baig, M., El Haiba, M., Reed, M.R. (Eds.), Emerging Challenges to Food Production and Security in Asia,

Middle East, and Africa: Climate Risks and Resource Scarcity. Springer International Publishing, Cham, pp. 171–196. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72987-5_7.

AFNOR, Norme ISO 5667-2:1991 : Qualité de l'eau, échantillonnage - Partie 2, Guide général sur les techniques d'échantillonnage, Juillet 1991.

Ahmed, M., Aqnouy, M., Stitou El Messari, J., 2021. Sustainability of Morocco's groundwater resources in response to natural and anthropogenic forces. Journal of Hydrology 603, 126866. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126866.

Ahmed,W.,Sidhu,J.P.S.,Toze,S.(2019) .Evaluation of Enerococci as Indicators of Fecal Contamination and Distribution of Enteroccus Faecalis in Sewage Treatment Plants.Environment Science,TechNOLOGY,53(10),5911-5918.DIO ;10.1021/ace.est.9b00907.

AI Shah, MUD Dar, RA Bhat, JP Singh, K Singh… Prospectives and challenges of wastewater treatment technologies to combat contaminants of emerging concerns-Ecological …, 2020.

Ait Bahammou, Y., Benamara, A., Ammar, A., Hrittta, D., Dakir, I., Bouikbane, H., 2021, Application of vertical electrical sounding resistivity technique to explore groundwater in the Errachidia basin, Morocco. Groundwater for Sustainable Development 15, 100648. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100648.

Ajeagah G. A., Njine T. , Bilong Bilong C. F., Foto S.M. ; Wouafo N. M. , Nola M. , Di G. G. D. & Huw S. 2010. Seasonal Distribution of Enteric Opportunistic Cryptosporidium Spp.Oocysts and Giardia Spp. Cysts in a tropical water basin, Cameroon. Water, 2:44-57.

AJEAGAH Gideon A,Chumtchoua Armel Landry,Mbouombouo Mama,Foto Menbohan Samuel and NINE Thomas,2016.Evaluation de l'abondance des kystes des protozoaires flagellés dans les eaux uses exploitées en agricultures maraichére en zoneurbaine :cas de la ville de Yaoundé (Cameroun).Journal of Applied Biosciences 107:10450-10459 ISSN 1997-5902 , http://dx.doi.org/10.4314/jab.v107i1.10.

AK Kimisto, GO Ong'ondo… The physico-chemical properties of sewage sludge processed for agricultural use from the Nyeri-Kangemi wastewater treatment plant, Nyeri county, Kenya - … and Technology (JEST …, 2022.

AK Singh, R Kaur, S Verma, S Singh - Antimicrobials and antibiotic resistance genes in water bodies: pollution, risk, and control Frontiers in Environmental …, 2022.

AL Srivastav - Chemical fertilizers and pesticides: role in groundwater contamination. Agrochemicals detection, treatment and remediation, 2020.

Ali, S., Ullah, S., Umar, H., Aslam, M., Aslam, Z., Akram, M., Haider, H., Nasir, S., Hayat, S., Zain, R., Pakistan, M., 2022. Effects of Wastewater use on Soil Physico-chemical Properties and Human Health Status.

Alitane, A., Essahlaoui, A., Van Griensven, A., Yimer, E.A., Essahlaoui, N., Mohajane, M., Chawanda, C.J., Van Rompaey, A., 2022. Towards a Decision-Making Approach of Sustainable Water Resources Management Based on Hydrological Modeling: A Case Study in Central Morocco. Sustainability 14, 10848. https://doi.org/10.3390/su141710848.

Alouini,Z ., § Jellali ,S .(2017) .« Occurrence and removal efficiency of helminth eggs in diffent wastewater treatment processes . » water Reserch,123,177-192.

Ammar, E., Maury, H., Morin, L., Sghir, A. (2020). Environmental, Economic, and Ethical Assessment of the Treated Wastewater and Sewage Sludge Valorization in Agriculture. In: Pérez Solsona, S., Montemurro, N., Chiron, S., Barceló, D. (eds) Interaction and Fate of Pharmaceuticals in Soil-Crop Systems. The Handbook of Environmental Chemistry, vol 103. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/698_2020_606.

Amoah, I.D.; Adegoke, A.A.; Stenström, T.A. Soil-transmitted helminth infections associated with wastewater and sludge reuse: A review of current evidence. Trop. Med. Int. Health 2018, 23, 692–703. [Google Scholar] [CrossRef] [Green Version].

Anwar, R.Z., Abdelghani, C.F., Cherifa, A., Zohra, G.F., Bechlaghem, A., 2021. Analysis and reliability of a wastewater treatment plant: the contribution of operational safety at Tlemcen WWTP, Algeria. Euro-Mediterr J Environ Integr 6, 31. https://doi.org/10.1007/s41207-021-00242-x.

Aquerec Project, (2006). Work package 2 final raport, Delivrable D15, EVK1-CT-20026-00130. Integrated concepts for reuse of upgraded wastewater. URL WWW.aquarec.org.

Asano T, (1998). Wastewater reclamation and reuse. Ed, Water quality management library, 1475 P.

Azizi, S., Valipour, A., Sithebe, T., 2013. Evaluation of Different Wastewater Treatment Processes and Development of a Modified Attached Growth Bioreactor as a Decentralized Approach for Small Communities. The Scientific World Journal 2013, e156870. https://doi.org/10.1155/2013/156870.

B. Jean-claude, J. Bedin, Traitement biologiques des eaux résiduaires, environnement industriel de Colmar, technique de l'ingénieur, 1969, Rev. Technique de l'Eau N° 269**.**

B. Jean-Claude, Techniques de l'Ingénieur, Traitements biologiques des eaux résiduaires, traité Génie des procédés J 3 942.

B. Jean-Claude, Techniques de l'Ingénieur, Traitements biologiques des eaux résiduaires, traité Génie des procédés J 3 942, décembre 1998.

B**.** loire, Agences de bassins, lagunage naturel et lagunage aéré procédés d'épuration des petites collectivités, 1994, édition N° 27167 p.

Bakht, S., Safdar, K., Khair, K.U., Fatima, A., Fayyaz, A., Ali, S.M., Munir, H., Farid, M., 2020. The Response of Major Food Crops to Drought Stress: Physiological and Biochemical Responses, in: Hasanuzzaman, M. (Ed.), Agronomic Crops: Volume 3: Stress Responses and Tolerance. Springer, Singapore, pp. 93–115. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0025-1_6.

Barakat, A., Ennaji, W., Krimissa, S., Bouzaid, M., 2020. Heavy metal contamination and ecological-health risk evaluation in peri-urban wastewater-irrigated soils of Beni-Mellal city (Morocco). International Journal of Environmental Health Research 30, 372–387. https://doi.org/10.1080/09603123.2019.1595540.

Bel Haj, H., El Ouarghi, H., El Yousfi, Y., Elkhattabi, S., Ben Zhir, K., Benyoussef, S., Aboulhassan, M.A., Krid, A., Abioui, M., 2023. Reuse of wastewater for irrigation of coriander in Morocco: Evaluation of effects on crop growth parameters. World Water Policy 9, 799–814. https://doi.org/10.1002/wwp2.12150.

Belabhir, A., Mansir, I., Bouchaou, L., Otmani, M.E., Yaacoubi, B., Choukr-Allah, R., 2021. Effect of Treated Wastewater on the Growth and Yield of Two Sweet Corn Varieties: Impact of Doses and Systems of Irrigation, in: Al-Maktoumi, A., Abdalla, O., Kacimov, A., Zekri, S., Chen, M., Al-Hosni, T., Madani, K. (Eds.), Water Resources in Arid Lands: Management and Sustainability, Advances in Science, Technology & Innovation.

Springer International Publishing, Cham, pp. 263–275. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67028-3_22.

Belloulid, M.O., Hamdi, H., Mandi, L., Ouazzani, N., 2019. Solar drying of wastewater sludge: a case study in Marrakesh, Morocco. Environmental Technology 40, 1316–1322. https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1421713.

Ben Zaid, Z., Tilioua, A., Lamaamar, I., Ansari, O., Souli, H., Hamdi Alaoui, M.A., 2020. An experimental study of the efficacy of integrating a phase change material into a clay-straw wall in the Drâa-Tafilalet Region (Errachidia Province), Morocco. Journal of Building Engineering 32, 101670. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101670.

Benito, M., Menacho, C., Chueca, P., Ormad, M.P., Goñi, P., 2020. Seeking the reuse of effluents and sludge from conventional wastewater treatment plants: Analysis of the presence of intestinal protozoa and nematode eggs. Journal of Environmental Management 261, 110268. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110268.

Betancourt,w.q ., §Rose ,J .B.(2004), »Drinking water treatment processes for removal of Cryptosporidium and Giardia « Veterinary Parasitology,126 (1-2) ,219-234.

Bijay-Singh, Craswell, E. Fertilizers and nitrate pollution of surface and ground water: an increasingly pervasive global problem. SN Appl. Sci. 3, 518 (2021). https://doi.org/10.1007/s42452-021-04521-8.

Bi**swas A**.K, (1987). Role of wastewater reuse in planning and management. (Eds) Treatment and reuse of sewage effluent for irrigation. Butterrsworth Scientific Guildford, U.K, P, 286.

Blumenthal, U.J, (1989). Generalized model of the effect of different control measures in reducing health risks from waste reuse. Wat. Sci. Tech. 21:567-577.

Bourouache, M., Mimouni, R., Ait Alla, A. et al. Occurrence and removal of intestinal parasites in two wastewater treatment plants in the south of Morocco. J Environ Health Sci Engineer 19, 1425–1434 (2021). https://doi.org/10.1007/s40201-021-00697-8.

Bourouache, M., Mimouni, R., Ait Alla, A., Hamadi, F., El Boulani, A., Bihadassen, B., 2019. Bacteriological and physicochemical quality of treated wastewater of the Mzar treatment plant. Appl Water Sci 9, 86. https://doi.org/10.1007/s13201-019-0958-0.

Bouzidane, Z., Beniaich, G., Kaioua, S., Rezouki, S., Mansouri, D., Mahjoub, A.E., Eloutassi, N., 2023. Physicochemical Characterization and Evaluation of the Organic Pollution of

Domestic and Industrial Wastewater in the City of Fez. Ecol. Eng. Environ. Technol. 24, 177–186. https://doi.org/10.12912/27197050/160069.

Capizzi, B.; Schwartzbrod, J. Irradiation of Ascaris ova in sludge using an electron beam accelerator. Water Res. 2001, 35, 2256–2260. [Google Scholar] [CrossRef].

Cauchi et al. Dossier : la réutilisation des eaux usées après épuration. Techniques, Sciences et Méthodes 1996, 2 p81-118.

Cauchi, Hyvrard ; Nakache ; Schwartzbrod ; Zagury, Baron ; Carre ; Courtois ; Denis ; Dernat; Larbaigt ; Derangere ; Martigne, Seguret, (1996). Dossier : la réutilisation des eaux usées après épuration. Techniques, Sciences et Méthodes, 2 : 81-118.

Cauchi, Hyvrard ; Nakache ; Schwartzbrod ; Zagury, Baron ; Carre ; Courtois ; Denis ; Dernat ; Larbaigt ; Derangere ; Martigne, Seguret, (1996). Dossier : la réutilisation des eaux usées après épuration. Techniques, Sciences et Méthodes, 2 : 81-118.

Chaoua, S., Boussaa, S., El Gharmali, A., Boumezzough, A., 2019. Impact of irrigation with wastewater on accumulation of heavy metals in soil and crops in the region of Marrakech in Morocco. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences 18, 429–436. https://doi.org/10.1016/j.jssas.2018.02.003.

Chaouki, H., Elwatik, L., Ramchoun, Y., Fath-Allah, R., Ayyach, A., Fathallah, Z., Midaoui, A.E., Hbaiz, E.M., 2014. Étude des performances épuratoires de la technique du lagunage aéré appliquée à la station d'épuration de la ville d'Errachidia-Maroc. Afrique Science: Revue Internationale des Sciences et Technologie 10.

Chatzistathis, T., Koutsos, T., 2017. Olive mill wastewater as a source of organic matter, water and nutrients for restoration of degraded soils and for crops managed with sustainable systems. Agricultural Water Management 190, 55–64. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.05.008.

Chaoua .S, Boussaa.S, Khadra.A… Efficiency of two sewage treatment systems (activated sludge and natural lagoons) for helminth egg removal in Morocco- Journal of infection and …, 2018.

Chowdhary, P., Bharagava, R.N., Mishra, S., Khan, N. (2020). Role of Industries in Water Scarcity and Its Adverse Effects on Environment and Human Health. In: Shukla, V., Kumar, N. (eds) Environmental Concerns and Sustainable Development. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-5889-0_12.

CR Cattaneo, R Muñoz, GV Korshin, V Naddeo… Biological desulfurization of biogas: A comprehensive review on sulfide microbial metabolism and treatment biotechnologies- Science of The Total …, 2023.

Dahchour, A., El Hajjaji, S. (2023). Management of Water and Wastewater in Morocco and Arab Countries. In: Debik, E., Bahadir, M., Haarstrick, A. (eds) Wastewater Management and Technologies. Water and Wastewater Management. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-36298-9_14.

DBC Oliveira, WA Soares… Effects of rainwater intrusion on an activated sludge sewer treatment system- Revista Ambiente & Água, 2020.

Degrémont.S, Mémento Technique de L'eau, 1989, Tome 1, Neuvième édition.

De**v**aux I, (1999). Intérêts et limites de la mise en place d'un suivi sanitaire dans le cadre de la réutilisation agricole des eaux usées traitées de l'agglomération clermontoise.Thèse «Sciences de la Vie et de la Santé », univ. Joseph Fourier, Grenoble, 257 p.

Doukani, K., Boukirat, D., Boumezrag, A., Bouhenni, H., Bounouira, Y. (2022). Biodegradation of Pollutants. In: Ali, G.A.M., Makhlouf, A.S.H. (eds) Handbook of Biodegradable Materials. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-83783-9_10-1.

Dugniolle H, (1980). L'assainissement des eaux résiduaires domestiques, CSTC -revue n° 3- septembre, pp. 44-52.

Duguet J-P ; Bernazeau F ; Cleret D ; Gaid A ; Laplanche A ; Moles J, Montiel.

Dwivedi, N., Dwivedi, S., Adetunji, C.O. (2021). Efficacy of Microorganisms in the Removal of Toxic Materials from Industrial Effluents. In: Adetunji, C.O., Panpatte, D.G., Jhala, Y.K. (eds) Microbial Rejuvenation of Polluted Environment. Microorganisms for Sustainability, vol 27. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-7459-7_15.

E.Trouve, V.Urbain and J.Manem, Water Sci. Technol. 30 (4) (1994) 151-157.

Echebiri, F.O., Abayomi, A.A., Oladosu, N.O. et al. Effects of physicochemical and sediment–mineral dynamics on phosphorus concentration and biological productivity in Lagos coastal waters. Aquat Sci 85, 67 (2023). https://doi.org/10.1007/s00027-023-00965-9.

Ecosse D, (2001). Techniques alternatives en vue de subvenir à la pénurie d'eau dans le monde. «Qualité et Gestion de l'Eau », Fac. Sciences, Amiens, 62 p.

El Ansari, L., Chenoune, R., Yigezu, Y.A., Komarek, A.M., Gary, C., Belhouchette, H., 2023. Intensification options in cereal-legume production systems generate trade-offs between sustainability pillars for farm households in northern Morocco. Agricultural Systems 212, 103769. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103769.

El Bouazzaoui, I., Ait Brahim, Y., El Khalki, E.M., Najmi, A., Bougadir, B., 2022. A Summary Analysis of Groundwater Vulnerability to Climate Variability and Anthropic Activities in the Haouz Region, Morocco. Sustainability 14, 14865. https://doi.org/10.3390/su142214865.

El Fels, L., El Hayany, B., El Faiz, A. et al. Sludge nematodes, cestodes, and trematodes eggs variation from lagooning, activated sludge and infiltration-percolation wastewater treatment system under semi-arid climate. Environ Sci Pollut Res 26, 570–576 (2019). https://doi.org/10.1007/s11356-018-3618-2.

EL Hachemi et al.,. Etude des Perforances Epuratrices dans une station de traitement des eaux usées par lagunage en Climat desertique (OASIS DE FIGUIG -MAROC) : Aspect bactérien et organique 2017 — Vol 6, N°1, p : 84-97.

El Hilali, R., Symanczik, S., El kinany, S., Oehl, F., Ouahmane, L., Bouamri, R., 2022. Cultivation, identification, and application of arbuscular mycorrhizal fungi associated with date palm plants in Drâa-Tafilalet oasis. Rhizosphere 22, 100521. https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2022.100521.

El Mouhri, G. (2022). Valorisation des biomasses durables pour la modélisation et l'optimisation du traitement des effluents de la tannerie par des procédés physico-chimiques. Université Sidi Mohamed Ben Abdellah Faculté des Sciences et Techniques.

El-Ghzizel, S., Tahaikt, M., Dhiba, D., Elmidaoui, A., Taky, M., 2021. Desalination in Morocco: status and prospects. Desalination Water Treat. 231, 1–15.

Errich, A., El Hajjaji, S., Fekhaoui, M., Hammouti, B., Azzaoui, K., Lamhamdi, A., Jodeh, S., 2023. Seawater Intrusion and Nitrate Contamination in the Fum Al Wad Coastal Plain, South Morocco. J. Earth Sci. 34, 1940–1950. https://doi.org/10.1007/s12583-021-1529-5.

F Hamaidi-Chergui, MB Errahmani… Occurrence and removal of protozoan cysts and helminth eggs in the Médéa sewage treatment plant (south-east of Algiers)- Annals of …, 2019.

F Salem, T Thiemann - Produced water from oil and gas exploration—problems, solutions and opportunities. Journal of Water Resource and Protection, 2022.

Faby J.A et Brissaud F, 1997. L'utilisation des eaux usées épurées en irrigation.Office International de l'Eau, 76 p.

Faby J.A et Brissaud F, 1997. L'utilisation des eaux usées épurées en irrigation.Office International de l'Eau, 76 p.

FAO AQUASTAT. 2016. Zones équipées pour l'irrigation et pourcentage des terres cultivées.http://www.fao.org/nr/aquastat.

FAO, (1998). Irrigation in the Near East Region in Figures. Water Report 9 /(AQUASTAT).

Fazio A, (2001). Principe et performances de la filière de traitement et de réutilisation des eaux résiduaires urbaines. Colloque de Noirmoutier, 10 p, 24 septembre.

Fito, J., Van Hulle, S.W.H. Wastewater reclamation and reuse potentials in agriculture: towards environmental sustainability. Environ Dev Sustain 23, 2949–2972 (2021). https://doi.org/10.1007/s10668-020-00732-y.

Frascari, D., Zanaroli, G., Motaleb, M.A., Annen, G., Belguith, K., Borin, S., Choukr-Allah, R., Gibert, C., Jaouani, A., Kalogerakis, N., Karajeh, F., Ker Rault, P.A., Khadra, R., Kyriacou, S., Li, W.-T., Molle, B., Mulder, M., Oertlé, E., Ortega, C.V., 2018. Integrated technological and management solutions for wastewater treatment and efficient agricultural reuse in Egypt, Morocco, and Tunisia. Integrated Environmental Assessment and Management 14, 447–462. https://doi.org/10.1002/ieam.4045.

Garcia-Armisen,T.,&Servais,P.(2020).Survival of Fecal Indicator Bacteria in Sewage Sludge Treated by Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Digestion .Water Research,172,115515,DOI ;10.1016/j.watres.2020.115515.

GERIN M ; Gosselin P ; Cordier S ; Viau C ; Quénel P ; Dewailly E, (2003).Environnement et santé publique – Fondements et pratiques. Tech&Doc, Canada, 1023 p.

Gharbi-Khelifi, H., Jmii, H., Mosbahi, M., Hamdi, S., Hamdi, R., Brahmi, J., Loukil, S., Chamkha, M., Sayadi, S., Aouni, M., Barreiro, A., Fernández-Sanjurjo, M.J., Núñez-Delgado, A., Rodríguez, E.Á., 2023. Microbiological and physicochemical quality enhancement of treated wastewater using raw and chemically modified clays from Sidi Bouzid region, Tunisia. Environmental Research 239, 117391. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117391.

Ghoualem-Saouli H, (2007). Evaluation de la charge polluante, traitements biologique des eaux urbaines de la commune de Zéralda. Conseption d'un pilote. Thése de Doctorat USTHB Algérie.

Ghosh .S, Ghosh .S- Water crisis in urban and sub-urban areas: A global perspective Saudi J Bus Manag Stud, 2021.

Giuseppina La Rosa et ,al 20220, Coronavirus in water environments: Occurrence, persistence andconcentration methods - A scoping review, journal water Reseach.

GLANIC R et BENNETON J-P, (1989). Caractérisation d'effluent d'assainissement individuel et essais de matériels d'assainissement autonome - TSM - L'eau -84 année - N 11 – pp. 573-584.

Gonella, G., Backus, E.H.G., Nagata, Y. et al. Water at charged interfaces. Nat Rev Chem 5, 466–485 (2021). https://doi.org/10.1038/s41570-021-00293-2.

GROENEWEG, Joost, SELLNER, Beate, et TAPPE, Wolfgang. Oxydation de l'ammoniac chez Nitrosomonas à des concentrations de NH3 proches de Km : effets du pH et de la température. Recherche sur l'eau. 28 (1994) 2561-2566.

Groenfeldt, D. (2021). Water Ethics. In: Bogardi, J.J., et al. Handbook of Water Resources Management: Discourses, Concepts and Examples. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-60147-8_5.

Guemmaz, F., Neffar, S., Chenchouni, H., 2020. Physicochemical and Bacteriological Quality of Surface Water Resources Receiving Common Wastewater Effluents in Drylands of Algeria, in: Negm, A.M., Bouderbala, A., Chenchouni, H., Barceló, D. (Eds.), Water Resources in Algeria - Part II: Water Quality, Treatment, Protection and Development, The Handbook of Environmental Chemistry. Springer International Publishing, Cham, pp. 117–148. https://doi.org/10.1007/698_2019_400.

Guermazi, E., Milano, M., Reynard, E., Zairi, M., 2019. Impact of climate change and anthropogenic pressure on the groundwater resources in arid environment. Mitig Adapt Strateg Glob Change 24, 73–92. https://doi.org/10.1007/s11027-018-9797-9.

Haj, H.B., Zhir, K.B., Aboulhassan, M.A., Ouarghi, H.E., 2023. Impact assessment of treated wastewater reuse for irrigation: growth potential and development of lettuce in Al Hoceima province, Morocco. E3S Web Conf. 364, 01002. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202336401002.

Hajji, S., Ait Alla, A., Noureddine, S., Haddad, M.B., Moukrim, A., 2021. Study of Physicochemical and Bacteriological Quality of Treated Wastewater by the New Aourir Plant (Southwestern of Morocco) Using Activated Sludge Technology in a Semi-Arid Region. Journal of Ecological Engineering Vol. 22. https://doi.org/10.12911/22998993/137360.

Han, Z., Long, D., Fang, Y., Hou, A., Hong, Y., 2019. Impacts of climate change and human activities on the flow regime of the dammed Lancang River in Southwest China. Journal of Hydrology 570, 96–105. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.048.

Hassine et al., 2022,Role of eco-climatic factors in the distribution of bluetongue in endemic areas in Tunisia, Open Veterinary Journal ,Vol. 12(1): 114–123.

Hdidou, M., Necibi, M.C., Labille, J., El Hajjaji, S., Dhiba, D., Chehbouni, A., Roche, N., 2022. Potential Use of Constructed Wetland Systems for Rural Sanitation and Wastewater Reuse in Agriculture in the Moroccan Context. Energies 15, 156. https://doi.org/10.3390/en15010156.

Hebabaze.S,. Brand.C, Moutaib.Z, Riechelmann.C, Raffy.S, Kraume.M, and M. Chlaida. IJIAS - 9 No. 2 (2014) 744-756.

HI Abdel-Shafy, AM Ibrahim, AM Al-Sulaiman… Landfill leachate: Sources, nature, organic composition, and treatment: An environmental overview- Ain Shams Engineering …, 2024.

HLPE, 2015. L'eau, enjeu pour la sécurité alimentaire mondiale. Rapport du Groupe d'experts de haut niveau sur la sécurité alimentaire et la nutrition du Comité de la sécurité alimentaire mondiale, FAO, Rome 2015, 150p, www.fao.org/3/a-av045f.pdf.

Hssaisoune, M., Bouchaou, L., Sifeddine, A., Bouimetarhan, I., Chehbouni, A., 2020. Moroccan Groundwater Resources and Evolution with Global Climate Changes. Geosciences 10, 81. https://doi.org/10.3390/geosciences10020081.

Hssaisoune, M.; Bouchaou, L.; Sifeddine, A.; Bouimetarhan, I.; Chehbouni, A. Moroccan Groundwater Resources and Evolution with Global Climate Changes. Geosciences 2020, 10, 81. https://doi.org/10.3390/geosciences10020081.

Hudcová, H.; Vymazal, J.; Rozkošný, M. Present restrictions of sewage sludge application in agriculture within the European Union. Soil Water Res. 2019, 14, 104–120. [Google Scholar] [CrossRef].

Ibrahim, I.D., Hamam, Y., Alayli, Y., et al. (2021) A Review on Africa Energy Supply

through Renewable Energy Production: Nigeria, Cameroon, Ghana and South Africa as a Case Study. Energy Strategy Reviews, 38, Article ID: 100740.https://doi.org/10.1007/s40095-021-00427-8.

J. Paing, J. Psambuco, R. costa et al, Mass balance of carbone in anaerobic ponds applied under a Mediterranean climat, Rev. Sci. Eau, 2003, p.357-368.

J.LAURENT, modifications de la répartition d'espèces métalliques (cd, cu) induites par des prétraitements physique (ultrasons), chimique (ozone) et thermique au sein des procédés à boues activées. Thèse de doctorat 2009, université de limoges.

Jamin JY, Bouarfa S, Poussin JC, Garin P, 2011. Les agricultures irriguées face à de nouveaux défis. Cahiers Agricultures 20, 10-15.

Jaramillo, M.F., Restrepo, I., 2017. Wastewater Reuse in Agriculture: A Review about Its Limitations and Benefits. Sustainability 9, 1734. https://doi.org/10.3390/su9101734.

Jari, Y., Roche, N., Necibi, M.C., El Hajjaji, S., Dhiba, D., Chehbouni, A., 2022. Emerging Pollutants in Moroccan Wastewater: Occurrence, Impact, and Removal Technologies. Journal of Chemistry 2022, e9727857. https://doi.org/10.1155/2022/9727857.

Jemenez B.C et Chavezh-Medjia A, (1997). 1997 « treatment of Mexico City wastewater for irrigation purposes ; Env. Techn. 58 p.

Jesús Villalobos Garcia, Claire Vialle, Caroline Sablayrolles, Mireille Montrejaud-Vignoles, Jean-Philippe Amalric, Matthias Desmolles, Christian Vignoles, Patrice Gallien and Claire Albasi (2019). Study of the performance of a filter medium consisting of a layer of hemp shives on a layer of olive pomace in the treatment of domestic wastewater: scale-up from biofiltration pilot to full-scale, Journal of Water Science, 32: 1.

Jiménez,B .(2007), « Helminth ova removal from wastewater for agriculture reuse » water Sciences §Technology,55(1-2) ,485-493.

Jiménez-Cisneros, B.E. Helminth ova control in wastewater and sludge for agricultural reuse In Water Reuse New Paradigm towards Integrated Water Resources Management: Encyclopedia of Biological, Physiological and Health Sciences, 1st ed.; Grabow, W., Ed.; EOLSS Publishers Co., Ltd. UNESCO: Abu Dhabi, United Emirates, 2006. [Google Scholar].

Junger J.F, (2000). The reuse of urban waste water in agriculture : EuropeanResearch on Treated Wastewater Reuse in Agriculture. Urban Technology Network Project 10th, 7 pages.

Kaczmarek, N., Mahjoubi, I., Benlasri, M., Nothof, M., Schäfer, R.B., Frör, O., Berger, E., 2023. Water quality, biological quality, and human well-being: Water salinity and scarcity in the Draa River basin, Morocco. Ecological Indicators 148, 110050. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110050.

Kajeiou, H., Sbaa, M., Darmous, A., 2023. Physico-chemical, chemical and biological characterization of wastewater treatment plant of Oujda (Eastern Morocco) and possibility of reuse in irrigation. Materials Today: Proceedings, Fifth edition of the International Conference on Materials & Environmental Science (ICMES 2022) 72, 3326–3335. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.355.

Karmaoui, A., 2019. Drought and desertification in Moroccan Pre-Sahara, Draa valleys: exploring from the perspective of young people. Geoenvironmental Disasters 6, 2. https://doi.org/10.1186/s40677-019-0118-8.

Keffala C, Effebi K.R, Ghrabi A. and Vasel J. L. (2008). Evaluation des taux d'accumulation et de production de boue dans les basins de stabilisation appliqués sous climat méditérranéen: Etude de cas en Tunisie, Soumis dans la Revue des Sciences de l'Eau, Avril 2008. (en cours de correction).

Kesari, K.K., Soni, R., Jamal, Q.M.S. et al. Wastewater Treatment and Reuse: a Review of its Applications and Health Implications. Water Air Soil Pollut 232, 208 (2021). https://doi.org/10.1007/s11270-021-05154-8.

Kesari, K.K., Soni, R., Jamal, Q.M.S., Tripathi, P., Lal, J.A., Jha, N.K., Siddiqui, M.H., Kumar, P., Tripathi, V., Ruokolainen, J., 2021. Wastewater Treatment and Reuse: a Review of its Applications and Health Implications. Water Air Soil Pollut 232, 208. https://doi.org/10.1007/s11270-021-05154-8.

Khan, M.M.; Siddiqi, S.A.; Farooque, A.A.; Iqbal, Q.; Shahid, S.A.; Akram, M.T.; Rahman, S.; Al-Busaidi, W.; Khan, I. Towards Sustainable Application of Wastewater in Agriculture: A Review on Reusability and Risk Assessment. Agronomy 2022, 12, 1397. https://doi.org/10.3390/agronomy12061397.

Khondoker, M.; Mandal, S.; Gurav, R.; Hwang, S. Freshwater Shortage, Salinity Increase, and Global Food Production: A Need for Sustainable Irrigation Water Desalination—A Scoping Review. Earth 2023, 4, 223-240. https://doi.org/10.3390/earth4020012.

Kolpin D.W ; Thurman E.M ; Linhart S.M, (1998). The environmental occurrence of herbicides : the importance of degradates in ground water. Arch. Environ. Contam.Toxicol. p:385-390.

Koul, B.; Yadav, D.; Singh, S.; Kumar, M.; Song, M. Insights into the Domestic Wastewater Treatment (DWWT) Regimes: A Review. Water 2022, 14, 3542. https://doi.org/10.3390/w14213542.

L Bonacina, F Fasano, V Mezzanotte… Effects of water temperature on freshwater macroinvertebrates: A systematic review- Biological …, 2023.

L Ho, PLM Goethals - Municipal wastewater treatment with pond technology: Historical review and future outlook. Ecological Engineering, 2020.

Laboratoire Nationale de l'Environnement. Ministère de l'environnement Rabat. Maroc DIN. 1992. Détermination de la Demande Chimique en Oxygène (DCO) selon DIN 38409-H52.

Lanata et coll. 2013 March 2013, Phytochemical composition and in vitro antioxidant activity of aqueous extract of Aerva lanata (L.) Juss. ex Schult. Stem (Amaranthaceae) Asian Pacific Journal of Tropical Medicine 6(3):180-7.

Lazarova V ; Gaid A ; Rodriguez-Gonzales J ; Alday Ansola J, (2003). L'intérêt de la réutilisation des eaux usées : analyses d'exemples mondiaux. Techniques, Sciences et méthodes, N 9, p 64-85.

Lejri, R., Ben Younes, S., Ellafi, A., Bouallegue, A., Moussaoui, Y., Chaieb, M., Mekki, A., 2022. Physico-chemical, microbial and toxicity assessment of industrial effluents from the southern Tunisian tannery. Journal of Water Process Engineering 47, 102686. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102686.

Liu F ; MITCHELL C.C ; ODOM J.W, HILL D.T ; ROCHESTER E.W, (1997).

Lokman, N.A., Ithnin, A.M., Yahya, W.J., Yuzir, M.A., 2021. A brief review on biochemical oxygen demand (BOD) treatment methods for palm oil mill effluents (POME). Environmental Technology & Innovation 21, 101258. https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101258.

M Kastali, L Mouhir, M Chatoui, S Souabi… Removal of turbidity and sludge production from industrial process wastewater treatment by a rejection of steel rich in FeCl3 (SIWW)- … Research in Applied …, 2021.

M Mainardis, D Cecconet, A Moretti, A Callegari… Wastewater fertigation in agriculture: Issues and opportunities for improved water management and circular economy-Environmental …, 2022.

M. HENZE. Capacités des procédés biologiques d'élimination de l'azote des eaux usées. Science et technologie de l'eau. 23(1991) 669-679.

M. satin et B. Selmi, guide technique de l'assainissement, 2006, 3e édition.

MA Salam, N Sultana - Pollution of water resources. Current Directions in Water Scarcity Research, 2022.

Maas E.V, (1984). Salt tolerance of plants. The handbook of land science in agriculture. B.R. Cristie (Ed). CRC Press, Boca Raton, Florida.

Madoni,P.(2011).Protozoa in Wastewater Treatment Processes:A Minireview.Italian Journal of Zoology,78(1),3-11. DIO :10.1080/11250000903373797.

Mansir, I., Oertlé, E., Choukr-Allah, R., 2021. Evaluation of the Performance and Quality of Wastewater Treated by M'zar Plant in Agadir, Morocco. Water 13, 954. https://doi.org/10.3390/w13070954.

Mara D. D. and Pearson H. (1998). Design manual for waste stabilization ponds in Mediterranean countries. Lagoon Technology International (ed), Leeds, England,112p.

Mara,D.D.,§Pearson,H,W .(2019).Desingn Manual for Waste Stabilization Ponds in Mediterranean Countries ,Water and Environment Journal ,33(2),135-144 ,DOI :10.1111/Wej.12398.

Marsalek J ; Schaefer K ; Exall K ; Brannen L ; Aidun B, (2002). Réutilisation et recyclage de l'eau. Conseil canadien des ministres de l'environnement, Winnipeg (Manitoba).Série d'ateliers du CCME sur les sciences de l'eau et les politiques, compte-rendu N 3, 46 p.

Merhabi,F., Amine,H.and Halwani.J (2019). Evaluation de la qualité des eaux de surface de la rivière Kadicha. Journal Scientifique Libanais., 1: 10-34.

Minhas, P.S., Saha, J.K., Dotaniya, M.L., Sarkar, A., Saha, M., 2022. Wastewater irrigation in India: Current status, impacts and response options. Science of The Total Environment 808, 152001. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152001.

Ministère de l'Environnement. Techniques d'épuration actuelles et évolution– Document n° 27 avril 1994.

Miquel G, (2003). «la qualité de l'eau et de l'assainissement en France» ed sénat pp 254-256. 290p.

MK Awasthi, P Ganeshan, N Gohil, V Kumar Advanced approaches for resource recovery from wastewater and activated sludge: A review… - Bioresource …, 2023.

Mohamed Bennani,. 2012 ,Influence des Facteurs Environnementaux Sur les Charges des Bactéries Fécales Dans le Littoral Méditerranéen du Maroc ,European Journal of Scientific Research ,71(1):1450-216.

Mohammad.M.J et MAZAREH.N, (2003). Changes in soil fertility parameters in response to irrigation of forage crops with secondary treated wasrtewater. Communication in soil science and plant analysis, 34, Nos. 9 et 10, 1281- 1294.

Morin-Crini, N., Lichtfouse, E., Fourmentin, M., Ribeiro, A.R.L., Noutsopoulos, C., Mapelli, F., Fenyvesi, É., Vieira, M.G.A., Picos-Corrales, L.A., Moreno-Piraján, J.C., Giraldo, L., Sohajda, T., Huq, M.M., Soltan, J., Torri, G., Magureanu, M., Bradu, C., Crini, G., 2022. Removal of emerging contaminants from wastewater using advanced treatments. A review. Environ Chem Lett 20, 1333–1375. https://doi.org/10.1007/s10311-021-01379-5.

MVW Kofoed, MB Jensen, LDM Ottosen - Biological upgrading of biogas through CO2 conversion to CH4… and Biological Systems for Biogas …, 2021.

N Rana, P Gupta - Microbes: An eco-friendly tool in wastewater treatment… for Bioremediation of Environmental Pollutants: Recent …, 2022.

N. Lambarki, ONEP-DCE , Analyses physico-chimiques, 2007.

Nazari, L., Xu, C.(., Ray, M.B. (2021). Nitrogen and Phosphorous Recovery from Municipal Wastewater and Sludge. In: Advanced and Emerging Technologies for Resource Recovery from Wastes. Green Chemistry and Sustainable Technology. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9267-6_4.

Norme Marocain de qualité des eaux destinées à l'irrigation, secrétariat d'état au prés de ministère de l'énergie, des mines, de l'eau et de l'environnement, chargé de l'environnement, (S.E.E.E, 2007).

Obayomi, K.S., Bello, J.O., Yahya, M.D., Chukwunedum, E., Adeoye, J.B., 2020. Statistical analyses on effective removal of cadmium and hexavalent chromium ions by multiwall carbon nanotubes (MWCNTs). Heliyon 6.

Ofori, S., Puškáčová, A., Růžičková, I., Wanner, J., 2021. Treated wastewater reuse for irrigation: Pros and cons. Science of The Total Environment 760, 144026. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144026.

Olabode, G.S., Olorundare, O.F. & Somerset, V.S. Physicochemical properties of wastewater effluent from two selected wastewater treatment plants (Cape Town) for water quality improvement. Int. J. Environ. Sci. Technol. 17, 4745–4758 (2020). https://doi.org/10.1007/s13762-020-02788-9.

ONEP DCE- recueil des principaux textes réglementaires régissant la qualité de l'eau au Maroc, 2010.

ONEP, Assainissement Liquide de la ville d'Errachidia sous mission A-2 cadre du Marché n° 1238/ DR7/2008.

ONEP, L'étude d'épuration complémentaire des eaux usées du centre d'Errachidia l'avant-projet détaillé (APD) de la ville, 2008, cadre du marché n°470/A/DAE/2007.

ONEP, Schéma Direction National d'Assainissement Liquide (SDNAL) , projet MOR/92/020 Mission I, Epuration, DEA, DGCL, Ministre de l'intérieur, mai 1998.

Ongoma, V., Driouech, F., Brouziyne, Y., Chfadi, T., Epule Epule, T., Tanarhte, M., $Chehbouni, A., 2024. Morocco's climate change impacts, adaptation and mitigation—a stocktake. Reg Environ Change 24, 14. https://doi.org/10.1007/s10113-023-02176-2.

Organisation Internationale de Métrologie Légale (OIML), Spectromètres d'absorption atomique pour la mesure des polluants métalliques dans l'eau. OIML R 100, Edition 1991.

Ortega-Pozo, J.L.; Alcalá, F.J.; Poyatos, J.M.; Martín-Pascual, J. Wastewater Reuse for Irrigation Agriculture in Morocco: Influence of Regulation on Feasible Implementation. Land 2022, 11, 2312. https://doi.org/10.3390/land11122312.

Ouansafi, S., Bellali, F., Kabine, M., Maaghloud, H., Abdelilah, F., 2021. Growth, SDH Activity and Microbiological Properties of Aubergine (Solanum melongena L.) crops Irrigated with Treated Wastewater from Casablanca city, Morocco. International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences 11, 206–220.

Oubelkacem, A., Scardigno, A., Choukr-Allah, R., 2020. Treated Wastewater Reuse on Citrus in Morocco: Assessing the Economic Feasibility of Irrigation and Nutrient Management Strategies. Integrated Environmental Assessment and Management 16, 898–909. https://doi.org/10.1002/ieam.4314.

Ouhammi M., Merzouki M. and Belhassan H.,2023. Evaluation of Wastewater Quality Treated by the Step of the City of Errachidia (Morocco). Asian Journal of Water, Environment and Pollution, Vol. 20, No. 3 (2023), pp. 39-45.DOI 10.3233/AJW230036.

OUNOKI.S, ACHOUR.S. EVALUATION DE LA QUALITE PHYSICOCHIMIQUE ET BACTERIOLOGIQUE DES EAUX USEES BRUTES ET EPUREES DE LA VILLE D'OUARGLA. POSSIBILITE DE LEUR VALORISATION EN IRRIGATION, Larhyss Journal. 20 (2014) 247-258.

P.SERVAIS, G.BILLEN, P.BOUILLOT, and al. A pilot study of biological GAC filtration in drinking water. Aqua. 41(1992) ,163-168.

Paing J. (2001). Bilan du carbone et du soufre dans le lagunage anaérobie : contrôle de l'émission d'H2S pour la réduction des nuisances olfactives. Thèse de doctorat,Université Montpellier I, 255p.

Paulsrud B et HARALDSEN S, (1993). Experiences with the Norvegian approval system for small waste water treatment plants. Wat. Sc. Techn., vol. 28, n° 10, pp. 25-32.

Pepper,I .L.,Brooks,J.P., § Gebra ,C.P (2006) . »Pathogens in biosolids . »Advances in Agronomy,90,1-41.

Pescod M. B. (1996). The role and limitations of anaerobic pond systems. Wat. Sci.Tech., Vol.33(7), 11-21.

Pescod M.B, (1992. Wastewater treatment and use in agriculture. FAO Irrigation and Drainage, paper 47, Rome, Italy.

Pharm Duc, B.; Nguyen-Viet, H.; Hattendorf, J.; Zinsstag, J.; Dac Com, P.; Odermatt, P. Risks factors for Entamoeba histolytica infection in an agricultural community in Hanam province, Vietnam. Parasites Vectors 2011, 4, 1–9. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed] [Green Version.

Picot B., Paing J**.,** Sambuco J. P., Costa R. H. R. and Rambaud A. (2002). Biogaz production, sludge accumulation and mass balance of carbon in anaerobic ponds. 5th International IWA Specialist Group Conference on waste stabilization ponds.Auckland- New Zealand, 2-5 April 2002, Vol. 1, pp. 381-388.

Pyssa, J. Technical and Technological Aspects of Sewage Waste Management after Amendments in Legislation in Poland. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science; In Proceedings of the 2nd International Conference on the Sustainable Energy and Environmental Development, Krakow, Poland, 14–17 November 2019; IOP Publishing: Bristol, UK, 2019; Volume 214, p. 012016. [Google Scholar] [CrossRef].

Q Zhou, H Sun, L Jia, W Wu, J Wang - Simultaneous biological removal of nitrogen and phosphorus from secondary effluent of wastewater treatment plants by advanced treatment: A review. Chemosphere, 2022.

Q Zhou, H Sun, L Jia, W Wu, J Wang - Simultaneous biological removal of nitrogen and phosphorus from secondary effluent of wastewater treatment plants by advanced treatment: A review. Chemosphere, 2022.

Qasem, N.A.A., Mohammed, R.H., Lawal, D.U., 2021. Removal of heavy metal ions from wastewater: a comprehensive and critical review. npj Clean Water 4, 1–15. https://doi.org/10.1038/s41545-021-00127-0.

R Sathya, MV Arasu, NA Al-Dhabi, P Vijayaraghavan… Towards sustainable wastewater treatment by biological methods–A challenges and advantages of recent technologies- Urban Climate, 2023.

Rafique, M., Hajra, S., Tahir, M.B., Gillani, S.S.A., Irshad, M., 2022. A review on sources of heavy metals, their toxicity and removal technique using physico-chemical processes from wastewater. Environ Sci Pollut Res 29, 16772–16781. https://doi.org/10.1007/s11356-022-18638-9.

RC Santore, K Croteau, AC Ryan… A review of water quality factors that affect nickel bioavailability to aquatic organisms: Refinement of the biotic ligand model for nickel in acute and chronic exposures- Environmental …, 2021.

Rhoades, J.D, (1977). Potential of using saline agricultural drainage for irrigation. In Proc. Water management for irrigation and drainage. ASAE, Reno, Nevada, July 1977:85-116.

Rhoualem ,F ., El Hadiri, H., Oukour, N. , Taouil, H. , Arouyaa ,K. and Ibn Ahmed, S (2022) .Physico-Chemical Characterization of Leachate from the Moulay Abdallah Technical Landfill Center (Morocco), Journal of Ecological Engineering, 8: 241–248.

RL Droste, RL Gehr - Theory and practice of water and wastewater treatment 2018.

Robles, Á., Aguado, D., Barat, R., Borrás, L., Bouzas, A., Giménez, J.B., Martí, N., Ribes, J., Ruano, M.V., Serralta, J., Ferrer, J., Seco, A., 2020. New frontiers from removal to recycling of nitrogen and phosphorus from wastewater in the Circular Economy. Bioresource Technology 300, 122673. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122673.

Rodier J. (2009). Analysis Of Water – Fresh Water, Wastewater, Seawater.

Rodier J. L'analyse de l'eau: eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer. 8ème Edition. Dunod, Paris (2005).

Rodier, J., Legube, B., Merlet, N. et Coll. L'analyse de l'eau, 2009, 9ème édition. Ed. Dunod Paris. ISBN: 978- 2-10-054179-9.

Roubil, A., El Ouali, Anas, Bülbül, A., Lahrach, A., Mudry, J., Mamouch, Y., Essahlaoui, A., El Hmaidi, A., El Ouali, Abdelhadi, 2022. Groundwater Hydrochemical and Isotopic Evolution from High Atlas Jurassic Limestones to Errachidia Cretaceous Basin (Southeastern Morocco). Water 14, 1747. https://doi.org/10.3390/w14111747..

SA Razzak, MO Faruque, Z Alsheikh… A comprehensive review on conventional and biological-driven heavy metals removal from industrial wastewater- Environmental …, 2022.

Sabbahi, S.; Ben Ayed, L.; Trad, M.; Berndtsson, R.; Karanis, P. Parasitological Assessment of Sewage Sludge Samples for Potential Agricultural Reuse in Tunisia. Int. J. Environ Res. Public Health 2022, 19, 1657. https://doi.org/10.3390/ijerph19031657.

Sabbahi, S.; Ben Ayed, L.; Trad, M.; Berndtsson, R.; Karanis, P. Parasitological Assessment of Sewage Sludge Samples for Potential Agricultural Reuse in Tunisia. Int. J. Environ. Res. Public Health 2022, 19, 1657. https://doi.org/10.3390/ijerph19031657.

Sadhana, K., Madhavi, D., B Thirumala, Rao (2021). Typological Bacteriological Quality of the Gharb Water Table-Morocco, INTERNATIONAL JOURNAL OF RECENT TRENDS IN MULTIDISCIPLINARY RESEARCH July-August, 01: 36 – 41.

Sai, A., Ellafi, A., Moussaoui, Y., Borgi, M.A., Ben Younes, S., 2023. Physico-Chemical Characterization and Phytotoxicity Assessment of Wastewater from Rock Phosphate Processing in Tunisia: From Seed Germination to Seedling Growth. Geomicrobiology Journal 40, 706–718. https://doi.org/10.1080/01490451.2023.2240785.

Salghi R, Différentes filières de traitement des eaux, ed univ IZ Rabat, p.22, (2001).

Saliu, T.D., Oladoja, N.A., 2021. Nutrient recovery from wastewater and reuse in agriculture: a review. Environ Chem Lett 19, 2299–2316. https://doi.org/10.1007/s10311-020-01159-7.

Santé, population et développement : rapport de situation de l' OMS, Conférence internationale sur la population et le développement, Le Caire, 1994.

Silva, J.A. Wastewater Treatment and Reuse for Sustainable Water Resources Management: A Systematic Literature Review. Sustainability 2023, 15, 10940. https://doi.org/10.3390/su151410940.

Singh, J., Yadav, P., Pal, A.K., Mishra, V. (2020). Water Pollutants: Origin and Status. In: Pooja, D., Kumar, P., Singh, P., Patil, S. (eds) Sensors in Water Pollutants Monitoring: Role of Material. Advanced Functional Materials and Sensors. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0671-0_2.

Singh, R.K., Tirth, V., Singh, M. (2022). Wastewater Treatment Processes with Special Reference to Activated Sludge Process in Indian Conditions for Water Use Sustainability. In: Yadav, S., Negm, A.M., Yadava, R.N. (eds) Wastewater Assessment, Treatment, Reuse and Development in India. Earth and Environmental Sciences Library. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-95786-5_12.

Sinsin, T., Mounir, F., El Aboudi, A., 2021. Modeling and assessing driving factors of the spatial and temporal dynamics of the sand dunes in the district of Errachidia, Morocco. Arab J Geosci 14, 2111. https://doi.org/10.1007/s12517-021-08423-2.

Sorensen,S.R.,& Aamand,J.(2020). Total Aerobic Microbial Load in Sewage Sludge ;Evaluation and Optimisation of Treatment Processes.Journal of Environment Management ,258,110020.DIO:10.1016/j.jenvman.2019.110020.

SOUDE Marilyn Karen1-2, BOTHON F. T. Diane1 , DEGUENON H. E. Justine1 , KOUDORO Y. Alain1 , AGBANGNAN D. C. Pascal1 , MAMA Daouda1 , and WOTTO D. Valentin3 (2018). Physicochemical and bacteriological analyzes of wastewater from some Cotonou hotels, International Journal of Innovation and Applied Studies, 23 : 227-234.

Soumia AMIR,2005, contribution a la valorisation de boues de stations d'épuration par compostage : devenir des micropolluants métalliques et organiques et bilan humique du compost; formation doctorale, Sciènes Agronomiques.

SS Chan, KS Khoo, KW Chew, TC Ling… Recent advances biodegradation and biosorption of organic compounds from wastewater: Microalgae-bacteria consortium-A review-Bioresource Technology, 2022.

Szklarek.S, Kiedrzyńska.E, Kiedrzyński.M… Comparing ecotoxicological and physicochemical indicators of municipal wastewater effluent and river water quality in a Baltic Sea catchment in Poland - … Indicators, 2021.

Swine lagoon effluent disposal by overland flow: effects on forage production and uptake of nitrogen and phosphorus. Agronomy Journal, 89 900-904.

Thanigaivel .S, AK Priya, L Gnanasekaran… … impact of wastewater treatment by emerging nanobiotechnological approach: Future strategy for efficient removal of contaminants and water purification- Sustainable Energy …, 2022.

UN Onuoha, PO Alaebo, GC Njoku… Aerobic Bioremediation of Brewery Effluent using Escherichia coli and Pseudomonas sp.- Asian Journal of …, 2022.

Ungureanu, N., Vlăduț, V., Voicu, G., 2020. Water Scarcity and Wastewater Reuse in Crop Irrigation. Sustainability 12, 9055. https://doi.org/10.3390/su12219055.

V Kumar, AK Chopra, A Kumar - A review on sewage sludge (Biosolids) a resource for sustainable agriculture. Archives of Agriculture and …, 2017.

Valeurs limites des rejets directs et indirects du Maroc, Ministère de l'Environnement du Maroc. « Normes marocaines, Bulletin officiel du Maroc, N° 6641 du 04 joumada oulla 1439. Rabat 22 janvier 2018.

Van der hoek W ; Ui Hassan M ; ensink j.H.J ; Feenstra S ; Raschid Sally l ;Munir s ; Aslam R ; Ali n ; Hussain R ; Mutsuno y, 2002, Urban wastewater : A valuable resource for agriculture. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka,Research Report no. 63.

Vanderboght P, (1992). « Systémes d'épuration par sol: mise en oeuvre de l'épandage des éffluents et dispositifs alternatifs ». Tribune de l'eau. Vol: 45 N°: 560. p: 67-76.

Vasel J.L, (1996). Epuration des eaux usées domestique par infiltration percolation,ful. Be. P 9.

VASEL J.L, (2007). Evolution de l'assainissement individuel : perspectives et questions en suspens, Journées Cebedeau, 15 p.

Venot JP,kuper M,Zwart eveen M,2018.Drip Irrigation for Agriculture.Untold Stories of Efficiency,Innovation and Development,2018-Routledge,358 pages.

Viau,E, §Peccia,J.(2009) . »Survey of wastewater indicators and human pathogen genomes in biosolids produced by class A and class B stabiliszation treatments . »Applied and environmental Microbiolodgy,74(1) 164-174.

Vilagines R, (2003). Eau, environnement et santé publique. Introduction à l'hydrologie, 2è édition, Editions Tec&Doc, 198 pages.

VO Lutta, JA Adeyemo, BTI Ong'or - Performance of Wastewater Stabilization Ponds: A Case Study of Nzoia Sugar Factory Wastewater Treatment Plant, Kenya. Int J Civ Eng, 2022.

Vymazal, J. The Historical Development of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. Land 2022, 11, 174. https://doi.org/10.3390/land11020174.

Waqas, S.; Bilad, M.R.; Huda, N.; Harun, N.Y.; Md Nordin, N.A.H.; Shamsuddin, N.; Wibisono, Y.; Khan, A.L.; Roslan, J. Membrane Filtration as Post-Treatment of Rotating

Biological Contactor for Wastewater Treatment. Sustainability 2021, 13, 7287. https://doi.org/10.3390/su13137287.

WORD WATER ASSESSEMENT PROGRAMME 2017, Rapport mondiale des NU sur la mise en valeur des ressources en eau « les eaux usées une ressource inexploité », chapitre 4.

World Health Organization. Guidelines for the Save Use of Wastewater, Excreta and Greywater—Volume 2: Wastewater Use in Agriculture; WHO: Geneva, Switzerland, 2006. [Google Scholar].

Y Ouarda, C Trellu, G Lesage, M Rivallin… Electro-oxidation of secondary effluents from various wastewater plants for the removal of acetaminophen and dissolved organic matter- Science of The Total …, 2020.

Y. Charbonnel, Manuel du lagunage à macrocytes en régions tropicales A.C.C.T. Paris 1989, p359-370.

Y. LIBES, (2010) : « Les eaux usées et leur épuration».

Yeasmin, F., Rasheduzzaman, M., Manik, M., Hasan, M.M. (2023). Activated Sludge Process for Wastewater Treatment. In: Shah, M.P. (eds) Advanced and Innovative Approaches of Environmental Biotechnology in Industrial Wastewater Treatment. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-2598-8_2.

Z Zhang, G Huang, Y Li, X Chen, Y Yao, S Ren… Electrically conductive inorganic membranes: A review on principles, characteristics and applications- Chemical Engineering …, 2022.

ZERHOUNI J et al ,June 2015,qualite et facteurs de risque de pollution des eaux souterraines periurbaines de la ville de sebaa ayoune (meknes, maroc) Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°22, pp. 91-107.

Zhang,T.,He.x.,Yan,G.(2020).The Influence of Protozoa Community Structure on Activated Sludge Properties in wastewater Treatment Plants .Science of The Tolal Environment ,709,136-213.DIO:10.1016/j.sctotenv.2019.136213.

Zubaidi, S.L.; Ortega-Martorell, S.; Al-Bugharbee, H.; Olier, I.; Hashim, K.S.; Gharghan, S.K.; Kot, P.; Al-Khaddar, R. Urban Water Demand Prediction for a City That Suffers from Climate Change and Population Growth: Gauteng Province Case Study. Water 2020, 12, 1885. https://doi.org/10.3390/w12071885.

Annexes

Annexe 1 : Norme de qualité recommandées en éléments traces dans les eaux usées épurées destinées à l'irrigation au Maroc (S, E, E, E, 2007).

Paramètres	**Valeurs limites en (mg/l)**
Aluminium	5.0
Arsenic	0.10
Béryllium	0.10
Bore	3
Cadmium	0.01
Chrome	1
Cobalt	0,5
Cuivre	2
Fluor	1.0
Fer	1
Plomb	5.0
Lithium	2.5
Manganèse	0.2
Molybdène	0.01
Nickel	2
Sélénium	0.02
Vanadium	0.1
Zinc	2.0

Annexe 2: Normes de rejets marocaines

قرار مشترك لوزير الداخلية ووزير الصناعة والاستثمار والتجارة والاقتصاد الرقمي ووزير التجهيز والنقل واللوجيستيك والماء ووزير الطاقة والمعادن والتنمية المستدامة ووزير السياحة والنقل الجوي والصناعة التقليدية والاقتصاد الاجتماعي رقم 3286.17 صادر في 13 من ذي الحجة 1438 (4 سبتمبر 2017) بتغيير القرار المشترك رقم 2942.13 الصادر في فاتح ذي الحجة 1434 (7 أكتوبر 2013) بتعيين الحدود القصوى العامة للصب في المياه السطحية أو الجوفية.

البرامترات	الحدود القصوى العامة للصب في المياه السطحية أو الجوفية
Température (°C)	30
pH	5.5-9.5
MES (mg/l)	100
Azote kjeldhal (mg /l)	40
Phosphore total (mg /l)	15
DCO (mg O_2/l)	500
DBO_5 (mg O_2/l)	100
Chlore actif (Cl_2) (mg/l)	0.2
Dioxyde de chlore (ClO_2) (mg/l)	0.05
Aluminium (Al) (mg/l)	10
Détergents (anionique, cationique et ionique) (mg/l)	3
Conductivité électrique (µS/cm)	2700
Salmonelles/5000 ml	Absence
Vibrions cholériques/5000 ml	Absence
Cyanures libres (CN^-) (mg/l)	0.5
Sulfates (SO_4^{2-}) mg/l	600
Sulfures libres (S^{2-}) (mg/l)	1
Fluorures (F^-) (mg/l)	20
Indice de Phénols (mg/l)	0.5
Hydrocarbures par Infra-rouge (mg/l)	15
Huiles et graisses (mg/l)	30
Antimoine (Sb) (mg/l)	0.3
Argent (Ag) (mg/l)	0.1
Arsenic (As) (mg/l)	0.1
Baryum (Ba) (mg/l)	1
Cadmium (Cd) (mg/l)	0.25
Cobalt (Co) (mg/l)	0.5
Cuivre total (Cu) (mg/l)	2
Mercure total (Hg) (mg/l)	0.05
Plomb total (Pb) (mg/l)	1
Chrome total (Cr) (mg/l)	2
Chrome hexavalent (Cr^{6+}) (mg/l)	0.2
Etain total (Sn) (mg/l)	2.5
Manganese (Mn) (mg/l)	2
Nickel total (Ni) (mg/l)	5
Sélénium (Se) (mg/l)	0.1
Zinc total (Zn) (mg/l)	5
Fer (Fe) (mg/l)	5
AOX(mg/l)	5

DCO : demande chimique en oxygène Matières En Suspension

MES : Matières En Suspension

DBO5 = Demande Biochimique en oxygène durant cinq (5) jours

AOX = Composés organo-halogénés adsorbables sur charbon actif

Valeurs limites de rejet des eaux de surface ou de profondeurs dans l'environnement au Maroc