

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

NATIONAL HIGHER SCHOOL FOR  
HYDRAULICS

"The MujahidAbdellah ARBAOUI"



المدرسة الوطنية العليا للري

"المجاهد عبد الله عرباوي"

ⵓⵔⵓⵎ ⵙⵓⵎⵓⵎ ⵏ ⵏⵓⵎⵓⵎ ⵏ ⵏⵓⵎⵓⵎ

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

*Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Hydraulique*

**Option : REUTILISATION DES EAUX NON CONVENTIONNELLES**

**THEME :**

**TRAITEMENT TERTIAIRE DES EAUX USEES DE  
LA STEP DE BENI MERED –ETUDE EXPERIMENTALE-**

**Présenté par :**

**YAHIAOUI Syrine**

**Devant les membres du jury**

<b>Nom et Prénoms</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
DERNOUNI YOUCEF	M.A.A	Président
KHALED HOULI SAMIA	M.A.A	Examinatrice
BOUZIANE OMAR	M.A.A	Examineur
HACHEMI ABDELKADER	M.C.A	Promoteur
CHADOULI Mohamed	Chef de laboratoire	Co-promoteur

**Session : Septembre 2024**

# **Remerciement**

*Je tiens tout d'abord à exprimer ma gratitude à Allah, le Tout-Puissant et Miséricordieux, et à dire « Alhamdoulillah ». Grâce à Lui, j'ai reçu la force, la santé, la volonté et la patience nécessaires pour accomplir ce modeste travail. Je suis profondément reconnaissant pour Son aide miséricordieuse tout au long de mes années d'étude.*

*Je souhaite adresser mes sincères remerciements à Mr. Hachemi Abdelkader, mon encadrant, pour sa disponibilité, ses conseils avisés, et son soutien précieux qui ont grandement contribué à la réalisation de ce travail.*

*Je remercie également M. CHADOULI Mohamed, mon co-promoteur, pour ses encouragements et son accompagnement tout au long de ce projet*

*Je remercie Mlle. CHAOUICHE Meriem, doctorante à l'École Nationale Supérieure d'Hydraulique, pour son aide inestimable et son soutien constant, sans lesquels ce mémoire n'aurait pu voir le jour.*

*Je remercie chaleureusement le chef de la Station d'Épuration de Beni Mered ainsi que toute son équipe pour leur aide et leur disponibilité lors de mes visites et recherches sur le terrain.*

*Je tiens aussi à exprimer ma gratitude à toute l'équipe du laboratoire de l'école pour leur collaboration et leur soutien technique tout au long de mes travaux.*

*Je remercie également les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer mon travail, ainsi que tous les enseignants de l'École Nationale Supérieure d'Hydraulique pour avoir contribué à ma formation.*

# *Dédicace*

*Je dédie ce travail accompagné d'un profond amour :*

*A celle qui m'a arrosé de tendresse et d'espoirs, la source d'amour  
inconditionnel qui m'a béni par ses prières, ma chère maman.*

*A mon support dans la vie, qui m'a appris, m'a supporté et m'a dirigé vers le  
bon chemin, .... Mon cher papa*

*A mes chères sœurs Hibatallah et Sabrine.*

*A mon cher frère : Mohammed zohire.*

*Je le dédie aussi à mes collègues de promotion 2023/2024*

*A tous mes professeurs depuis mon école primaire jusqu'à mes études  
universitaires*

*Finalement aux personnes qui m'ont de près ou de loin soutenu dans les  
moments de faiblesse.*

**SYRINE**

تقدم هذه المذكرة دراسة تجريبية حول المعالجة الثلاثية لمياه الصرف الصحي في محطة معالجة المياه بيني مراد. يتمثل الهدف الرئيسي في إدماج مرشح رملي لتحسين جودة المياه المعالجة وخاصة من أجل إعادة استخدامها في السقي.

تشمل الدراسة تحليلاً شاملاً لمراحل المعالجة بالمحطة وكذلك اختبارات حول أداء المرشح الرملي المقترح. أظهرت النتائج تحسناً ملحوظاً في معايير جودة المياه بعد الترشيح مع انخفاض واضح في التعكر والمواد العالقة والطلب الكيميائي على الأكسجين.

**الكلمات المفتاحية:** المعالجة الثلاثية، مرشح رملي، إعادة استخدام المياه، محطة معالجة مياه الصرف الصحي، جودة المياه.

## Résumé

Ce mémoire présente une étude expérimentale sur le traitement tertiaire des eaux usées à la Station d'Épuration de Beni Mered. L'objectif principal est l'intégration d'un filtre à sable pour améliorer la qualité de l'eau traitée, notamment en vue de sa réutilisation en irrigation. L'étude comprend une analyse approfondie des étapes de traitement de la station, ainsi que des tests sur la performance du filtre à sable proposé. Les résultats montrent une amélioration significative des paramètres de qualité de l'eau après filtration, avec des réductions notables de la turbidité, des matières en suspension, et de la DCO. Toutefois, il est important de noter que la qualité de l'eau traitée par la station, avant l'ajout du filtre à sable, ne respecte pas pleinement les normes de réutilisation, mettant en évidence la nécessité de ce traitement supplémentaire pour garantir une eau conforme aux standards requis.

**Mots Clés :** Traitement tertiaire, Filtre à sable, Réutilisation des eaux, Station d'Épuration, Qualité de l'eau.

## Abstract

This thesis presents an experimental study on the tertiary treatment of wastewater at the Beni Mered Treatment Plant. The primary aim is the integration of a sand filter to enhance the quality of treated water, particularly for reuse in irrigation. The study provides a detailed analysis of the treatment steps at the plant and experimental tests on the performance of the proposed sand filter. Results demonstrate a significant improvement in water quality parameters, with notable reductions in turbidity, suspended solids, and COD after filtration.

**Keywords:** Tertiary treatment, Sand filter, Water reuse, Wastewater treatment plant, Water quality.

## Liste des figures

<b>Figure I.1:</b> Localisation de Beni Mered et ses zones avoisinantes .....	4
<b>Figure I.2:</b> Pluviométrie mensuelle moyenne à Beni Mered (2016-2023) .....	6
<b>Figure I.3:</b> Températures mensuelles moyennes, minimales et maximales à Beni Mered (2016-2023) .....	7
<b>Figure I.4:</b> Moyennes mensuelles de la vitesse des vents à Beni Mered (2016-2023) .....	8
<b>Figure I.5:</b> Variation des Heures de Clarté au Cours des Jours .....	9
<b>Figure I.6:</b> Dégrilleur automatique fin .....	12
<b>Figure I.7:</b> Ligne de dessableur–déshuileur .....	13
<b>Figure I.8:</b> Tamis rotatif .....	13
<b>Figure I.9:</b> Stockage des Sables .....	14
<b>Figure I.10:</b> Stockage des Sables .....	14
<b>Figure I.11:</b> Décanteur primaire .....	15
<b>Figure I.12:</b> Bassin d'aération .....	17
<b>Figure I.13:</b> Décanteur secondaire .....	18
<b>Figure I.14:</b> Stabilisateur de la boue .....	21
<b>Figure I.15:</b> Zone de stockage des boues déshydratées .....	23
<b>Figure II. 1:</b> Schéma général des usages de l'eau réutilisée .....	26
<b>Figure III .1:</b> Elimination biologique de l'azote .....	37
<b>Figure III .2:</b> Filtre à sable rapide .....	51
<b>Figure IV.1:</b> Pilote de filtration gravitaire sur sable .....	56
<b>Figure IV.2:</b> Mesure du PH .....	60
<b>Figure IV.3:</b> Mesure de la conductivité .....	61
<b>Figure IV.4:</b> Mesure de la turbidité .....	62
<b>Figure IV.5:</b> Rampe jetable + Pompe à vide .....	63
<b>Figure IV.6:</b> Des filtres .....	64
<b>Figure IV.7:</b> Etuve de séchage .....	64
<b>Figure IV.8 :</b> Pesée d'un filtre .....	65
<b>Figure IV.9:</b> Dispositif de mesure de la DBO5 .....	66
<b>Figure IV.10:</b> Préparation des réactifs .....	68
<b>Figure IV.11:</b> Titration par sulfate de fer et d'ammonium .....	68
<b>Figure IV.12:</b> Variation de MES avant et après filtration .....	70
<b>Figure IV.13:</b> Variation de la DCO avant et après filtration .....	71
<b>Figure IV.14:</b> Variation de la DBO5 avant et après filtration .....	71
<b>Figure IV.15:</b> Les pertes de charge dans le tube piézométrique le plus haut et le plus bas .....	77
<b>Figure V.1:</b> Représentation 3D d'un filtre à sable rapide .....	81
<b>Figure V.2:</b> Système de vidange sous filtre à sable .....	81

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1:</b> Pluviométrie mensuelle moyenne à Beni Mered (2016-2023) .....	5
<b>Tableau I.2:</b> Jours de pluie à Beni Mered (2016-2023).....	6
<b>Tableau I.3:</b> Températures mensuelles moyennes, minimales et maximales à Beni Mered (2016/2023).....	7
<b>Tableau I.4:</b> Moyennes mensuelles de la vitesse des vents à Beni Mered (2016/2023) .....	8
<b>Tableau I.5:</b> Heures de Clarté en Fonction des Jours à Beni Mered (2016-2023) .....	9
<b>Tableau I.6:</b> L'humidité relative mensuelle moyenne à Beni Mered (2016-2023) .....	9
<b>Tableau I.7:</b> Données de base de la STEP.....	10
<b>Tableau I.8:</b> Caractéristique dimensionnelle du décanteur primaire .....	14
<b>Tableau I.9:</b> Rendement épuratoire des décanteurs primaires.....	15
<b>Tableau I.10:</b> Caractéristique dimensionnelles du bassin d'aération de la STEP de Beni Mered .....	16
<b>Tableau I.11:</b> Caractéristiques des clarificateurs .....	18
<b>Tableau I.12:</b> Caractéristiques d'épaisseur gravitaire .....	20
<b>Tableau I.12 ( Suite )</b> .....	21
<b>Tableau I.13:</b> Caractéristiques des filtres à bande .....	22
<b>Tableau II.1:</b> Les paramètres microbiologiques journal officiel de la République Algérienne. ....	29
<b>Tableau II.1 (Suite)</b> .....	30
<b>Tableau II.2:</b> Les paramètres physico-chimiques.....	30
<b>Tableau II.2 (Suite)</b> .....	31
<b>Tableau II. 3:</b> Les paramètres toxiques .....	31
<b>Tableau II. 3 ( Suite )</b> .....	32
<b>Tableau II.4:</b> Liste Des cultures pouvant être irriguées avec des eaux usées épurée.....	32
<b>Tableau II.4 ( Suite )</b> .....	33
<b>Tableau III. 1:</b> Performances (en %) des différents traitements tertiaires .....	36
<b>Tableau III.2:</b> Traitement tertiaire pour l'élimination des métaux lourds .....	41
<b>Tableau III.3:</b> Les avantages et les inconvénients du chlore - UV – ozone.....	45
<b>Tableau III.3 ( Suite )</b> .....	46
<b>Tableau IV.1:</b> Paramètres de Pression, Hauteur du Sable et Prises de Pression .....	56
<b>Tableau IV.2:</b> Résultat de l'étude du lit de Sable à 50 l/h avec l'eau de Robinet .....	57
<b>Tableau IV. 3:</b> Résultat de l'Étude sur le Lit de Sable à 80 l/h avec Eau de Robinet.....	57
<b>TableauIV.4:</b> Mesure de la température .....	59
<b>Tableau IV. 5:</b> Résultats de la Qualité de l'Eau Avant Filtration .....	69

<b>Tableau IV. 6:</b> Résultats de la Qualité de l'Eau après Filtration .....	69
<b>Tableau IV.7:</b> Mesure de la turbidité après filtration .....	69
<b>TableauIV.8:</b> Résultats de l'étude du lit de sable avec les eaux usées .....	74
<b>TableauV.1:</b> Caractéristique du filtre a sable rapide .....	80
<b>TableauV.2:</b> Propriétés du lit de filtration .....	83
<b>TableauV.3:</b> Fiche technique du système de drainage .....	86
<b>TableauV.4:</b> Caractéristique des fluides du rétro-lavage.....	88
<b>TableauV.5:</b> Fiche technique de filtre sable .....	90

## Liste des planches

**Planche n°1** : Plan de masse de la station d'épuration de Beni Mered

**Planche n°2** : Plan de filtre à sable proposé pour la station d'épuration de Beni Mered (wilaya de BLIDA)

**Planche n°3** : Plan d'intégration du filtre à sable et du bassin de désinfection dans la station d'épuration de Beni Mered



## Liste des abréviations

Abréviations	Significations
STEP	Station d'Épuration
PR	Poste de refoulement
ONA	Office National de l'Assainissement.
ANRH	Agence Nationale des Ressources Hydrauliques
ONM	Office national de la météorologie
MES	Matières en suspension
DBO	Demande biochimique en oxygène
DBO5	Demande biochimique en oxygène pendant 5 jours
DCO	Demande chimique en oxygène
T	Température.
°C	Degré Celsius
Eq.H	Equivalent habitant
N	Azote
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Azote ammoniacal
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Nitrates
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Nitrites
NTK	Azote total Kjeldahl
PH	Potentiel Hydrogène
O <sub>2</sub>	Oxygène
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Bicarbonate
EBPR	Élimination Biologique Améliorée du Phosphore

PAO	Organismes accumulant le phosphate
MF	Microfiltration
UF	Ultrafiltration
NF	Nanofiltration
OI	Osmose inverse
I-O-B	Polluants inorganiques-organiques-biologiques
Pdc	Perte de charge
Hte	Hauteur totale de l'eau
H	Pression statique
E	Hauteur de la prise de mesure
P	Pression dynamique
L	Niveau du liquide lu dans le tube piézométrique
Hsp	La hauteur du sable a une prise de pression
Hs	La hauteur du sable

# Table de matières

<i>Remerciement</i> .....	
<i>Dédicace</i> .....	
Liste des figures .....	I
Liste des tableaux.....	II
Liste des planches .....	IV
Liste des abréviations.....	V
Table de matières .....	V
<u>Introduction générale</u> .....	1
<u>Chapitre I :</u> .....	3
<u>Présentation de la station d'épuration de Beni Mered</u> .....	3
I.Introduction .....	4
I.1.Situation géographique .....	4
I.2.Caractéristiques sismiques.....	5
I.3.Aperçu climatique.....	5
I.3.1. Pluviométrie.....	5
I.3.2. Température.....	6
I.3.3. Les vents .....	8
I.3.4. Soleil .....	8
I.3.5. Humidité relative .....	9
I.4. Présentation de la station d'épuration de Beni Mered .....	10
I.4.1. Donnés de base de la STEP .....	10
I.4.2. Traitement des eaux usées .....	11
I.4.2.1. Prétraitement.....	11
I.4.2.1.1 Dégrillage .....	11
I.4.2.1.2 Dessablage et déshuilage .....	12
I.4.2.2 Traitement primaire .....	14
I.4.2.3 Traitement secondaire.....	15
I.4.2.4 Clarificateur (décantation secondaire).....	17
I.4.2.5 Traitement tertiaire .....	19
I.4.3. Traitement de boue .....	19
I.4.3.1. Extraction des boues en excès .....	19
I.4.3.2. Bâche de mélange .....	19

I.4.3.3. Épaississement gravitaire.....	20
I.4.3.4. Stabilisation des boues.....	21
I.4.3.5. Déshydratation des boues .....	21
I.4.3.6. Stockage des boues déshydratées .....	22
Conclusion .....	23
Chapitre II : .....	24
La réutilisation des eaux usées traitées en Algérie.....	24
II.Introduction .....	25
II.1. Définition de la réutilisation des eaux usées traitées.....	25
II.2. Objectif de la réutilisation des eaux usées traitées .....	25
II.3. Les différents usages de la réutilisation des eaux usées traitées.....	26
II.3.1. Agriculture .....	26
II.3.2. Réutilisation en industrie.....	27
II.3.3. Recharge de nappes souterraines.....	27
II.4. Situation de la réutilisation des eaux usées traitées en Algérie .....	28
II.5. Description des normes fixant les modalités d'utilisation des eaux usées épurées.....	29
II.6. Normes algériennes de qualité des eaux destinées à l'irrigation .....	29
II.6.1. Paramètres microbiologiques .....	29
II.6.2. Paramètres physico-chimiques .....	30
II.6.3. Les paramètres toxicologiques .....	31
II.7 Les cultures pouvant être irriguées avec des eaux usées épurées.....	32
Conclusion .....	33
Chapitre III : .....	34
Traitement tertiaire des eaux usées .....	34
III. Introduction.....	35
III .1 Le but du traitement tertiaire.....	35
III.2 Elimination des MES et de la matière organique.....	36
III .3. Elimination de l'Azote et du Phosphore .....	37
III.3.1. Elimination de l'azote .....	37
III.3.1.1. Réactions de transformation de l'azote .....	37
A. Ammonification .....	38
B. Assimilation .....	38
C. Nitrification .....	38
D. Dénitrification .....	38
III .3.2. Elimination du phosphore .....	39
III .3.2.1. Précipitation chimique .....	39
III .3.2.2. Élimination biologique améliorée du phosphore (EBPR).....	39

III .3.2.3. Filtration membranaire.....	40
III .4. Elimination des métaux lourds.....	41
III .4.1. Oxydation.....	41
III .4.2. Échange d'ions .....	42
III .4.3. Adsorption.....	42
III .4.4. Procédé membranaire.....	42
III .5. Désinfection .....	43
III .5.1. Chloration .....	43
III .5.2. Dioxyde de chlore .....	44
III .5.3. Ozonation.....	44
III .5.4. Désinfection aux Ultraviolets.....	45
III .6. Les avantages et les inconvénients du chlore - UV – ozone .....	45
III .7. La filtration .....	46
III .7.1. Historique.....	46
III .7.2. Différents types de filtre .....	47
III .7.2.1. Les filtres lents à sable .....	47
III .7.2.2. Filtres rapides.....	47
III .7.2.2.1. Lavage des filtres rapides.....	48
III .7.2.3. Filtres sous pression .....	49
III .7.2.4. Microtamisage.....	49
III.7.2.5. Filtration sur charbon activé .....	49
III .7.3. Règles générales prises en compte dans le système de drainage souterrain .....	51
Conclusion .....	52
Chapitre IV :.....	53
Étude expérimentale.....	53
IV. Introduction.....	54
IV.1. Principe et théorie .....	54
IV.2. Mode opératoire.....	54
A-Remplissage de la cuve d'alimentation .....	55
B-Fermeture de la vanne de vidange : .....	55
C-Remplissage de la colonne de filtration .....	55
D-Mesure des hauteurs des prises de pression (e) : .....	55
E-Calcul de la pression statique .....	55
F- Calcul des pertes de charge : .....	55
IV.3. Calcul de la Porosité du Sable .....	56
IV.4. Analyse des Paramètres de Qualité de l'Eau Avant et Après Filtration .....	58
IV.4.1. Échantillonnage et Préparation des Échantillons .....	58
IV.4.2. Méthodologie de Mesure des Paramètres de Qualité.....	58

IV.4.2.2. Mesure du PH .....	59
A. Matériel et Réactifs utilisé .....	59
B. Protocole .....	59
IV.4.2.3. Mesure de la conductivité .....	60
A. Matériel et réactif nécessaire .....	60
B. Protocole .....	60
IV.4.2.4. Mesure de la turbidité .....	61
A. Matériel et réactif nécessaire .....	61
B. Protocole .....	61
IV.4.2.5. Mesure de MES (Matière en suspensions).....	62
A. Matériel et réactifs utilisé .....	62
B. Protocole .....	62
C. Calcul .....	63
IV.4.2.6. Mesure de la DBO .....	65
A. Matériel et réactifs utilisé .....	65
B. Protocole .....	65
IV.4.2.7. Mesure de la DCO .....	66
A. Matériel et réactifs utilisé .....	66
B. Protocole .....	67
C. Calcul .....	67
IV.5. Présentation des Résultats.....	68
IV.5.1. Résultats de la Qualité de l'Eau Avant Filtration .....	69
IV.5.2. Résultats de la Qualité de l'Eau après Filtration .....	69
IV.5.3. Graphiques des paramètres de qualité de l'eau.....	70
IV.6. Discussion.....	71
IV.6.1. Conductivité.....	71
IV.6.2. PH .....	72
IV.6.3. Demande Chimique en Oxygène (DCO) .....	72
IV.6.4. Demande Biochimique en Oxygène (DBO5) .....	72
IV.6.5. Matières en Suspension (MES).....	72
IV.6.6. Turbidité .....	73
IV.7. Colmatage et Besoin de Nettoyage .....	73
IV.8. Analyse des pertes de charge .....	73
Conclusion .....	78
Chapitre V : .....	79
Dimensionnement du filtre à sable et du bassin de désinfection.....	79
V. Introduction.....	80
V.1. Dimensionnement du filtre à sable.....	80

V.1.1. La surface du lit de sable.....	82
V.1.2. Nombre des filtres .....	82
V.1.3. Nombre des filtres de réserve.....	82
V.1.4. La largeur (b) et la longueur (L) du filtre.....	82
V.1.5. Hauteur de la couche filtrante .....	83
V.1.6. Les pertes de charge .....	83
V.2.Dimensionnement du système de drainage .....	84
V.2.1. Surface des perforations .....	84
V.2.2. La surface des latéraux.....	84
V.2.3. La surface du collecteur .....	84
V.2.4. Diamètre du collecteur .....	84
V.2.5. L'espacement des canalisations latérales.....	84
V.2.6. Le nombre de latéraux.....	84
V.2.7. La longueur de chaque latéral .....	85
V.2.8. Le diamètre des perforations .....	85
V.2.9. Surface d'une perforation.....	85
V.2.10. Nombre total des perforations .....	85
V.2.11. Nombre des perforations par latéral .....	85
V.2.12. Espacement des perforations.....	85
V.2.13. La surface de perforation dans chaque latéral .....	86
V.2.14. La surface d'un latéral.....	86
V.2.15. Le diamètre des Latéraux .....	86
V.2.16. Vérification du rapport.....	86
V.3.Dimensionnement du rétro-lavage .....	87
V.3.1. La vitesse de sédimentation de l'eau du média filtrant.....	87
V.3.2. La vitesse de sédimentation de l'air du média filtrant.....	88
V.3.3. Le débit de lavage .....	89
A. Débit d'eau de lavage.....	89
B. Débit d'air de lavage .....	89
V.3.4. La perte de charge du média filtrant.....	89
A. La perte de charge de l'eau du média filtrant.....	89
B. La perte de charge de l'air du média filtrant .....	89
V.3.5. La durée d'une phase de rétro lavage.....	90
V.3.6. Le volume nécessaire à la phase de rétro-lavage.....	90
A. Le volume d'eau à la phase de rétro-lavage .....	90
B. Le volume d'air à la phase de rétro-lavage .....	90
V.4.Dimensionnement d'un bassin de désinfection par ozonation .....	91
V.4.1. Dose de l'ozone à injecter .....	92
V.4.2. Le volume du bassin de désinfection (V).....	92

V.4.3. La hauteur du bassin.....	92
V.4.4. La surface horizontale ( $S_h$ ).....	92
V.4.5. La largeur(b) et la longueur (L) du bassin.....	92
V.4.6.Le choix de la pompe doseuse .....	93
Conclusion .....	93
Conclusion générale .....	94
Références bibliographiques .....	96



# **Introduction générale**

## *Introduction générale*

L'accès durable aux ressources en eau est une préoccupation majeure dans tous les pays du monde. L'Algérie est l'un des pays de la méditerranée touchés par le stress hydrique. Elle est classée dans la catégorie des pays pauvres en cette matière, soit en dessous du seuil théorique de rareté fixé à 1000 m<sup>3</sup> /hab. /an. En revanche, les ressources actuelles sont affectées par plusieurs facteurs parmi : les changements climatiques, la demande croissante de la population, le manque des ouvrages d'immobilisation des ressources hydrique ainsi que le phénomène de pollution des eaux souterraines et superficielles par différentes activités humaines. Cependant, les eaux des pluies, des barrages et des forages restent insuffisantes pour satisfaire les besoins de la population actuelle et aller avec le développement croissant des activités industrielles et urbaines. L'Algérie a dû relever le défi pour faire face à cette situation critique. Elle a adopté un plan national de l'eau jusqu'à l'horizon 2025, à travers la mise en place d'une politique de gestion de ces ressources hydriques, afin de faire sortir le pays de cette situation, assurer la durabilité des ressources et garantir une bonne gouvernance de l'eau, dans un contexte de développement durable. Ce qui explique de nos jours, l'ambition de l'Algérie de traiter un milliard de mètres cube d'eaux usées.[1]

Dans ce contexte, la réutilisation des eaux usées traitées émerge comme une solution cruciale pour améliorer la qualité des effluents traités et permettre leur réutilisation dans divers secteurs, tels que l'agriculture et l'industrie. En 2021, l'Algérie a réutilisé environ **605 millions de m<sup>3</sup>** d'eaux usées, permettant l'irrigation de **16 000 hectares**. En effet, l'intégration de techniques avancées de traitement tertiaire, telles que la filtration sur sable et la désinfection, peut significativement contribuer à la gestion durable des ressources en eau et à la réduction de la pression sur les ressources naturelles limitées. Ce mémoire se concentre sur l'évaluation et l'optimisation de ces procédés dans le cadre de la station de traitement des eaux usées de Beni Mered, avec l'objectif de proposer des améliorations adaptées aux besoins spécifiques de la région.

# **Chapitre I :**

## **Présentation de la station d'épuration de Beni Mered**

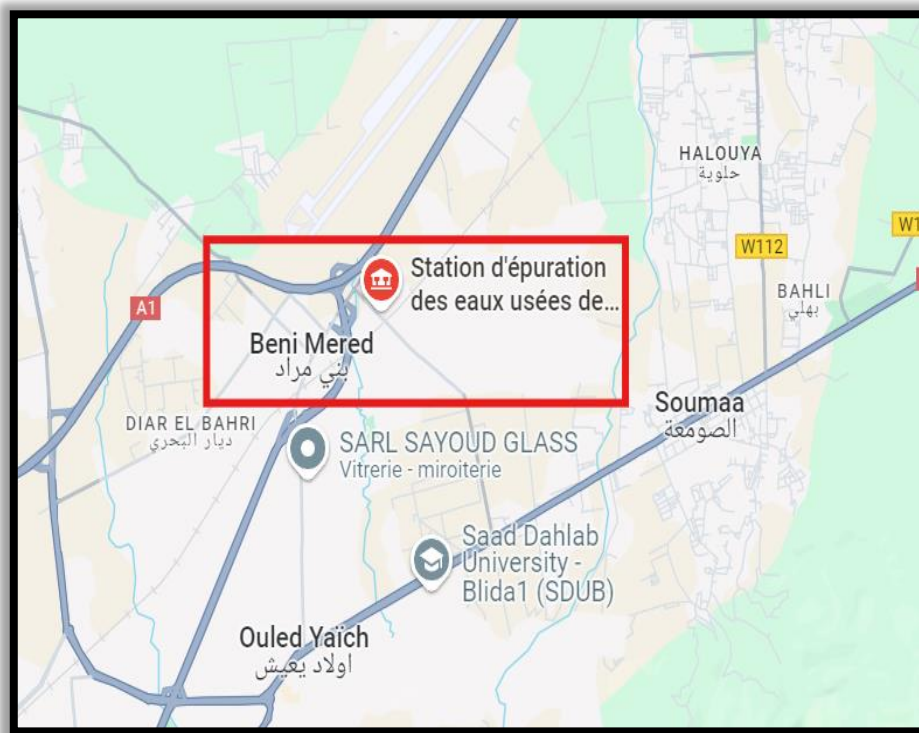
**I.Introduction**

Dans ce chapitre, nous allons présenter en détail la zone d'étude, en mettant l'accent sur ses caractéristiques géographiques, sismiques et climatiques. Nous poursuivrons avec une description de la station d'épuration, en détaillant les différentes étapes de traitement mises en œuvre pour assurer une gestion efficace des eaux usées.

**I.1.Situation géographique**

La commune de Beni Mered est située au centre de la wilaya de Blida, à environ 5 km au nord-est de Blida et à environ 40 km au sud-ouest de la capitale et à environ 30 km au nord-est de Médéa.

Cette ville a pour coordonnées géographiques : Latitude 36° 31' 26 " Nord Longitude : 2° 51' 40 " Est, l'altitude par rapport au niveau de la mer : 136 m et couvre une superficie de 15,72 km<sup>2</sup>.



**Figure I.1:** Localisation de Beni Mered et ses zones avoisinantes

( <https://urlz.fr/sbzx> )

**I.2. Caractéristiques sismiques**

L'Algérie est découpée en cinq zones sismiques, sont

-Zone 0 : sismicité négligeable.

-Zone 1 : sismicité faible

-Zone 2 : sismicité moyenne

-Zone 3 : sismicité élevée.

La région de Blida, de par sa situation sur la bordure sud du bassin sismogène de la Mitidja, connaît une sismicité plutôt modérée. Elle est classée en zone III dans le zonage sismique du Nord de l'Algérie (Règles Parasismiques Algériennes, CGS, 1999, révisées en 2003) [2].

**I.3. Aperçu climatique**

Le climat de Béni Mered est considéré comme tempéré chaud. En hiver, les précipitations sont plus abondantes par rapport à l'été. En hiver, les pluies sont bien plus importantes à Beni Mered qu'elles ne le sont en été. Il tombe en moyenne 718 mm de pluie par an.

**I.3.1. Pluviométrie**

Les valeurs de précipitation sont représentées dans le tableau suivant :

**Tableau I.1:**Pluviométrie mensuelle moyenne à Beni Mered (2016-2023)

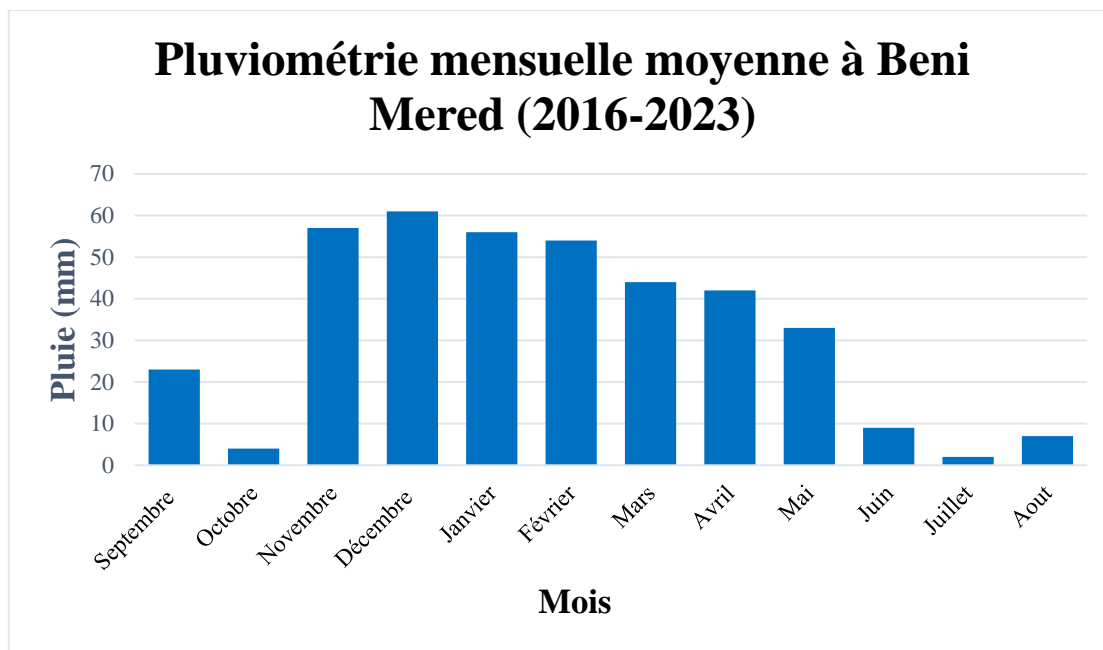
	Sept	Oct	Nov	Déc	janv	fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Pluie (mm)	23.2	37.7	57	61.1	55.8	55.7	44.1	42	32.8	9.5	2.5	7.1

Source : Weather spark

Beni Mered connaît des variations saisonnières considérables en ce qui concerne les précipitations de pluie mensuelles

La période pluvieuse de l'année dure 9,4 mois, du 29 août au 10 juin, . Le mois le plus pluvieux à Beni Mered est décembre, avec une chute de pluie moyenne de 61.1 mm.

La période sèche à Beni Mered dure 2,6 mois, du 10 juin au 29 août. Le mois le moins pluvieux à Beni Mered est juillet, avec une chute de pluie moyenne de 2.5 mm.



**Figure I.2:**Pluviométrie mensuelle moyenne à Beni Mered (2016-2023)

**Tableau I.2:** Jours de pluie à Beni Mered (2016-2023)

	Sept	Oct	Nov	Déc	janv	fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Pluie (jours)	4.2	5.7	7.4	7.3	7.3	7	6.2	5.5	4.9	1.8	0.7	1.5

Source : Weather spark

Le mois ayant le plus grand nombre de jours de précipitation à Beni Mered est *novembre*, avec une moyenne de 7,4 jours.

Le mois ayant le moins de jours de précipitation à Beni Mered est juillet, avec une moyenne de 0,7 jour.

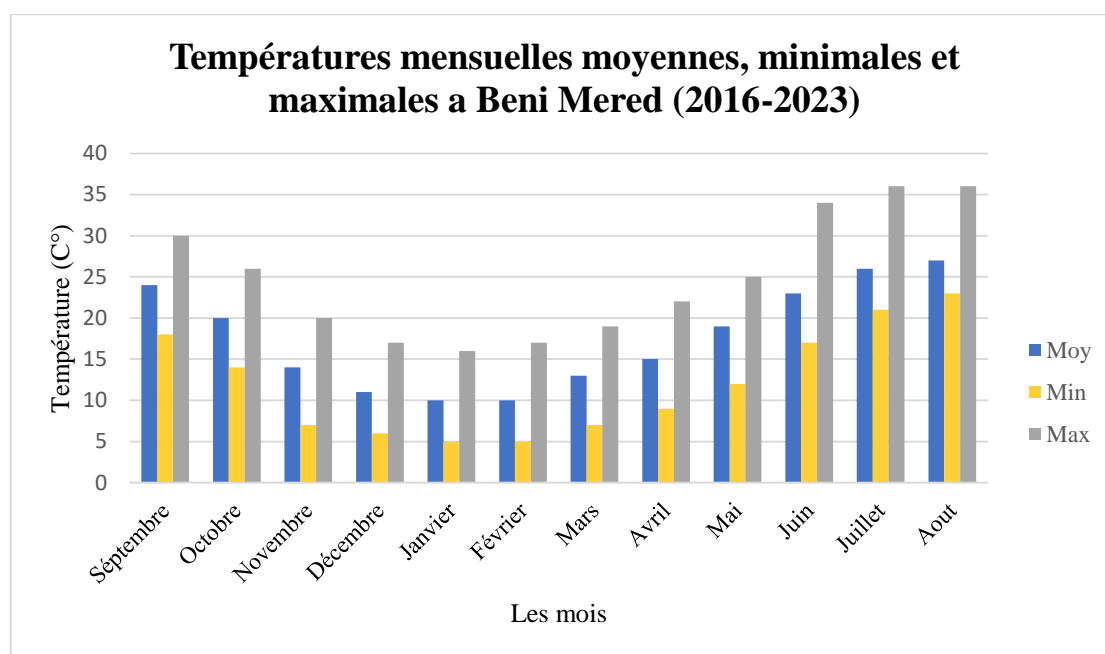
**I.3.2. Température**

Les données de la température sont représentées comme suite :

**Tableau I.3:**Températures mensuelles moyennes, minimales et maximales à Beni Mered (2016/2023)

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	jan	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout
<b>T moy (C°)</b>	24	20	14.1	11.4	10	10	13	15	19	23	26	27
<b>T min (C°)</b>	18	14	7	6	5.0	5.0	7.0	9	12	17.0	21	23
<b>T max (C°)</b>	30	26	20	17	16	17	19	22	25	34	36	36

Source : ONM



**Figure I.3:**Températures mensuelles moyennes, minimales et maximales à Beni Mered (2016-2023)

La saison très chaude dure 2,9 mois, du juin à septembre, avec une température quotidienne moyenne maximale supérieure à 30 °C. Le mois le plus chaud à Beni Mered est août, avec une température moyenne maximale de 36 °C et minimale de 23 °C.

La saison fraîche dure 4,0 mois, du novembre à mars, avec une température quotidienne moyenne maximale inférieure à 20 °C. Le mois le plus froid de l'année à Beni

Mered est *janvier*, avec une température moyenne minimale de 5 °C et maximale de 16 °C.

**I.3.3. Les vents**

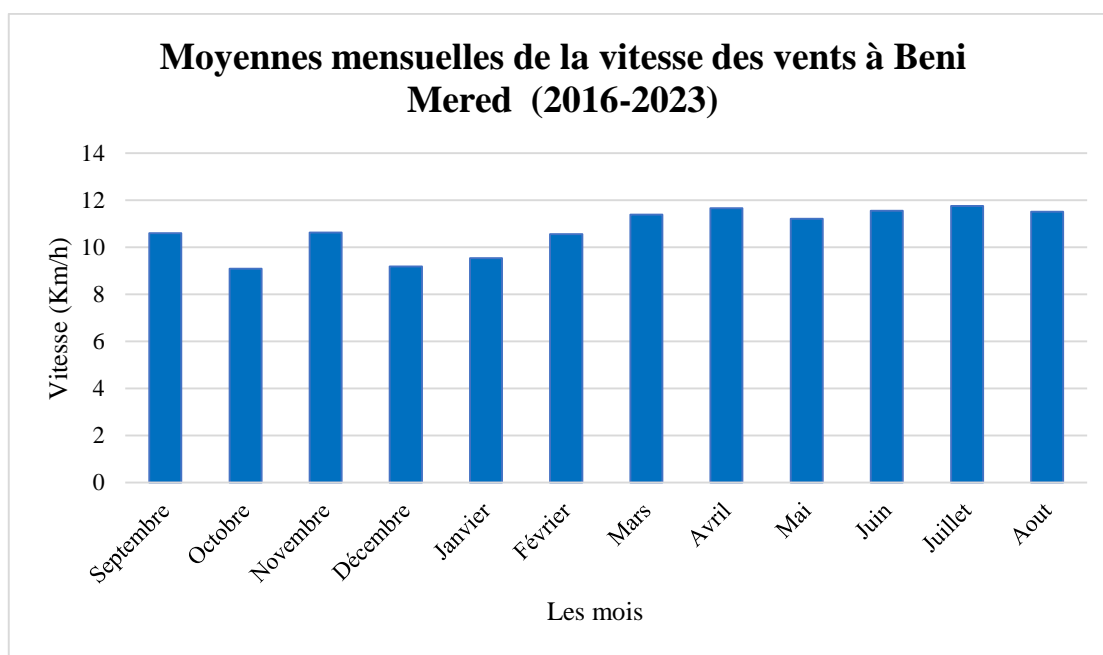
Les moyennes mensuelles de la vitesse du vent sont données dans le tableau suivant :

**Tableau I.4:**Moyennes mensuelles de la vitesse des vents à Beni Mered (2016/2023)

mois	Sépt	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Aout
Vitesse (Km/h)	10,60	9,09	10,63	9,19	9,54	10,56	11,39	11,66	11,22	11,579	11,76	11,51

Source : weather underground

Les vitesses de vent ont Béni Mered varient au fil de l'année, avec des périodes où elles sont plus élevées et d'autres où elles diminuent progressivement.



**Figure I.4:**Moyennes mensuelles de la vitesse des vents à Beni Mered (2016-2023)

**I.3.4. Soleil**

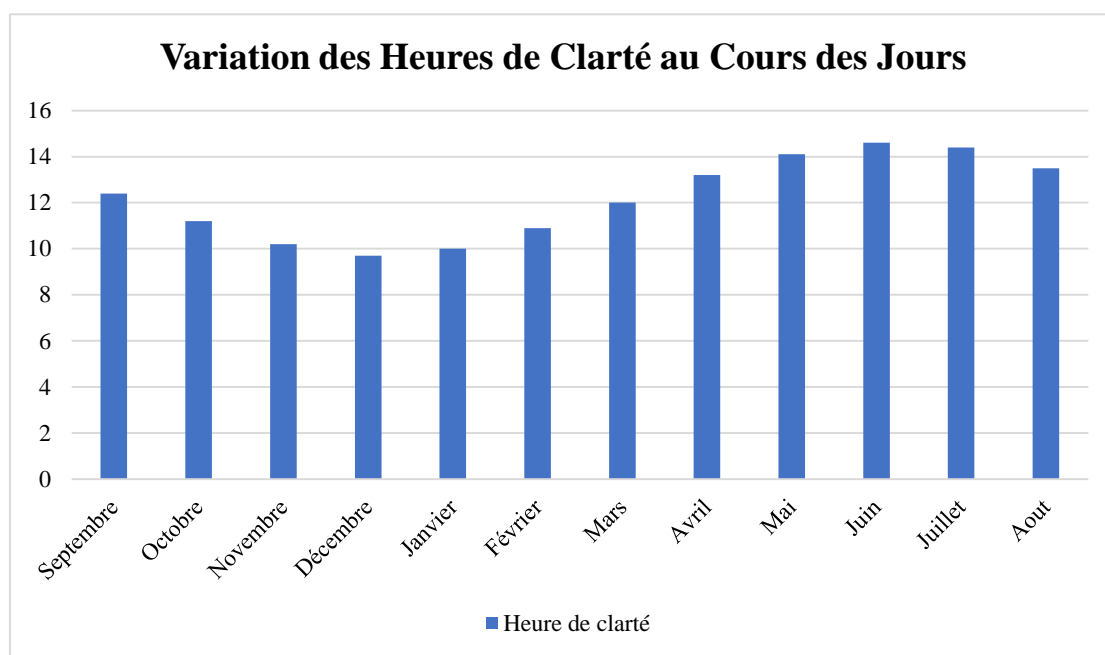
La longueur du jour à Beni Mered varie considérablement au cours de l'année. En 2024, le jour le plus court est le 21 décembre, avec 9 heures et 40 minutes de jour ; le jour le plus long est le 20 juin, avec 14 heures et 40 minutes de jour.



**Tableau I.5:**Heures de Clarté en Fonction des Jours à Beni Mered (2016-2023)

	sept.	oct.	nov.	déc.	janv.	févr.	Mars	avr.	Mai	Juin	juil.	Août
Heur de clarté(h)	12,4	11,2	10,2	9,7	10,0	10,9	12,0	13,2	14,1	14,6	14,4	13,5

Source : Weather spark



**Figure I.5:**Variation des Heures de Clarté au Cours des Jours

**I.3.5. Humidité relative**

L'humidité est un paramètre climatique qui indique la quantité d'eau présente dans l'atmosphère sous forme de vapeur, exprimée en pourcentage ou en grammes de vapeur d'eau par mètre cube d'air. Elle se mesure à l'aide d'un hygromètre.

Les données d'humidité relative mensuelles moyennes sont présentées au tableau ci-dessous:

**Tableau I.6:**L'humidité relative mensuelle moyenne à Beni Mered (2016-2023)

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout
Humidité %	69,03	69,15	73,67	78,59	78,49	74,58	74,19	74,56	72,97	69,39	66,98	66,78

Source : weather underground

D'après les données disponibles pour la commune de Béni Mered, l'humidité relative de l'air atteint son maximum en janvier avec un taux de 78,49 %, et son minimum à 66,78% en Aout.

#### **I.4. Présentation de la station d'épuration de Beni Mered**

La station d'épuration (STEP) de Béni Mered, fonctionnant par un procédé à boues activées, Elle est située à l'est de la route nationale n°1, près de l'oued Béni Aza. Elle fait partie des infrastructures visant à protéger les cours d'eau de la wilaya de Blida contre la pollution.

❖ L'alimentation de la STEP de Béni Mered est assurée par deux postes de refoulement (PR) :

- Le PR 18 (2 canalisations de refoulement de d=900mm) avec un débit de 4 000 m<sup>3</sup>/heure
- Le PR 22, (01 canalisation de refoulement de d = 500mm) avec un débit nominal de 800 m<sup>3</sup>/heure
- La station d'épuration final est dimensionnée pour une capacité de 383 000 équivalents habitants (à l'horizon 2030)

❖ Elle traite les eaux usées issue de grand Blida :

- Commune de Beni Mered.
- Commune de Blida .
- Commune d'Ouled yaich .
- Commune de Bouarfa.

##### **I.4.1. Donnés de base de la STEP**

**Tableau I.7:**Données de base de la STEP

<b>Paramètres</b>	<b>Valeurs</b>	<b>Unités</b>
<b>Capacité</b>	<b>383 000</b>	<b>Eq.H</b>
<b>Débit moyen journalier</b>	<b>51560</b>	<b>m<sup>3</sup>/j</b>
<b>Débit moyen horaire</b>	<b>2149</b>	<b>m<sup>3</sup>/h</b>
<b>Débit de pointe temps sec</b>	<b>3310</b>	<b>m<sup>3</sup>/</b>
<b>Débit de pointe temps de pluie</b>	<b>4800</b>	<b>m<sup>3</sup>/h</b>

Tableau I.8 ( Suite )

Paramètres	Valeurs	Unités
Demande Biologique en oxygène (DBO <sub>5</sub> )	21065	Kg/j
Demande chimique en oxygène (DCO)	52563	Kg/j
Matière en suspension (MES)	25278	Kg/j
Azote	3830	Kg/j
Phosphore	766	Kg/j

## I.4.2. Traitement des eaux usées

Le traitement des eaux usées comprend plusieurs étapes : le prétraitement, le traitement primaire, le traitement secondaire, le traitement des boues. Les eaux usées sont dépolluées avant leur rejet au milieu récepteur, en respectant les normes de rejet au milieu naturel .[3].

### I.4.2.1. Prétraitement

Le prétraitement est un procédé physique qui consiste à retirer de l'effluent les matières les plus grossières susceptibles de provoquer des colmatages des tuyauteries afin de protéger les équipements et procédés d'épuration en aval. Il comprend différentes unités de l'installation dont le dégrillage, le dessablage, le déshuilage et dégraissage. [3].

#### I.4.2.1.1 Dégrillage

Le dégrillage, premier poste de traitement de l'effluent brut, sert à retenir les déchets volumineux (flottants, filasses, etc.), à travers des grilles de mailles différentes. [3].

Dans la station de Beni Mared il y a un ensemble de 4 dégrilleurs fins automatiques. Les déchets sont acheminés par un convoyeur à vis vers un compacteur à vis, tandis que la vitesse d'écoulement dans le canal du dégrilleur est de 0,51 m/s.



**Figure I.6:**Dégrilleur automatique fin (Photo prise à la STEP de Beni Mered)

#### **I.4.2.1.2 Dessablage et déshuilage**

Le dessablage consiste à extraire de l'effluent brut les éléments lourds décantables rapidement, sables, graviers, et autres particules minérales, de tailles comprises entre 100 et 200  $\mu m$ . Le dégraissage est une élimination par flottation des particules grasses non solubles (10 à 20 % des graisses). Le déshuilage consiste à éliminer des huiles présentes dans les eaux usées. [3].

Cette opération comprend trois unités de traitement capables de traiter jusqu'à 4800m<sup>3</sup>/h. Ces unités, de forme rectangulaire, fonctionnent en continu à faible vitesse.



**Figure I.8: Tamis rotatif (Photo prise à la STEP de Beni Mered)**



**Figure I.7: Ligne de dessableur–  
déshuileur (Photo prise à la STEP de  
Beni Mered)**

En supprimant le sable des eaux usées, on préserve l'intégrité des équipements en évitant leur usure prématurée due au frottement. De plus, en empêchant le sable de se déposer dans les canalisations, on prévient les obstructions et les colmatages qui pourraient entraîner des dysfonctionnements du système. Quant aux graisses, leur élimination optimise le processus d'aération en favorisant le transfert d'oxygène dans les bassins. Ce transfert est rendu possible grâce à un procédé de flottation par air surpressé qui entraîne les graisses à la surface, où elles sont ensuite régulièrement enlevées par un racleur.

Le sable s'accumulant au fond du dessableur/déshuileur est régulièrement évacué grâce à un système d'air lift intégré au pont. Ce système, combiné à des pompes à vide, permet d'aspirer les sédiments et de les transférer dans le canal de collecte situé le long du bassin.



**Figure I.10:** Stockage des Sables  
(Photo prise à la STEP de Beni Mered)



**Figure I.9:** Stockage des Sables (Photo prise à la STEP de Beni Mered)

**I.4.2.2 Traitement primaire**

Le traitement primaire consiste à séparer de l'effluent prétraité des matières en suspensions et colloïdales par gravité, qui se déposent au fond du décanteur sous forme de boues, dites primaires. Le décanteur primaire permet d'éliminer au moins 50 à 60 % des matières en suspension ( MES ) décantables dans l'eau brute. [3].

**Tableau I.9:**Caractéristique dimensionnelle du décanteur primaire

<b>Données</b>	<b>Unité</b>	<b>Valeurs</b>
<b>Nombre d'ouvrage</b>	<b>/</b>	<b>03</b>
<b>Diamètre unitaire</b>	<b>m</b>	<b>33</b>
<b>Volume utile</b>	<b>m<sup>3</sup></b>	<b>2223</b>
<b>Volume total</b>	<b>m<sup>3</sup></b>	<b>6669</b>
<b>Hauteur d'eau en zone périphérique de l'ouvrage</b>	<b>m</b>	<b>2.6</b>

Dans un décanteur primaire, les matières solides en suspension contenues dans les eaux usées sédimentent au fond, formant des boues. Celles-ci sont régulièrement raclées vers un puits central puis extraites pour être traitées ultérieurement. Simultanément, l'eau clarifiée déborde en périphérie du bassin, passant à travers une lame déversant crénelée avant d'être acheminée vers les bassins d'aération.

**Tableau I.10:**Rendement épuratoire des décanteurs primaires

Paramètres	Rendement épuratoire
MES	50%
Demande Biologique en Oxygène (DBO)	30%
Demande chimique en oxygène (DCO)	30%
Azote total Kjeldahl (NTK)	15%

Source : [3]

**Figure I.11:**Décanteur primaire (Photo prise à la STEP de Beni Mered)

### I.4.2.3 Traitement secondaire

Le traitement secondaire est un traitement biologique qui consiste à améliorer le traitement en MES, en matières solubles et colloïdales, de l'effluent prétraité. [3].

Après décantation primaire, les effluents sont acheminés vers le bassin biologique. C'est au sein de bassins spécifiques que se déroule l'essentiel de l'épuration. Grâce à l'action de bactéries, les matières organiques présentes dans l'eau sont dégradées et éliminées. Ce

processus biologique favorise une croissance bactérienne continue, assurant ainsi l'efficacité du traitement. Le traitement biologique de l'eau vise à éliminer les matières carbonées, azotées et phosphorées. Pour y parvenir, on utilise trois techniques principales :

- **Aération :** On injecte de l'oxygène dans l'eau pour favoriser la dégradation des matières organiques par les micro-organismes.
- **Recirculation des boues :** Une partie des boues produites est réintroduite dans le bassin pour maintenir une population de micro-organismes active.
- **Extraction des boues :** On élimine régulièrement les excès de boues afin de contrôler le processus biologique.

**Tableau I.11:**Caractéristique dimensionnelles du bassin d'aération de la STEP de Beni Mered

<b>Données</b>	<b>Unité</b>	<b>Valeurs</b>
<b>Nombre d'ouvrage</b>	<b>/</b>	<b>03</b>
<b>Dimension unitaire</b>	<b>m *m * m</b>	<b>32 x 32 x 4, 65</b>
<b>Volume unitaire</b>	<b>m<sup>3</sup></b>	<b>4762</b>
<b>Volume total</b>	<b>m<sup>3</sup></b>	<b>14286</b>
<b>Nombre d'aérateur de surface par bassin</b>	<b>/</b>	<b>04</b>
<b>Puissance absorbé unitaire</b>	<b>Kw</b>	<b>51</b>





**Figure I.12: Bassin d'aération (Photo prise à la STEP de Beni Mered)**

#### **I.4.2.4 Clarificateur (décantation secondaire)**

Quelle que soit la filière retenue, la finalité du traitement des eaux consiste précisément à séparer les boues de l'eau, d'où le nom de "clarificateur", si on s'intéresse à l'eau traitée, et "décanteur" si on s'intéresse au devenir des boues et plus précisément à leur épaissement. [3].

Pour dimensionner un clarificateur, il faut s'assurer que la vitesse à laquelle l'eau s'élève dans le bassin (vitesse ascensionnelle) soit inférieure à la vitesse à laquelle les particules de boue se déposent au fond (vitesse de décantation).

Tableau I.12:Caractéristiques des clarificateurs

Données	Unité	Valeurs
Nombre de file	/	03
Diamètre intérieur d'un clarificateur	m	46
Volume d'un clarificateur	m <sup>3</sup>	6315
Volume total de clarification	m <sup>3</sup>	18945
Hauteur d'eau périphérique	m	3.8



Figure I.13:Décanteur secondaire (Photo prise à la STEP de Beni Mered)

Les boues se déposent au fond de l'ouvrage et sont régulièrement aspirées par des tubes verticaux mobiles. Un pont racleur conventionnel conduirait à un temps de séjour plus important car les boues décantant en périphérie qui devraient alors être ramenées en partie centrale de l'ouvrage avant extraction.

- **Recirculation des boues secondaires**

Dans le traitement des eaux usées, notamment dans le procédé des boues activées, la recirculation des boues secondaires désigne le retour d'une partie des boues produites dans le décanteur secondaire vers le bassin d'aération. Ces boues, riches en micro-organismes actifs, sont réintroduites dans le processus afin d'optimiser la dégradation de la matière organique présente dans les eaux usées. La recirculation permet de maintenir une concentration élevée de micro-organismes (bactéries) dans le bassin d'aération. Ces micro-organismes sont essentiels pour dégrader la matière organique présente dans les eaux usées.

Le taux de recyclage des boues dans le cas de la station d'épuration de Beni Mered est défini à 200 % du débit de pointe entrant. La recirculation s'effectue directement dans le bassin d'aération.

#### **I.4.2.5 Traitement tertiaire**

La station d'épuration de Beni Merd ne dispose pas de traitement tertiaire, c'est pourquoi j'ai proposé d'utiliser un filtre à sable comme un traitement tertiaire.

#### **I.4.3. Traitement de boue**

La filière de traitement des boues est :

- L'extraction des boues primaires et secondaires depuis les décanteurs.
- Le mélange et l'épaississement statique des boues mixtes.
- La stabilisation aérobie sur deux ouvrages identiques, pour réduire la matière organique.
- La déshydratation mécanique par filtres à bande presseuses.
- Le stockage temporaire des boues déshydratées.

##### **I.4.3.1. Extraction des boues en excès**

Deux pompes centrifuges par file de traitement extraient les boues en excès des puits de chaque clarificateur et les refoulent vers la bêche de mélange située en amont de l'épaississeur

##### **I.4.3.2. Bêche de mélange**

Dans une station d'épuration, la bêche de mélange joue un rôle essentiel. Elle recueille les boues sédimentées dans les décanteurs et les postes de recirculation. À l'intérieur de cette

bâche, un mélangeur assure une homogénéisation constante des boues, tandis que des pompes puissantes permettent de transférer ces boues vers d'autres équipements, à un débit de 70 m<sup>3</sup>/h.

### I.4.3.3. Épaississement gravitaire

Les procédés d'épaississements permettent de réduire le volume des boues grâce à l'extraction de leur eau. Ils sont très simples, ils peuvent être utilisés pour les stations des petites collectivités car ils n'entraînent pas de dépense d'énergie de fonctionnement, et entraînent une réduction importante du volume des boues. L'épaississement vise donc à augmenter la siccité des boues, soit leur teneur en matière sèche, sans modifier le caractère liquide des boues. [3].

L'épaississement gravitaire est une technique utilisée pour réduire le volume des boues en séparant la partie solide de la partie liquide. Ce procédé exploite la force de la gravité et le principe de la sédimentation.

Les étapes de ce processus sont les suivantes :

- **Introduction des boues :** Les boues à traiter sont introduites au centre de l'épaississeur, dans une zone spécialement conçue pour réduire la turbulence et favoriser la sédimentation des particules solides.
- **Sédimentation :** Les particules solides, plus denses que le liquide, se déposent progressivement au fond de l'épaississeur sous l'action de la gravité. L'eau, plus légère, reste en surface.
- **Raclage et évacuation :** Un système de raclage mécanique équipé de lames permet de retirer régulièrement les boues épaissies du fond de l'épaississeur. Ces boues sont ensuite évacuées vers les traitements ultérieurs. L'eau claire, située en surface, est récupérée et peut être réutilisée ou rejetée.

**Tableau I.13:**Caractéristiques d'épaississeur gravitaire

Données	Unité	Valeurs
Nombre de file	/	1
Diamètre intérieur	m	22
Hauteur	m	04
Surface	m <sup>2</sup>	380

Tableau I.14 ( Suite )

Données	Unité	Valeurs
Volume d'un épaisseur	m <sup>3</sup>	1521
Concentration des boues épaissie	g/l	30
Temps de séjour moyen	j	3.3

Les boues épaissies sont régulièrement aspirées par trois pompes pour être envoyées dans des bassins où elles sont traitées. Une pompe de réserve est prête à prendre le relais en cas de besoin.

#### I.4.3.4. Stabilisation des boues

La stabilisation consiste à réduire au maximum l'activité biologique de dégradation des boues et plus particulièrement leur fermentation. Elle réduit fortement la nuisance olfactive et les populations bactériennes. [3].

La stabilisation des boues dans cette station d'épuration repose sur un procédé aérobie. Les boues sont introduites dans deux bassins identiques, chacun équipé de quatre turbines verticales assurant une oxygénation efficace (1,9 kg O<sub>2</sub>/kW). Le temps de séjour moyen est de 14 jours.

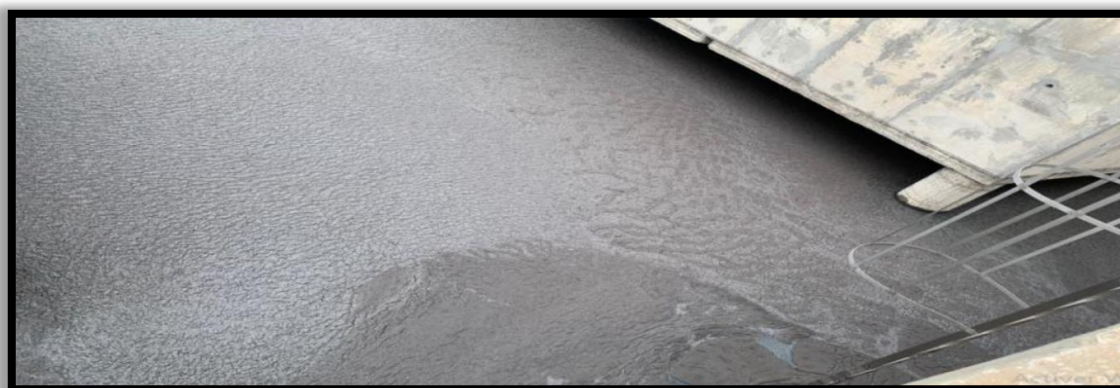


Figure I.14:Stabilisateur de la boue (Photo prise à la STEP de Beni Mered).

#### I.4.3.5. Déshydratation des boues

La réduction de volume des boues peut se faire par déshydratation mécanique. Cette technique, placée après des étapes d'épaississement, permet de réduire le volume de boues à

au moins 1/8 de son volume initial. Ce procédé permet donc d'atteindre une siccité des boues supérieure (de 20 à 45 %) à celle obtenue par épaissement. [3].

La station d'épuration est équipée de quatre unités de filtre- bande presseuses. pour la déshydratation mécanique.

**Tableau I.15:**Caractéristiques des filtres à bande

<b>Données</b>	<b>Unité</b>	<b>Valeurs</b>
<b>Nombre de filtre</b>	<b>/</b>	<b>04</b>
<b>Largeur de bande</b>	<b>m</b>	<b>02</b>
<b>Masse journalière des boues traitée</b>	<b>Kg*MS/J</b>	<b>21022</b>
<b>Concentration des boues stabilisées</b>	<b>g*MS/l</b>	<b>25</b>
<b>Volume journalier de boues traité</b>	<b>m3/j</b>	<b>841</b>

Les boues, une fois stabilisées, sont aspirées et transportées vers un atelier où elles seront déshydratées. Pour faciliter ce processus, on ajoute à chaque machine un produit chimique, un polymère, qui va agglomérer les particules de boue en de plus gros flocons. Ces flocons sont ensuite pressés entre deux toiles filtrantes dans des filtres-presses. La pression exercée sur ces filtres augmente progressivement jusqu'à atteindre 15 bars, ce qui permet d'extraire la majeure partie de l'eau contenue dans les boues. L'eau ainsi récupérée est ensuite traitée avant d'être rejetée.

#### **I.4.3.6. Stockage des boues déshydratées**

Le système de transfert des boues déshydratées comprend quatre vis de convoyage, chacune alimentant une pompe gaveuse. Les boues sont acheminées vers deux destinations : deux bennes de stockage tampon de 7 m<sup>3</sup> ou une aire de stockage bétonnée de 735 m<sup>3</sup>. Cette configuration permet une grande flexibilité d'exploitation et une capacité de stockage journalier de 105 m<sup>3</sup> de boues à 20% de matière sèche, soit l'équivalent d'une semaine de production.



**Figure I.15:** Zone de stockage des boues déshydratées (Photo prise à la STEP de Beni Mered)

### **Conclusion**

En conclusion, la présentation de la zone d'étude et de la station d'épuration fournit un aperçu complet des éléments qui composent le cadre de gestion des eaux usées. Les caractéristiques de la zone sont décrites pour offrir un contexte général, tandis que la station d'épuration est analysée en termes de ses processus et techniques de traitement. Cette approche permet de comprendre les différentes facettes du système de traitement des eaux usées et d'apprécier son fonctionnement dans son ensemble.



**Chapitre II :**  
**La réutilisation des eaux  
usées traitées en Algérie**



**II.Introduction**

L'Algérie est parmi les pays Africains touchés par le stress hydrique, elle dispose de ressources naturelles limitées, irrégulières et très inégalement réparties. Dans ces conditions déficitaires en ressources en eau, la gestion de l'eau est l'un des principaux axes du développement durable. La réutilisation des eaux usées épurées apparaît comme une ressource alternative nécessaire pour la préservation de la ressource hydrique, de l'environnement et de la promotion du secteur agricole. [4].

**II.1. Définition de la réutilisation des eaux usées traitées**

La réutilisation de l'eau est une solution efficace à l'échelle mondiale pour économiser les ressources en eau, réduire les impacts environnementaux, et diminuer les coûts ainsi que l'énergie impliqués dans leur gestion .[5]

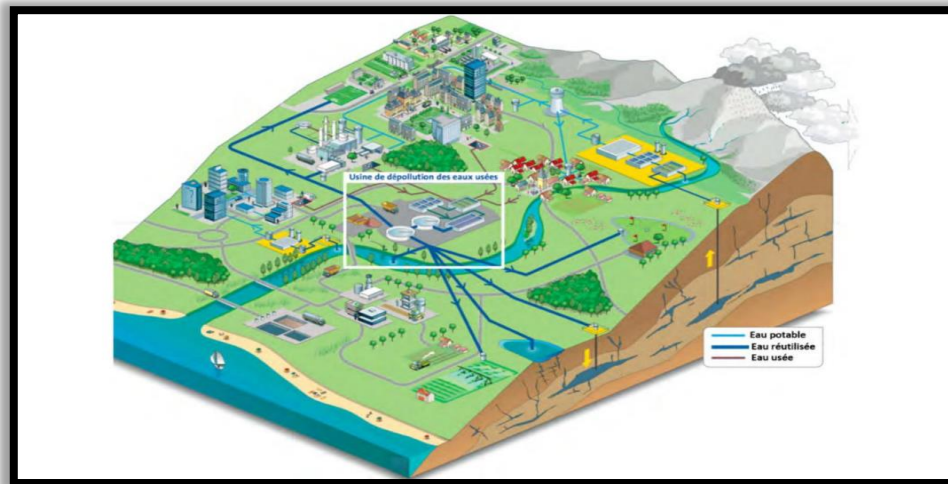
La réutilisation des eaux usées ou récupération de l'eau, consiste à convertir les eaux usées en eau pouvant être réutilisée à diverses fins.[6].

**II.2. Objectif de la réutilisation des eaux usées traitées**

La REUE a un double objectif : elle permet d'une part de mobiliser une ressource en eau supplémentaire et d'autre part de protéger les milieux récepteurs. les eaux épurées, « au lieu d'être déversées dans le milieu récepteur ordinaire, rivière, lac, étang ou rivage, qu'elles polluent plus ou moins gravement, sont dérivées, après un traitement approprié, vers des usages qui sont le moyen ou l'occasion d'une élimination plus inoffensive de leur charge polluante résiduelle. » C'est donc à la fois une opération d'approvisionnement et d'assainissement. Pour déterminer l'opportunité d'un projet de REUE dans une région donnée, il faut donc bien évaluer les besoins en eau, les ressources en eau et le niveau de l'assainissement. [7]

Les nouveaux projets de réutilisation des eaux usées traitées seront autorisés pendant une durée limitée, ce qui doit permettre de faire progresser, grâce à un suivi renforcé, les connaissances et données sur ces nouveaux usages. L'objectif reste à terme de définir des prescriptions nationales pour ces usages comme c'est déjà le cas pour l'irrigation agricole et l'arrosage des espaces verts, permettant ainsi de faciliter ces pratiques et d'augmenter les volumes d'eaux usées traitées utilisées. [8]

### II.3. Les différents usages de la réutilisation des eaux usées traitées



**Figure II. 1:** Schéma général des usages de l'eau réutilisée [9]

Les différents usages de la réutilisation des eaux usées traitées sont les suivants :

#### II.3.1. Agriculture

La réutilisation des eaux usées en agriculture est une pratique vieille de plusieurs milliers d'années. À ce titre, le secteur agricole est bien connu pour être le plus grand utilisateur d'eau, représentant près de 70% de la consommation mondiale d'eau. Le fait qu'environ 20 millions d'hectares dans le monde soient irrigués avec des eaux usées suggère une source majeure d'irrigation.

Dans de nombreux pays arides et semi-arides, l'eau devient une ressource de plus en plus rare et les planificateurs sont obligés d'envisager toutes les sources d'eau qui pourraient être utilisées économiquement et efficacement pour promouvoir un développement ultérieur. Cette problématique sera également observée dans de très nombreuses régions du monde, avec le changement climatique.

Dans le même temps, la population augmentant à un rythme élevé, la nécessité d'augmenter la production alimentaire est évidente. De nombreux pays ont inclus la réutilisation des eaux usées comme une dimension importante de la planification des ressources en eau.

Dans les régions les plus arides d'Australie et des États-Unis, les eaux usées sont utilisées dans l'agriculture, libèrent des réserves d'eau de haute qualité à usage potable. La

disponibilité de cette ressource à proximité des zones urbaines accroîtra le choix des cultures pour les agriculteurs. La teneur en azote et en phosphore des eaux usées pourrait réduire ou éliminer les besoins en engrais commerciaux.[9].

En Algérie, en 2021, 17 STEP (10 de type lagunage aéré et 7 boue activée) font objet de la REUT à des fins d'irrigation. Le volume réutilisé arrêté à la fin du 1er semestre est d'environ 6,05 million de m<sup>3</sup> soit un débit journalier de 33 620 m<sup>3</sup> /j. D'après les données de 2021 fournies par le Ministère des Ressources en Eau, la superficie irriguée est passée de 11 000 ha en 2018 à 16 000 ha en 2021. [10]

### **II.3.2. Réutilisation en industrie**

La réutilisation des eaux usées est de plus en plus pratiquée pour compléter les demandes en eau de l'industrie. Elle présente le double avantage d'une demande généralement continue et de la capacité d'utiliser les eaux usées directement en sortie de stations d'épuration. Les principaux facteurs qui influencent la réutilisation des eaux usées industrielle incluent la disponibilité et la fiabilité de cette ressource et la qualité d'eau exigée par les processus industriels.

Les principales utilisations dans l'industrie sont l'augmentation du système de refroidissement, l'eau d'alimentation des chaudières, les eaux de lavage et des applications diverses telles que la protection incendie et le contrôle de la poussière.

Les exigences et les domaines d'application du recyclage de l'eau en industrie diffèrent en fonction du type d'industrie, des procédés industriels spécifiques, ainsi que de leurs objectifs de performance. La qualité de l'eau réutilisée est bien réglementée et dépend du type d'application ou de production industrielle. L'industrie représente le deuxième utilisateur, soit environ 25% de la demande mondiale.[9].

### **II.3.3. Recharge de nappes souterraines**

Les pratiques les plus courantes de la réutilisation indirecte d'eau usée épurée comprennent :

- La recharge indirecte (via des bassins d'infiltration) ou directe (via des puits d'injection) des nappes phréatiques .
- La recharge de réservoirs de surface utilisés pour la production d'eau potable .

La recharge des eaux souterraines est utilisée pour préserver les niveaux des nappes et pour protéger les aquifères côtiers contre l'intrusion d'eau salée et stocker les eaux usées traitées. Les méthodes de recharge couramment utilisées sont l'épandage en surface dans des bassins, l'injection directe dans les aquifères souterrains. En effet, les aquifères souterrains peuvent constituer un moyen de stockage et de disponibilité pour la réutilisation. Lorsque l'eau récupérée est utilisée pour l'irrigation, qui a une forte demande saisonnière, cette eau peut être stockée dans l'aquifère souterrain pendant la période de faible demande, ce qui élimine le besoin d'importantes installations de stockage en surface.

L'utilisation d'aquifères souterrains à des fins de stockage résout les problèmes associés aux étangs ouverts tels que la production d'odeurs, les pertes par évaporation, la prolifération d'algues, entraînant une détérioration de la qualité de l'eau. L'eau usée en sortie des stations d'épuration doit subir un traitement complémentaire d'élimination de MES, micropolluants, matières organiques, car le risque d'injecter une eau usée sans traitement complémentaire est de contaminer les eaux souterraines, qui sont souvent de très bonne qualité. À ce titre, une approche prudente doit être adoptée lorsqu'une recharge d'un aquifère est réalisée avec une alimentation directe de l'eau usée en sortie de station d'épuration.[9].

#### **II.4. Situation de la réutilisation des eaux usées traitées en Algérie**

La réutilisation des eaux usées épurées est une action volontaire et planifiée qui vise la production de quantités complémentaires en eau pour différents usages. Aujourd'hui la stratégie nationale du développement durable en Algérie se matérialise particulièrement à travers un plan stratégique qui réunit trois dimensions à savoir : Sociale, Economique et Environnementale. Le réseau national d'assainissement totalise un linéaire de 27000 kilomètres. Le taux de recouvrement est, hors population éparsée, de 85%. Le volume global d'eaux usées rejetées annuellement est évalué à près de 600 millions de m<sup>3</sup>, dont 550 pour les seules agglomérations du nord. Ce chiffre est passé à environ 1 150 millions de mètres cubes d'ici 2020. La réutilisation des eaux usées épurées pour l'irrigation doit concerner en priorité les zones déficitaires en eau conventionnelle. Parmi les stations d'épuration exploitées par l'ONA (Office nationale d'assainissement) à travers les 43 wilayas (Départements), quelques-unes sont concernées par la réutilisation des eaux usées épurées en agriculture. A fin 2011, le volume réutilisé est estimé à 17 millions de m<sup>3</sup>/an, afin d'irriguer plus de 10 000 hectares de superficie agricoles. Le potentiel de la réutilisation des eaux usées épurées à des fins agricoles évoluera d'une manière significative d'environ 17 millions de m<sup>3</sup> en 2011 à environ 200

millions de m<sup>3</sup> en 2014. Les stations d'épurations gérées par l'ONA concernées par les projets de réutilisation des eaux usées épurées en cours d'étude ou de réalisation, sont au nombre de 12, pour l'irrigation de plus de 8 000 hectares de terres agricoles. Un plan d'action entre ONA et ONID (Office national d'irrigation et de drainage) est en cours d'étude, pour définir les possibilités réelles d'une éventuelle réutilisation des eaux usées épurées des stations d'épurations exploitées par l'ONA pour l'irrigation des grands périmètres d'irrigation (GPI) gérés par l'ONID au niveau des cinq (05) bassins hydrographiques à l'échelle nationale).[11]

## **II.5. Description des normes fixant les modalités d'utilisation des eaux usées épurées**

L'utilisation des eaux pour l'irrigation n'est possible que si les eaux usées soient traitées selon certaines normes de qualité. La définition de normes et d'une réglementation spécifique est indispensable pour toute politique de mise en œuvre d'une réutilisation durable. Ces normes devront préciser la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux épurées afin de garantir la protection de la santé humaine et la préservation de l'environnement . [12]

## **II.6. Normes algériennes de qualité des eaux destinées à l'irrigation**

Les normes algériennes qualité des eaux usées réutilisées en irrigation sont :

### **II.6.1. Paramètres microbiologiques**

**Tableau II.1:** Les paramètres microbiologiques journal officiel de la République Algérienne.

<b>Groupe de cultures</b>	<b>Paramètres microbiologiques</b>	
	<b>Coliformes fécaux (CFU/100ml) (moyenne géométrique)</b>	<b>Nématode intestinaux(œufs/l) (moyenne arithmétique)</b>
<b>Irrigation non restrictive. Culture de produits pouvant être consommés crus.</b>	<b>&lt;100</b>	<b>Absence</b>

Tableau II.2 (Suite)

Groupe de cultures	Paramètres microbiologiques	
	Coliformes fécaux (CFU/100ml) (moyenne géométrique)	Nématode intestinaux(œufs/l) (moyenne arithmétique)
Légumes qui ne sont consommés que cuits.  Légumes destinés à la conserverie ou à la transformation non alimentaire.	<250	<0.1
Arbres fruitiers (1) Cultures et arbustes fourragers (2) Cultures céréalières Cultures industrielles (3) Arbres forestiers Plantes florales et amentales (4)	Seuil recommandé  <1000	<1
Cultures du groupe précédent(CFU/100ml) utilisant l'irrigation localisée (5) (6)	Pas de norme recommandée	Pas de norme recommandée

(Source : JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 41.,2012)

### II.6.2. Paramètres physico-chimiques

Tableau II.3: Les paramètres physico-chimiques

	Paramètres	Unité	Concentration maximale admissible
Physiques	pH	-	6.5<pH<8.5
	MES	mg/l	30
	CE	ds/m	03

**Tableau II.4 (Suite)**

Paramètres		Unité	Concentration maximale admissible
Physiques	Infiltration le SAR=0-3	ds/m	0.2
	CE		0.3
	3-6		0.5
	6-12		1.3
	12-20		03
	20-40		
Chimiques	DBO5	mg/l	30
	DCO	mg/l	90
	Chlorure (Cl)	mg/l	10
	Azote (NO3-N)	mg/l	30
	Bicarbonate (HCO3)	mg/l	8.5

(Source : journal officiel de la République Algérienne. N26°.,2012).

### II.6.3. Les paramètres toxicologiques

**Tableau II. 5:** Les paramètres toxiques

Paramètre	Unité	Valeur limitées maximales
Aluminium	mg/l	20
Arsenic	mg/l	02
Berythium	mg/l	0.5
Bore	mg/l	02
Cadmium	mg/l	0.05
Chrome	mg/l	01
Cobalt	mg/l	05
Cuivre	mg/l	05
Cyanures	mg/l	0.5

Tableau II. 6 ( Suite )

<b>Fluor</b>	<b>mg/l</b>	<b>15</b>
<b>Fer</b>	<b>mg/l</b>	<b>20</b>
<b>Phénols</b>	<b>mg/l</b>	<b>0.002</b>
<b>Plomb</b>	<b>mg/l</b>	<b>10</b>
<b>Lithium</b>	<b>mg/l</b>	<b>2.5</b>
<b>Manganèse</b>	<b>mg/l</b>	<b>10</b>
<b>Mercure</b>	<b>mg/l</b>	<b>0.01</b>
<b>Molybdène</b>	<b>mg/l</b>	<b>0.05</b>
<b>Nickel</b>	<b>mg/l</b>	<b>02</b>
<b>Sélénium</b>	<b>mg/l</b>	<b>0.02</b>
<b>Zinc</b>	<b>mg/l</b>	<b>10</b>

(Source : journal officiel de la République Algérienne. N26° du.,2012).

## II.7 Les cultures pouvant être irriguées avec des eaux usées épurées

Tableau II.7: Liste Des cultures pouvant être irriguées avec des eaux usées épurée

<b>Groupes de cultures pouvant être irriguées avec des eaux usées épurées</b>	<b>Liste des cultures</b>
<b>Arbres fruitiers (1)</b>	Dattiers, vigne, pomme, pêche, poire, abricot, nèfle, crise, prune, nectarine, grenade, figure, rhubarbe, arachides, noix, olive.
<b>Agrumes</b>	Pamplemousse, citron, orange, mandarine, tangerine, lime, clémentine.
<b>Cultures fourragères (2)</b>	Bersim, sorghos fourragers, vesce et luzerne.
<b>Cultures industrielles</b>	Tomate industrielle, haricot à rames, petit pois à rames, betterave sucrière, coton, tabac, lin.



**Tableau II.8 ( Suite )**

<b>Groupes de cultures pouvant être irriguées avec des eaux usées épurées</b>	<b>Liste des cultures</b>
<b>Cultures céréalières</b>	Blé, orge, triticales et avoine.
<b>Cultures de production de semences</b>	Pomme de terre, haricot et petit pois.
<b>Arbustes fourragers</b>	Acacia et atriplex
<b>Plantes florales à sécher ou à usage industriel</b>	Rosier, iris, jasmin, marjolaine et romarin.

**Source :** JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 4.,2012

### **Conclusion**

La réutilisation des eaux usées traitées est cruciale pour une gestion efficace des ressources en eau en Algérie. En respectant les normes de qualité définies pour la réutilisation, il est possible d'utiliser les eaux usées traitées de manière sécurisée et productive. Les technologies avancées offrent des solutions prometteuses pour répondre à la demande croissante en eau. Toutefois, il est essentiel de poursuivre les investissements dans les infrastructures et d'améliorer les systèmes de traitement pour garantir une gestion durable et efficace des ressources en eau.



# **Chapitre III :**

## **Traitement tertiaire des eaux usées**

**III. Introduction**

Le traitement tertiaire peut être à la fois biologique et physico-chimique. En effet, ce traitement est réalisé après le traitement primaire et secondaire et regroupe un ensemble de techniques destinées à réduire la concentration des éléments nutritifs résiduels (comme le phosphore et l'azote), polluants organiques résistants et des éléments traces métalliques.

C'est pour cela que les traitements tertiaires sont classés comme des traitements complémentaires qui deviennent nécessaires, pour assurer une meilleure réduction de ces substances dans les milieux naturels. On distingue différents types de traitements :

- Elimination des MES et de la matière organique
- Elimination de l'Azote et du Phosphore
- Elimination des métaux lourds
- Désinfection (traitement par chlore ,UV ou ozone) [13]

**III .1 Le but du traitement tertiaire**

Les traitements tertiaires, que l'on dénomme aussi épuration complémentaire ou épuration avancée ou épuration de finissage, constituent un complément d'épuration des eaux usées pour régénérer ces eaux et adapter leurs nouvelles qualités à l'usage qu'on veut en faire. En effet, l'épuration classique ne conduit qu'à un abattement limité des germes pathogènes (environ 90 %), taux de pollution trop élevé dans certains cas, notamment dans les zones de baignades. Il s'agit donc, en cette circonstance, du cas particulier de la réutilisation des eaux usées urbaines.

Les usages de ces eaux sont variés et peuvent répondre, après un certain degré de régénération :

- à servir d'appoint pour les besoins de l'hygiène publique dans une ville (arrosage des jardins, alimentation des fontaines publiques, etc.) .
- à préserver les qualités du milieu récepteur et faciliter le traitement des eaux souterraines destinées à l'alimentation.
- à l'irrigation de certaines surfaces maraîchères.
- à l'alimentation des plans d'eau destinés aux sports nautiques, aux baignades, à la conchyliculture en bordure des mers, à la pêche ou pour des usages industriels divers : vapeurs, climatisation et refroidissement, etc.
- à lutter contre l'eutrophisation des lacs ( type de pollution des eaux lacustres) cette

pollution étant caractérisée par l'enrichissement excessif des eaux en sels nutritifs (azote et phosphore).

Bien entendu, ce vaste et important problème de réutilisation des eaux usées exige des traitements, dits « traitements tertiaires », pour que ces eaux présentent toutes les qualités requises, afin d'être à nouveau utilisables.

Dans tous les cas, il est indispensable qu'une installation d'épuration tertiaire utilise comme source d'eau à traiter les eaux usées après les traitements préliminaires, primaires et secondaires. En moyenne générale, les trois traitements successifs ont permis d'éliminer 80 à 98 % de la demande biochimique d'oxygène (D.B.O. ) et des matières en suspension. Ils ont réduit, sans la supprimer, la contamination microbienne. Ils ont laissé toutefois subsister de nombreux sels minéraux et n'ont pas permis d'éliminer un grand nombre de substances indésirables . [14]

### III.2 Elimination des MES et de la matière organique

Plusieurs traitements tertiaires basés sur le principe de la filtration sont possibles pour abattre les matières en suspension et les matières organiques. Les procédés les plus courants sont la microfiltration (MF), l'ultrafiltration (UF), la nanofiltration (NF), l'osmose inverse (OI) et la filtration sur milieu granulaire (sable...). la mise en place de ces procédés, qui abattent la pollution organique et les MES, est dépendante de la nature des ouvrages situés à l'amont. Si le traitement secondaire est un bioréacteur à membranes et que l'effluent à traiter est peu chargé, les paramètres DBO5, DCO et MES en sortie se retrouvent en très faible concentration. La mise en place d'un traitement tertiaire n'est alors peut-être pas nécessaire, ce qui est rarement le cas lors d'un traitement secondaire par boues activées. Plusieurs configurations sont alors possibles pour obtenir une eau de qualité à la fin du traitement tertiaire. L'abattement de la pollution dépend du traitement tertiaire utilisé et du paramètre considéré.[15]

**Tableau III. 1:** Performances (en %) des différents traitements tertiaires

	<b>DBO5 (mg/L)</b>	<b>DCO (mg/L)</b>	<b>MES (mg/L)</b>
<b>MF</b>	<b>Résiduelle</b>	<b>Résiduelle</b>	<b>Résiduelle</b>
<b>UF</b>	<b>Résiduelle</b>	<b>Résiduelle</b>	<b>Résiduelle</b>
<b>Filtration lente sur milieu granulaire</b>	<b>&lt; 15</b>	<b>&lt; 60</b>	<b>&lt; 15</b>

Source : [15]

### III .3. Elimination de l'Azote et du Phosphore

Une élimination poussée des nutriments comme le phosphore et l'azote doit seulement être mise en place pour certaines réutilisations. En effet, lors d'une réutilisation des eaux traitées pour l'irrigation, il est judicieux de conserver les éléments nutritifs présents dans les eaux usées (selon les normes ). Le concept alliant irrigation et fertilisation, nommé « fertirrigation », prend actuellement de plus en plus d'ampleur. Le principe de réutilisation participe grandement à son développement. Cependant, pour les autres utilisations (nettoyage des voiries par exemple), l'élimination de la pollution azotée et phosphorée est indispensable afin d'éviter tout risque d'eutrophisation. Evidemment, il est nécessaire que les étapes de traitement en amont soient fiables afin que les traitements tertiaires optimisent l'élimination de la pollution.[15].

#### III.3.1. Elimination de l'azote

L'azote dans les eaux usées subit plusieurs transformations avant d'être éliminé efficacement.

##### III.3.1.1. Réactions de transformation de l'azote

L'azote des effluents à traiter arrive dans le réseau principalement sous sa forme organique. Son transit dans le réseau modifie les proportions en faveur de la forme ammoniacale. Selon le temps de séjour et la température, la proportion d'azote ammoniacal à l'entrée de la station d'épuration varie entre 50% (réseaux courts) et 75% (réseaux très longs). Des apports de formes oxydées ( $N-NO_2^-$ ,  $N-NO_3^-$ ), et plus particulièrement de nitrates, peuvent exceptionnellement être observés par exemple lors des épisodes pluvieux en réseaux unitaires, ou lorsque des eaux parasites riches en nitrates s'infiltrent dans le réseau. L'élimination biologique met en œuvre différentes réactions, présentées dans la Figure III.1 , les principales étant l'assimilation, la nitrification et la dénitrification .[16]

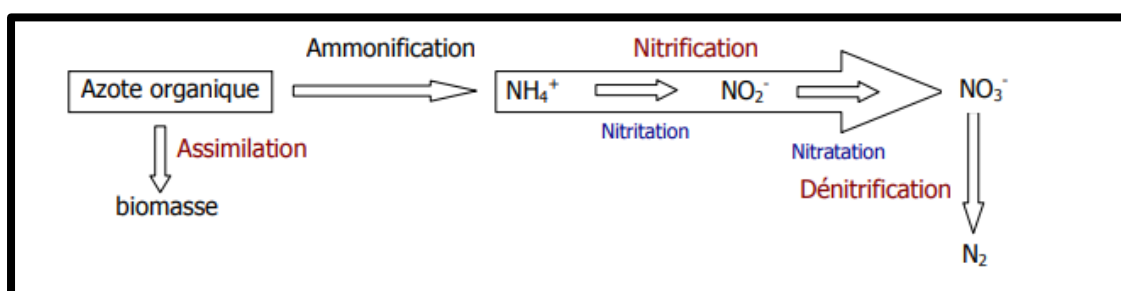


Figure III .1: Elimination biologique de l'azote [16]

**A. Ammonification**

L'azote organique des eaux urbaines est principalement formé d'urée et d'acides aminés. Sous l'action de bactéries et par hydrolyse notamment, l'ammonification se réalise que le milieu soit oxydant ou non selon l'équation 1.

**Équation 1**

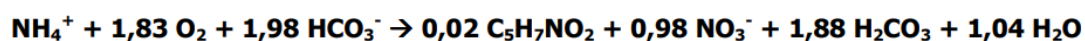
L'ammonification étant une réaction extrêmement rapide, au bout de quelques heures dans le réseau les concentrations en azote organique sont réduites de moitié, l'effluent arrivant à l'entrée de la station contient principalement de l'azote sous forme ammoniacale. [16].

**B. Assimilation**

La réaction d'assimilation de la matière organique par les bactéries hétérotrophes est donnée par l'Équation énoncée précédemment. Ces micro-organismes, afin d'assurer le traitement de la charge polluante organique, ont besoin pour leur métabolisme d'azote, ce dernier représentant environ 5% de leur matière sèche. Leurs besoins en azote sont de l'ordre de 5% de la DBO5 éliminée par la culture bactérienne. Environ 25% de l'azote des eaux brutes urbaines sont ainsi éliminés, par assimilation et séquestration dans le floc bactérien. [16]

**C. Nitrification**

La nitrification consiste en l'oxydation de l'azote ammoniacal en nitrates

**Equation 2**

Cette transformation est réalisée en deux étapes : la nitritation ( $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^-$ ) suivie de la nitratisation ( $\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$ ). Elle est réalisée en présence d'oxygène par des micro-organismes autotrophes qui utilisent l'azote ammoniacal et les carbonates comme sources d'énergie. La nitritation est réalisée par des bactéries nitreuses et la nitratisation est assurée par des bactéries nitriques. [16].

**D. Dénitrification**

La dénitrification consiste en une réduction des nitrates en azote gazeux par des bactéries hétérotrophes, avec assimilation de matière organique comme source de carbone, en l'absence d'oxygène dissous et en présence de nitrates [16].

**III .3.2. Elimination du phosphore**

Les stations d'épuration des eaux usées peuvent utiliser plusieurs procédés pour éliminer le phosphore avant de rejeter les effluents d'eaux usées dans l'environnement. Parmi les méthodes les plus courantes figurent la précipitation chimique, l'élimination biologique et les technologies avancées de traitement des eaux usées telles que la filtration membranaire.

**III .3.2.1. Précipitation chimique**

Cette méthode consiste à ajouter des produits chimiques tels que le sulfate d'aluminium, le chlorure ferrique ou la chaux aux eaux usées. Ces produits chimiques réagissent avec le phosphore dissous pour former des composés insolubles qui peuvent être décantés et éliminés sous forme de boues, ou le précipité obtenu peut être éliminé par filtration. La précipitation chimique peut atteindre des taux d'élimination du phosphore élevés, dépassant souvent 90 % selon le produit chimique utilisé, le dosage, le pH et la concentration initiale en phosphore.

L'avantage de la précipitation chimique est qu'elle est relativement simple à mettre en œuvre et très efficace pour réduire considérablement les émissions de phosphore. Cette méthode présente toutefois l'inconvénient d'augmenter les coûts d'exploitation en raison des produits chimiques utilisés et de générer des boues chimiques qui doivent être éliminées. [17].

**III .3.2.2. Élimination biologique améliorée du phosphore (EBPR)**

Cette technologie de traitement utilise des organismes accumulant le phosphate (PAO) qui sont cultivés dans des conditions anaérobies et libérés dans les conditions aérobies d'un bassin d'aération. Dans un environnement anaérobie, les PAO absorbent les acides gras volatils et libèrent le phosphore dans l'eau. Dans un environnement aérobie, les PAO absorbent le phosphore des eaux usées et le stockent sous forme de polyphosphate. Une fois que tout le phosphore a été consommé, la biomasse contenant les PAO est séparée de l'eau traitée, éliminant ainsi le phosphore stocké. Les procédés EBPR peuvent atteindre des rendements d'élimination du phosphore de l'ordre de 80 à 95 % . L'avantage de l'utilisation de l'EBPR par rapport à la précipitation chimique pour l'élimination du phosphore est qu'elle ne nécessite pas de produits chimiques et peut être intégrée dans les processus de traitement biologique

existants, y compris les boues activées conventionnelles et les systèmes d'élimination biologique des nutriments qui ciblent à la fois l'azote et le phosphore. Elle produit également beaucoup moins de boues et ne produit pas de précipité qui pourrait devoir être éliminé par filtration. L'inconvénient de l'utilisation de l'EBPR est qu'elle nécessite un contrôle minutieux

des conditions environnementales et peut être moins efficace dans les climats plus froids ou dans des conditions d'affluent irrégulières. [17].

### **III .3.2.3. Filtration membranaire**

Cette technologie de traitement avancée utilise des membranes semi-perméables pour séparer physiquement le phosphore et d'autres contaminants de l'eau. Il existe quatre types de technologies de filtration membranaire couramment utilisées dans les processus de traitement des eaux usées : la microfiltration, l'ultrafiltration, la nanofiltration et l'osmose inverse. Les membranes de microfiltration et d'ultrafiltration peuvent éliminer les solides en suspension et certaines molécules organiques dissoutes plus grosses. Bien qu'elles ne soient pas très efficaces pour éliminer directement le phosphore, elles sont souvent utilisées en conjonction avec la précipitation chimique, où le phosphore est converti en une forme particulière qui peut ensuite être éliminée par des membranes de microfiltration ou d'ultrafiltration pour améliorer l'efficacité de l'élimination du phosphore.

Les membranes de nanofiltration et d'osmose inverse ont des pores beaucoup plus petits que ceux de la microfiltration et de l'ultrafiltration et elles éliminent les sels dissous, les molécules organiques et même les ions monovalents (dans le cas de l'osmose inverse). Comme les membranes de nanofiltration et d'osmose inverse peuvent atteindre des rendements d'élimination élevés du phosphore dissous, dépassant souvent 90 %, leurs taux de rejet élevés leur permettent d'être utilisées dans des systèmes autonomes pour éliminer directement le phosphore dissous des eaux usées sous forme d'ions phosphate. La filtration membranaire est une méthode efficace pour éliminer le phosphore dissous des eaux usées. Bien qu'elle offre une efficacité élevée et une qualité d'effluent constante, cette technologie nécessite une gestion minutieuse de l'encrassement, un apport énergétique important et des investissements considérables. Cependant, en intégrant la filtration membranaire à d'autres procédés de traitement, les stations d'épuration des eaux usées peuvent améliorer les capacités d'élimination du phosphore et contribuer à prévenir l'eutrophisation des plans d'eau récepteurs.

Chacune de ces méthodes d'élimination, qu'elles soient chimiques, biologiques ou issues de technologies avancées de filtration membranaire, joue un rôle crucial dans le maintien de l'équilibre des nutriments et la prévention des effets néfastes d'un excès de phosphore dans l'environnement [17].



**III .4. Elimination des métaux lourds**

Les principaux traitements tertiaires des eaux contaminées par des métaux lourds sont présentés dans le tableau III.2. IOB signifie polluants inorganiques-organiques-biologiques. [18].

**Tableau III.2:** Traitement tertiaire pour l'élimination des métaux lourds

Traitement tertiaire	Oxydation	Distillation	Échange d'ions	Adsorption	Procédé membranaire
Types de polluants	I-O	I-O-B	I-O	I-O-B	I-O-B

Source : [18]

**III .4.1. Oxydation**

Ce procédé nécessite un équipement minimal. L'oxydation chimique implique l'introduction d'un agent oxydant dans les eaux usées. Cela provoque le déplacement des électrons de l'oxydant vers les polluants, qui subissent une modification structurelle. Les oxydants couramment utilisés dans les applications de traitement de l'eau comprennent :

- Chlore
- Dioxyde de chlore
- Permanganate
- Oxygène
- Ozone
- Distillation

La plupart des méthodes courantes de traitement tertiaire de l'eau reposent sur la technologie de cristallisation. Dans les technologies thermiques, telles que la distillation, une énergie suffisante est fournie pour amener l'eau polluée à sa température d'ébullition, puis pour la vaporiser. Cela transforme une partie de l'eau en vapeur. L'étape finale consiste à condenser la vapeur du processus en eau pure. [18].

**III .4.2. Échange d'ions**

L'échange d'ions est une méthode bien établie pour éliminer la dureté de l'eau potable. Elle est également étudiée pour l'élimination des ions de métaux lourds. Cette technologie repose sur des surfaces d'échange, comme dans l'adsorption. Il est donc important de disposer de résines nanoporeuses à surface spécifique élevée. Les résines échangeuses d'ions les plus courantes disponibles sur le marché sont les suivantes :

- Zéolites aux silicates de sodium
- Acide polystyrène sulfonique
- Résines méthacryliques.

Les résines échangeuses d'ions présentent un avantage certain : la réversibilité des réactions. Elles peuvent également être utilisées pour récupérer les métaux lourds présents dans les eaux usées. Malgré ces avantages, elles présentent également des limites importantes. En voici quelques-unes :

- Prétraitement obligatoire
- Leurs performances sont très spécifiques et dépendent des ions.
- Elles ne conviennent donc pas à l'élimination simultanée des ions des eaux polluées.

**III .4.3. Adsorption**

L'adsorption est l'augmentation de la concentration d'une substance sur une surface. Ici, nous éliminons les polluants en favorisant leur adsorption sur la surface adsorbante. Certains avantages de l'adsorption sont les suivants :

- Elle est efficace et économique.
- Elle a une grande capacité d'élimination.

Sa conception est flexible et facile à utiliser. [18].

**III .4.4. Procédé membranaire**

Le traitement par membrane comprend plusieurs technologies avancées et diverses. Il élimine divers types de polluants avec une grande efficacité. Lorsqu'il est utilisé pour l'élimination des métaux lourds, le traitement par membrane peut fournir une solution fiable. Il ne nécessite généralement pas d'additifs chimiques ni d'apports thermiques. Il est simple à

fabriquer, à utiliser, à mettre à l'échelle et à contrôler. Les technologies membranaires souffrent d'un compromis entre sélectivité et perméabilité. Elles ont également une consommation d'énergie élevée en raison du processus inhérent à la pression. Les technologies membranaires pour la purification de l'eau peuvent en outre être classées en :

- Ultrafiltration
- Nanofiltration
- Osmose inverse. [18]

### **III .5. Désinfection**

La plupart des microorganismes pathogènes est éliminée de l'eau lors de la première étape de purification de l'eau. Cependant, la désinfection de l'eau est encore nécessaire afin d'empêcher que l'eau potable soit nocive pour notre santé. La désinfection est un traitement qui permet d'éliminer les microorganismes susceptibles de transmettre des maladies. Il existe de plusieurs méthodes de désinfection de l'eau. Celles-ci font appel soit à un processus physique (ultrafiltration, traitement UV...), soit à un processus chimique mettant en œuvre une réaction d'oxydation, qui peut être obtenue par ozonation ou par chloration. Voici un aperçu des différentes méthodes de désinfection de l'eau.[19]

#### **III .5.1. Chloration**

La chloration est le procédé de désinfection le plus répandu au monde, permet d'éliminer de façon simple et à faible coût la plupart des microbes, bactéries, virus et germes responsables de maladies comme la dysenterie, la typhoïde et le choléra. La chloration est un moyen simple et efficace pour désinfecter l'eau en vue de la rendre potable. Elle consiste à introduire des produits chlorés (pastilles de chlore, eau de javel...) dans de l'eau pour tuer les microorganismes qu'elle contient. Après un temps d'action d'environ 30 minutes, l'eau est normalement potable. Elle le reste pendant quelques heures ou jours (en fonction des conditions de stockage) grâce à l'effet rémanent du chlore. L'efficacité de la chloration dépend beaucoup de la valeur du pH de l'eau. L'odeur et le goût peuvent avoir tendance à se dégrader et des sous-produits indésirables comme des substances organochlorées sont susceptibles de se former, surtout dans les eaux chargées en substances organiques. [19]

**III .5.2. Dioxyde de chlore**

Le dioxyde de chlore est un produit oxydant, reconnu pour ses facultés virucides, bactéricides, fongicides et antiseptiques. Il dispose en outre d'un pouvoir rémanent dans l'eau, meilleur que le chlore, et contrairement à celui-ci, le pH n'a pas d'influence sur son efficacité. De même, il ne conduit pas à la formation de composés organo-halogénés indésirables ou autres sous-produits formés par les désinfectants. L'une des caractéristiques particulières du dioxyde de chlore est sa complète solubilité dans l'eau et se diffuse donc très facilement dans les réseaux

d'eau. Il peut ainsi pénétrer dans les couches de bactéries qui constituent le biofilm et détruire ces systèmes dans leur totalité. Il empêche sa reformation car il reste actif plusieurs heures dans le système de distribution d'eau. Il permet également de supprimer les composés organiques présents dans l'eau, tels que le Manganèse ou le Fer, grâce à son pouvoir oxydant. Pour le traitement de l'eau potable, il présente l'avantage de n'avoir ni goût ni odeur une fois dilué dans l'eau, contrairement au chlore. L'usage du dioxyde de chlore pour le traitement de l'eau se démocratise grâce à la reconnaissance de son efficacité contre les micro-organismes pathogènes .[19]

**III .5.3. Ozonation**

L'ozone est le plus puissant oxydant et désinfectant existant pour épurer de l'eau. Son principal avantage : il ne produit aucun dérivé indésirable et se transforme en oxygène. Son inconvénient : il présente une courte durée de demi-vie et une mauvaise solubilité dans l'eau. Généralement, il est recommandé d'utiliser l'ozone pour la pré-oxydation, avant un filtre à sable ou un filtre à charbon actif (GAC). Après l'ozonisation, ces filtres peuvent éliminer la matière organique restante (important pour une désinfection finale). Cette combinaison a plusieurs avantages :

- L'élimination de la matière organique et inorganique.
- L'élimination des micropolluants, tels que les pesticides.
- L'amélioration du procédé floculation/coagulation-décantation.
- L'amélioration de la désinfection et la réduction des sous-produits de désinfection.
- L'élimination des goûts et des odeurs.[19]

**III .5.4. Désinfection aux Ultraviolets**

L'eau à désinfecter est exposée à des rayonnements ultraviolets à ondes courtes. Les germes sont ainsi éliminés de manière sûre sans modification des propriétés de l'eau. Le système de décontamination de l'eau par UV possède de nombreux avantages. Le plus intéressant est que la désinfection s'accompagne de la formation d'aucun produit de réaction avec les matières organiques de l'eau. L'utilisation de l'appareil est simple. La désinfection par rayons ultraviolets est utilisée entre autres pour le traitement de l'eau potable et des eaux usées ainsi que pour le traitement de l'eau dans l'industrie.[19]

**III .6. Les avantages et les inconvénients du chlore - UV – ozone**

**Tableau III.3:** Les avantages et les inconvénients du chlore - UV – ozone

Technique	Avantages	Inconvénients
<b>Chlore</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Investissement faible</li> <li>• Système très simple : il suffit d'utiliser une pompe à injection ou un injecteur venturi pour mélanger du chlore avec l'eau</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le chlore donne un goût caractéristique à l'eau</li> <li>• Certains dérivés chlorés sont dangereux</li> <li>• L'efficacité du chlore dépend du pH de l'eau. L'efficacité du chlore dépend du pH de l'eau</li> </ul>
<b>Ultraviolet</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le système est bon économique à l'investissement et à l'utilisation</li> <li>• Il n'y a pas de stockage de produit chimique; le traitement ne laisse aucun dérivé dans l'eau</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les particules dans l'eau stoppent les rayons U.V. et diminuent l'efficacité du traitement.</li> <li>• Les U.V. inactivent mais n'éliminent pas les bactéries. L'eau doit donc être consommée directement après traitement</li> </ul>

Tableau III.4 ( Suite )

Technique	Avantages	Inconvénients
<b>Ozonation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>L'ozone se décompose en oxygène, sans laisser de produits dérivés dans l'eau.</li> </ul> <p>L'ozone est produit sur place (pas de transport de produits toxiques ni de consommable à changer régulièrement)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La production d'ozone consomme de l'énergie.</li> <li>Certains matériaux ne sont pas résistants à l'ozone.</li> </ul> <p>Ce système demande un investissement de départ important</p>

Source : [19]

### III .7. La filtration

Dans cette Partie, nous explorerons en détail les différents types de la filtration, en commençant par un aperçu de son historique

#### III .7.1. Historique

La filtration est l'une des techniques les plus anciennes et de loin la plus appliquée dans les opérations de traitement de l'eau, qu'elle soit à usage industriel ou domestique. C'est en 1804 qu'un écossais, du nom de John Gibb, a conçu et construit pour la première fois un filtre à sable expérimental pour sa blanchisserie de Daisley. Produisant plus d'eau "traitée" qu'il n'en avait besoin, il commença à en vendre le surplus à la population. Par la suite, lui-même et d'autres techniciens perfectionnèrent cette méthode, à tel point qu'en 1829 fut construite pour la première fois une installation de filtration de l'eau, destinée à la consommation de la ville de Londres, sous la direction d'un nommé James Simpson. Depuis, cette méthode de traitement commença à se proliférer dans le monde industrialisé de l'Europe de l'époque. Elle a prouvé son efficacité par suite de nombreuses épidémies qui ont ravagé certaines populations consommant de l'eau non filtrée et épargnant pendant la même période d'autres populations consommant la même eau, mais filtrée. Des suites des découvertes de Pasteur et autres, des examens biologiques sur plusieurs échantillons ont donné des résultats confirmant l'amélioration de la qualité bactériologique de l'eau après filtration . Cette technique fut alors largement adoptée comme moyen de "traiter" l'eau avant consommation, et gagna du terrain tout en s'améliorant au fil du temps grâce aux progrès techniques. Il s'en est suivi la naissance

des filtres rapides et la transformation dans la plupart des cas de la filtration seulement en une étape du traitement de l'eau après la décantation et d'autres stades de prétraitement et avant la stérilisation et d'autres stades de post-traitement.

De nos jours encore, la filtration demeure une étape indispensable dans une chaîne de traitement d'eau potable, à l'exception d'eau souterraine captée en forages, puits ou sources, et jugée de qualité assez bonne pour se passer de celle-là.[20]

### **III .7.2. Différents types de filtre**

La filtration consiste en la traversée d'un milieu filtrant par un liquide chargé d'éléments dont on veut le débarrasser, le milieu filtrant ne laissant passer que le liquide et retenant les éléments non désirés, soit de par sa nature (adsorption), soit par la faiblesse de la taille des voies de passage (tamisage). Le milieu filtrant peut être de nature diverse et fonctionner de diverses manières.[20]. On distingue :

#### **III .7.2.1. Les filtres lents à sable**

C'est la première technique de filtration qui fut mise en œuvre. Le filtre lent consiste en un bassin à ciel ouvert, le plus souvent rectangulaire, contenant du sable servant de matériau filtrant. La couche de sable, d'épaisseur allant de 0,7 m à 1,5 m, est surmontée d'une couche d'eau de 0,7 m à 3 m, s'écoulant en traversant le sable sous l'action de la pesanteur. L'eau filtrée est recueillie au fond du bassin à l'aide d'un système de drainage. Le nom de "filtre lent" vient du fait que la vitesse de percolation est très faible, de l'ordre de 0,1 à 0,5 m/h, par opposition aux filtres rapides. Le diamètre des grains de sable va de 0,10 mm à 2,0 mm et même plus dans certains cas avec une granulométrie assez étalée. Il est donc possible d'utiliser le sable de la plupart des carrières sans tri. La taille réduite des grains et la faiblesse des vitesses dans ces filtres font qu'ils ne sont pas seulement de simples tamis destinés à retenir les particules dont les dimensions excèdent les pores laissés entre les grains, mais ils éliminent aussi les particules colloïdales, les substances dissoutes, les bactéries et autres germes, ainsi que les goûts et odeurs. On obtient ainsi de l'eau d'une qualité physico-chimique et bactériologique pure. Cette qualité est obtenue grâce à un développement simultané de phénomènes physiques et d'épuration biologique à la surface et dans le lit filtrant ; d'où le nom de "filtre biologique" souvent donné à ces filtres.[20]

#### **III .7.2.2. Filtres rapides**

Comme les filtres lents, les filtres rapides sont constitués de bassins à ciel ouvert, contenant le sable filtrant sur une épaisseur d'environ 0,7 m. à 1,5 m. C'est un sable qui a une

granulométrie assez uniforme, avec un coefficient d'uniformité des grains voisin de 1, ou en tout cas inférieur à 1,8 et une taille effective variant de 0,4 mm à 1,2 mm selon le degré de traitement désiré et la qualité de l'affluent. Le sable doit être choisi avec grand soin, exempt d'argiles, de poussière, de racines et autres impuretés. Donc l'utilisation de sable tout-venant comme dans le cas de la filtration lente est exclue. La couche d'eau surmontant le sable et provoquant la percolation est d'une hauteur de 0,8 à 2 m et exceptionnellement de 3 m. Le filtrat est recueilli au fond par l'intermédiaire de systèmes de drainage. Le nom de "filtres rapides" vient de l'importance des vitesses d'environ 20 à 50 fois plus élevées que celles des filtres lents. Ces vitesses de 2 à 25 m/h. engendrent des durées de traversée du matériau filtrant trop courtes pour permettre d'autres phénomènes d'épuration que de type physique. Il en découle une réduction de la surface de filtration, donc de la grandeur des ouvrages. Les vitesses courantes sont de 2 à 10 m/h. Lorsque la vitesse est plus élevée, on utilise surtout le vocable de "filtres dégrossissants" ou "dégrossisseurs" étant donné la limitation de leur efficacité.

Les filtres rapides reçoivent généralement de l'eau prétraitée provenant de décanteurs pour achever l'opération entamée par ces derniers. Ils jouent alors un rôle essentiellement de tamisage éliminant les flots résiduels. Il s'ensuit un très rapide colmatage des pores laissés par les grains de sable entre eux, une diminution progressive de la vitesse apparente d'écoulement, mais une augmentation de la vitesse réelle, d'où une augmentation des pertes de charge à tel point que le débit désiré n'est plus obtenu. Il peut arriver que l'adhésion des particules de colmatage soit très faible et que l'augmentation des pertes de charge, créant aussi un accroissement des effets de frottement, provoque l'arrachement de ces particules, qui descendent en aval.

De proche en proche pour se retrouver dans le filtrat. Pour remédier à ces différentes conséquences, on procède à une régénération ou recyclage (dé-colmatage par élimination des particules) du lit filtrant.[20]

### **III .7.2.2.1. Lavage des filtres rapides**

Dans la plupart des cas, la régénération ou recyclage se fait par un envoi simultané d'air et d'eau déjà filtrée sous pression en contre-courant (de bas en haut) après arrêt de l'entrée d'eau brute et de la sortie de l'eau filtrée. C'est par l'intermédiaire du système de drainage que remontent ces deux fluides assurant l'un le brassage du sable, l'autre son rinçage. Pour cela, le système de drainage est très souvent constitué de plancher en béton équipé de buselures recueillant par leur tête de forme cylindrique et munie de rainures l'eau filtrée et la restituant par leur queue au bassin d'eau filtrée. C'est aussi par la queue que remonte l'eau de lavage qui



est diffusée par les têtes des buselures. La fréquence de lavage d'un lit de filtre rapide à sable va de deux fois par jour à une fois par trois jours, ou même une fois par semaine selon la qualité de l'eau à filtrer.[20]

### **III .7.2.3. Filtres sous pression**

Contrairement aux deux premiers cas de filtres énumérés (écoulement gravitaire dans des bassins à ciel ouvert), les filtres sous pression sont constitués de coques d'acier fermées, équipées de systèmes de drainage et dans lesquelles est chargé le sable filtrant. Elles sont horizontales ou verticales et fonctionnent avec une pression de l'ordre de 10 atm. La vitesse de filtration étant du même ordre de grandeur que pour les filtres dits "rapides", la perte de charge est quasiment négligeable. Ce qui fait que le système de pompage double (avant et après traitement) peut être évité. Le traitement se limite pratiquement à une opération de tamisage. C'est pourquoi il n'est généralement utilisé que dans l'industrie.[20]

### **III .7.2.4. Microtamisage**

Les micro-tarais sont différents des autres types de filtre. en ce sens que la filtration ne se fait pas par traversée d'une couche de matériau poreux mais de tamis à fils d'acier inoxydables et vailles très fines (0,025 mm environ). Cependant, ils réduisent considérablement la turbidité, éliminent les matières en suspension grossières et même les micro-organismes. En exemple, le plancton peut être réduit de 50 à 95 %. Ils sont constitués d'unités cylindriques préfabriquées, peuvent traiter de 7 à 45 m<sup>3</sup> d'eau par jour avec une perte de charge de 15 cm environ. Leur nettoyage se fait par pulvérisation continue d'eau sous 0,3 atm à 0,7 atm et dans certains cas jusqu'à 2 atm de pression avec un volume d'eau à peine égal à 2 % du volume traité.[20]

### **III.7.2.5. Filtration sur charbon activé**

Le charbon activé est fabriqué à partir de bois, pâte à papier, lignite, tourbe, résidus ligneux, houille, charbon bitumineux, os, déchets et coques combinés suivant 2 stades:

- Le premier consiste en une pyrolyse du matériau de base pour obtenir du charbon de bois par carbonisation à 500°C en milieu oxydant.
- Le deuxième consiste en une activation du charbon ainsi obtenu soit :
  - ❖ Par procédé thermique en l'oxydant à 1000°C dans une atmosphère dont le pouvoir oxydant est réduit par injection de CO<sub>2</sub> ou de vapeurs d'eau.

- ❖ Par procédé chimique en carbonisant les produits volatils résiduels issus du premier stade par chauffage en présence de chlorure de zinc ou d'acide phosphorique.[20]

Après le deuxième stade, on obtient du charbon de 600 à 1500 m<sup>2</sup> de surface par g. Il se présente sous forme de granulés ou de poudre.

**A- Sous forme de poudre**

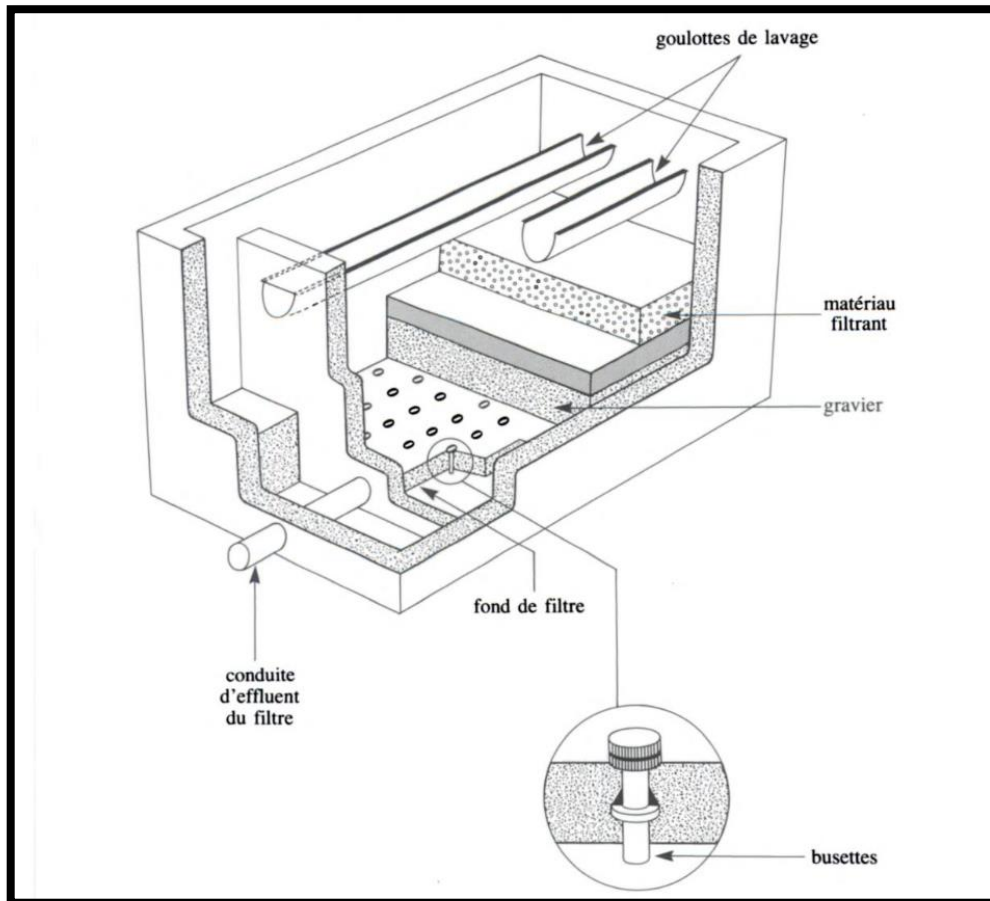
Il est mélangé avec l'eau brute avant sédimentation comme suspension aqueuse avec un taux moyen de 20 g/m<sup>3</sup> d'eau. Avec son pouvoir adsorbant des matières en suspension et de plusieurs matières dissoutes dont les hydrocarbures, il favorise la formation des floccs et rend plus complet le fonctionnement des décanteurs. [20]

**B- Sous forme de granulés**

Le charbon activé est utilisé comme matériau filtrant. Les filtres à charbon activé sont identiques des points de vue construction et fonctionnement aux filtres rapides à ciel ouvert. Comme milieu filtrant, ils combinent l'avantage des processus d'épuration normaux des filtres et le pouvoir adsorbant exceptionnel du charbon activé. A ce titre, ils sont très indiqués lorsqu'on a à faire à des eaux superficielles très polluées. On l'utilise comme élément d'une série d'ouvrages de traitement ou en double couche de matériaux dans un filtre, surmonté de sable. La vitesse de filtration est généralement du même ordre de grandeur que celle des filtres dits rapides.[20]

En pratique, les filtres à sable rapides sont les plus utilisés. Les filtres à sable lents, de construction et de fonctionnement simples, nécessitent de grandes superficies, c'est pourquoi on les utilise surtout dans les pays en voie de développement où le climat est moins rigoureux, et lorsqu'on n'est pas limité par l'espace. Les filtres sous pression et les filtres à terre diatomée servent surtout traiter les eaux de piscine ou sont utilisés dans de petites unités de traitement préfabriquées.[20]

J'ai donc choisi le filtre à sable rapide comme traitement tertiaire dans la STEP de Beni Mered. Ce type de filtre est particulièrement adapté aux besoins de la station, offrant une solution efficace pour le traitement de volumes importants d'eau en peu de temps. De plus, il permet de respecter les contraintes d'espace tout en garantissant une qualité d'eau élevée, essentielle pour le recyclage, notamment pour l'irrigation.



**Figure III .2:** Filtre à sable rapide [21]

Le fond de filtre est la structure qui sépare le milieu filtrant de l'eau filtrée. Il doit donc être suffisamment solide pour supporter le milieu filtrant et l'eau située au-dessus du milieu filtrant. Il permet en outre de :

- Collecter et d'évacuer les eaux filtrées (grâce au système de drainage).
- Distribuer uniformément l'eau de lavage. [21].

### III .7.3. Règles générales prises en compte dans le système de drainage souterrain

- Le rapport entre la longueur et le diamètre des canalisations latérales ne doit pas dépasser 60.
- L'espacement des canalisations latérales doit être compris entre 150 et 300 mm.
- Surface de perforation considérée comme 0,003 fois la surface totale du filtre.
- Le diamètre des perforations des canalisations latérales doit être compris entre 5 et 12 mm.

- Le rapport entre la surface totale des perforations du système de drainage souterrain et la surface totale de la section transversale des canalisations latérales ne doit pas dépasser 0,5 à 0,25.
- Le rapport entre la surface totale des perforations du système de drainage souterrain et la surface totale du filtre peut être aussi faible que 0,002 à 0,003.
- La surface es canalisations latérales doit être de préférence de 1,5 à 2 fois la surface totale des perforations.
- La surface du collecteur doit être de préférence de 1,5 à 2 fois la surface totale des canalisations latérales afin de minimiser les pertes par frottement et d'assurer une meilleure distribution.[22]

**Conclusion**

Le traitement tertiaire représente une étape cruciale dans la chaîne de traitement des eaux usées, permettant d'affiner la qualité des effluents et de les rendre conformes aux normes environnementales les plus strictes. Grâce à une combinaison de procédés physico-chimiques et biologiques, il est possible d'éliminer une large gamme de polluants, des matières en suspension aux micropolluants les plus tenaces. Cette flexibilité fait du traitement tertiaire un outil indispensable pour préserver la qualité des milieux aquatiques et répondre aux enjeux de la gestion durable de l'eau.



**Chapitre IV :**  
**Étude expérimentale**

**IV. Introduction**

Dans ce chapitre, nous proposons l'utilisation d'un filtre à sable comme traitement tertiaire à la station d'épuration de Beni Mareed. Cette solution vise à améliorer la qualité des effluents traités afin de respecter les normes de réutilisation des eaux usées

**IV.1. Principe et théorie**

Une colonne de sable de hauteur  $H_s$  (m) est utilisée, nous mesurons les différents niveaux d'eau dans les tubes piézométriques pour les différents débits. Lorsque le lit de sable est immergé, dans le cas statique, la pression en un point de cette colonne est alors égale au poids de la colonne d'eau au-dessus de ce point.

$$H_{te} = e + H \dots \dots \dots (1)$$

$$H = H_{te} - e \dots \dots \dots (2)$$

$H_{te}$  : hauteur totale de l'eau (mesuré par une règle)

$H$  : pression statique de la prise de mesure

$e$ : hauteur de la prise de mesure

Lorsque le filtre est en service avec l'eau seule en circulation la  $P_{dc}$  provoquée par les grains de sable est proportionnelle à la hauteur sable et au débit.

$$\text{La pression dynamique au niveau de la prise de mesure : } P = L - e \dots \dots \dots (3)$$

$P$ : la pression dynamique au niveau de la prise de mesure

$L$ : niveau du liquide lu dans le tube piézométrique (par rapport au niveau de référence)

$$\text{la } P_{dc} : dp = H - p \dots \dots \dots (4)$$

$$\text{La hauteur du sable à une prise de pression : } H_{sp} = H_s - e - 2.5 \dots \dots \dots (5)$$

**IV.2. Mode opératoire**

Avant d'entamer toute mesure, le sable utilisé a été soigneusement nettoyé afin d'éliminer les impuretés qui pourraient fausser les résultats et on a le mettre dans la colonne de filtration ( qui a un diamètre de 10cm ) jusqu'à 31cm de hauteur

**A-Remplissage de la cuve d'alimentation :** Nous avons d'abord rempli la cuve d'alimentation d'eau (remplie avec de l'eau propre pour calculer la porosité, et avec de les eaux usées pour effectuer les analyses et évaluer l'efficacité du filtre à sable)

**B-Fermeture de la vanne de vidange :** La vanne de vidange a été fermée pour maintenir l'eau dans la colonne de filtration.

**C-Remplissage de la colonne de filtration :** La colonne de filtration a ensuite été remplie d'eau jusqu'à atteindre la hauteur totale d'eau

**D-Mesure des hauteurs des prises de pression (e) :** À l'aide d'une règle, nous avons mesuré les hauteurs des prises de pression.

**E-Calcul de la pression statique :** Nous avons varié le débit à 50 L/s et 80 L/s pour l'eau propre et 36l/s pour les eaux usées de façon à maintenir la hauteur d'eau dans la colonne de filtration constante (HTE)

**F- Calcul des pertes de charge :** En utilisant les lois précédemment citées (comme la loi de Darcy ou la formule de Hagen-Poiseuille), nous avons calculé les pertes de charge .



Figure IV.1: Pilote de filtration gravitaire sur sable (Photo prise au laboratoire de l'ENSH)

### IV.3. Calcul de la Porosité du Sable

La porosité est une caractéristique fondamentale du sable utilisé dans le filtre, définissant la proportion d'espaces vides dans le matériau, et influençant ainsi la capacité du filtre à retenir les particules en suspension

Nous avons consigné toutes les données mesurées dans les tableaux suivants :

Tableau IV.1: Paramètres de Pression, Hauteur du Sable et Prises de Pression

<b>Numéro de prises de pression</b>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<b>Hauteur des prises de pression e (cm)</b>	0	23	33	35,5	38	40,5	43	45,5	48	50,5	55,5	60,5
<b>Pression H ( cm,C,E)</b>	97	74	64	61,5	59	56,5	54	51,5	49	46,5	41,5	36,5
<b>Hauteur du sable</b>	31	24	14	11,5	9	6,5	4	1,5	0	0	0	0



**Tableau IV.2:** Résultat de l'étude du lit de Sable à 50 l/h avec l'eau de Robinet

<b>Niveau du liquide dans tube piézométrique L à 50l/h</b>	76	79,5	85,2	87,5	89	91	92,8	94,1	96,5	95,5	92,5	91
<b>Pression dynamique à 50l/h</b>	76	56,5	52,2	52	51	50,5	49,8	48,6	48,5	45	37	30,5
<b>Perte de charge ( cm,C,E)</b>	<b>21</b>	<b>17,5</b>	<b>11,8</b>	<b>9,5</b>	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>4,2</b>	<b>2,9</b>	<b>0,5</b>	<b>1,5</b>	<b>4,5</b>	<b>6</b>

**Tableau IV. 3:** Résultat de l'Étude sur le Lit de Sable à 80 l/h avec Eau de Robinet

<b>Niveau du liquide dans la tube piézométrique L à 50l/h</b>	57	62	73,5	74,1	76,6	80,6	84	87	90,8	94	94,8	92,5
<b>Pression à 80l/h</b>	57	39	40,5	38,6	38,6	40,1	41	41,5	42,8	43,5	39,3	32
<b>Perte de charge ( cm,C,E)</b>	<b>40</b>	<b>35</b>	<b>23,5</b>	<b>22,9</b>	<b>20,4</b>	<b>16,4</b>	<b>13</b>	<b>10</b>	<b>6,2</b>	<b>3</b>	<b>2,2</b>	<b>4,5</b>

Avec :

- $H=H_{te}-e$
- Pression dynamique(P) =L-e
- Perte de charge = H-P

**Calcul de la porosité :**

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{k_{\mu} V (1 - e)^2}{g d^2 \varepsilon^3 \phi^2}$$

- Pour Q=50l/h

$\Delta H$ (cm)	L(cm)	K	Vis(m2/s)	Vitesse(m/h)	g(m/s2)	d(m)	Q(l/h)
40	31	200	$1,1 \cdot 10^{-6}$	7.96	9,81	$0,5 \cdot 10^{-3}$	50

$e=0.38$

- Pour Q=80l/h

Delta H(m)	L(cm)	K	Vis(m <sup>2</sup> /s)	Vitesse(m/h)	g(m/s <sup>2</sup> )	d(m)	Q(l/h)
21	31	200	1,1*10 <sup>-6</sup>	10.19	9,81	0,5*10 <sup>-3</sup>	80

e = 0.41

#### **IV.4. Analyse des Paramètres de Qualité de l'Eau Avant et Après Filtration**

Les résultats de l'analyse des paramètres de qualité de l'eau seront présentés après l'exposé sur l'échantillonnage et la préparation des échantillons.

##### **IV.4.1. Échantillonnage et Préparation des Échantillons**

L'eau utilisée pour l'analyse a été prélevée pendant 6 jours à 9h avec une quantité de 200l au niveau de la sortie des eaux de la STEP déversées vers l'Oued Mered.

Les échantillons ont été transportés au laboratoire pour une analyse immédiate, afin d'éviter toute altération des paramètres.

##### **IV.4.2. Méthodologie de Mesure des Paramètres de Qualité**

Pour mesurer les paramètres de qualité de l'eau (Température , pH , la conductivité , la turbidité , Matières en suspension , Demande Chimique en Oxygène , Demande Biologique en Oxygène pendant 5 jours ) on a utilisé deux échantillons :

- **Échantillon 1** : Eau sortant de la station d'épuration (avant filtration sur sable).
- **Échantillon 2** : Eau filtrée sur sable. Cela permettra d'évaluer l'efficacité du filtre sur sable à éliminer la matière organique

Ces deux échantillons ont été soumis à une filtration sur sable, et des analyses ont été effectuées afin de mesurer l'efficacité du filtre à sable dans l'élimination de la matière organique.

### IV.4.2.1. Mesure de la température

Lors de la prise d'échantillons d'eau à la station d'épuration, nous mesurons également la température de l'eau au moment du prélèvement à l'aide d'un thermomètre. Le tableau ci-dessous présente les températures mesurées chaque jour

**Tableau IV.4:** Mesure de la température

Jour	Température °C
27/05/2024	26.25
30/05/2024	26.2
03/06/2024	25
05/06/2024	26.4
09/06/2024	26
11/06/2024	26.5

### IV.4.2.2. Mesure du PH

Le PH des échantillons a été mesuré à l'aide d'un PH mètre.

#### A- Matériel et Réactifs utilisé

- PH-mètre.
- Électrode de pH : La sonde immergée dans la solution. Elle est connectée au pH-mètre et mesure la concentration en ions hydrogène.
- Bêchers ou erlenmeyers : Pour contenir les solutions à mesurer (eau brute et eau épurée).
- Eau distillée : Pour rincer l'électrode entre chaque mesure.
- Papier absorbant : Pour essuyer délicatement l'électrode.

#### B- Protocole

- On a versé l'échantillon 1 dans un bécher propre.
- On a immergé l'électrode dans l'eau, en veillant à ce que la partie sensible de l'électrode soit complètement immergée.
- On a attendu que la valeur se stabilise sur l'écran du pH-mètre.
- On a noté la valeur du pH.
- On a répété les étapes de rinçage et de mesure pour l'échantillon 2.



Figure IV.2: Mesure du PH (Photo prise au laboratoire de l'ENSH)

#### IV.4.2.3. Mesure de la conductivité

Le matériel et les réactifs nécessaires pour la mesure de la conductivité sont présentés ci-dessous

##### A- Matériel et réactif nécessaire

- Conductimètre : C'est l'appareil principal qui servira à effectuer les mesures.
- Sonde de conductivité : Immersée dans la solution, elle permet de mesurer la conductivité.
- Bêchers ou éprouvettes.
- Eau distillée : Utilisée pour le rinçage de la sonde entre chaque mesure.
- Les deux échantillons d'eau

##### B- Protocole

- On a rempli un bécher avec l'échantillon 1.
- On a agité légèrement l'échantillon pour assurer une répartition uniforme des ions.
- Avant chaque mesure, on a rincé soigneusement la sonde à l'eau distillée pour éliminer toute trace de l'échantillon précédent.
- On a plongé la sonde dans l'échantillon, en veillant à ce qu'elle soit complètement immergée.

- On a attendu que la valeur de conductivité se stabilise sur l'écran de l'appareil et on a noté la valeur.
- On a répété les étapes de rinçage et de mesure pour l'échantillon 2 .



**Figure IV.3:** Mesure de la conductivité (Photo prise au laboratoire de l'ENSH)

#### **IV.4.2.4. Mesure de la turbidité**

Le matériel et les réactifs nécessaires pour la mesure de la turbidité sont présentés ci-dessous

##### **A. Matériel et réactif nécessaire**

- Turbidimètre
- Cuvettes de mesure : Des cuvettes propres et sèches pour contenir les échantillons. Ces cuvettes doivent être adaptées au turbidimètre.
- Les deux échantillons d'eau

##### **B. Protocole**

- On a placé la cuvette contenant l'échantillon dans le compartiment prévu à cet effet sur le turbidimètre.
- On a appuyé sur la touche "Read" pour lancer la mesure.
- Le turbidimètre affichera la valeur de la turbidité en unités NTU (Nephelometric Turbidity Units).

- On a noté la valeur obtenue.
- On a répété les mesures pour chaque échantillon afin d'obtenir une moyenne et de vérifier la reproductibilité des résultats.



**FigureIV.4:** Mesure de la turbidité (Photo prise au laboratoire de l'ENSH)

#### **IV.4.2.5. Mesure de MES (Matière en suspensions)**

Voici le matériel et les réactifs utilisés pour la mesure de la MES

##### **A- Matériel et réactifs utilisé**

- Rampe de filtration jetable.
- Pompe à vide
- Des filtres
- Étuve : Sécher les filtres contenant les MES .
- Balance : Peser les filtres avant et après séchage.

##### **B- Protocole**

1. On a prélevé 50 ml d'eau avant et après filtration.
2. On a placé le filtre dans la rampe de filtration
3. Chaque échantillon a été filtré individuellement à l'aide de la rampe de filtration.
4. Les filtres ont été placés dans une étuve à 105°C pendant 24 heures.

5. Après 24h les filtres ont été pesés après séchage pour déterminer la masse des MES retenues.

**C- Calcul**

$$MES_i = \frac{M_i - M_1}{V} \text{ (avec } i = \text{échantillon 1 ou 2 et } M_1 \text{ la masse du filtre vide )}$$



**FigureIV.5: Rampe jetable + Pompe à vide (Photo prise au laboratoire de l'ENSH)**



FigureIV.6: Des filtres (Photo prise au laboratoire de l'ENSH)



Figure IV.7: Etuve de séchage ( <https://urlz.fr/sbxZ>)





**Figure IV.8 :** Pesée d'un filtre (Photo prise au laboratoire de l'ENSH)

#### IV.4.2.6. Mesure de la DBO

Le matériel et les réactifs nécessaires pour cette mesure sont détaillés ci-dessous :

##### A- Matériel et réactifs utilisé

- Dispositif de mesure de la DBO5 : Oxitor Box.
- 2 Bouteilles (marron, résistantes à la lumière) .
- Les 2 échantillons d'eau brute et d'eau épurée (250 mL chacun) .
- Un petit agitateur magnétique pour chaque bouteille
- KOH (hydroxyde de potassium).

##### B- Protocole

Dans chaque bouteille, on met un volume de 250 ml d'échantillon. L'une des bouteilles contient l'eau brute prélevée à la sortie de la station d'épuration de Beni Mareed, et l'autre contient l'eau épurée à la sortie du filtre à sable. On ajoute du KOH dans les bouchons des bouteilles pour absorber le CO<sub>2</sub> produit, évitant ainsi toute interférence avec la mesure de l'oxygène dissous. Un petit agitateur magnétique est placé dans chaque bouteille pour garantir un mélange homogène des échantillons. Les bouteilles ont été incubées dans l'Oxitor Box pendant 5 jours à température contrôlée. L'Oxitor Box a mesuré automatiquement la demande

biologique en oxygène (DBO) sur cette période, Après 5 jours, les résultats de la DBO5 ont été directement lus sur l'écran des bouchons des bouteilles de l'Oxitor Box.



**Figure IV.9:** Dispositif de mesure de la DBO5 (Photo prise au laboratoire de l'ENSH)

#### **IV.4.2.7. Mesure de la DCO**

Le matériel et les réactifs pour la mesure de la DCO sont décrits ci-dessous

##### **A- Matériel et réactifs utilisé**

- Tubes à réaction
- Les deux échantillons
- Un thermo réacteur
- Burette
- Pipettes
- Solutions et réactifs
- Dichromate de potassium :  $K_2Cr_2O_7$
- Le sulfate de mercure  $HgSO_4$
- Sulfate d'argent  $Ag_2SO_4$
- $H_2SO_4$
- Ferroïne

- Sulfate de fer et d'ammonium
- Eau distillée

**B- Protocole****➤ Préparation des tubes**

- **Tube témoin:** Introduire 10 mL d'eau distillée, 5 mL de  $K_2Cr_2O_7$ , 0.4 g de  $HgSO_4$ , 15 mL de  $Ag_2SO_4$  et 2-3 billes de verre.
- **Tube échantillon 1:** Introduire 10 mL d'eau brute (sortie station), les mêmes réactifs que pour le témoin.
- **Tube échantillon 2:** Introduire 10 mL d'eau filtrée, les mêmes réactifs que pour le témoin.
- Placer les tubes dans Le thermoréacteur .
- Porter à ébullition à  $150^\circ C$  pendant 2 heures.

**➤ Refroidissement et dosage**

Quand le tout est bien refroidi, on ajoute :

- Jusqu'à 70 ml d'eau distillé
- 2 à 3 gouttes de ferroïne
- Titrer l'excès de bichromate par le sulfate de fer et d'ammonium jusqu'au virage couleur vert----- > rouge.
- Noter les volumes de sulfate de fer et d'ammonium utilisés ( $V_0$  pour le témoin,  $V_1$  pour l'échantillon 1,  $V_2$  pour l'échantillon 2).

**➤ Titrage de la solution de sulfate de fer et d'ammonium ( $V_{sfa}$ )**

- Préparer un bécher contenant 90 mL de  $H_2SO_4$ , 10 mL de  $K_2Cr_2O_7$  et 2-3 gouttes de ferroïne.
- Titrer l'excès de bichromate par la solution de sulfate de fer et d'ammonium jusqu'au virage couleur orange ---- > vert.
- Noter le volume de sulfate de fer et d'ammonium utilisé ( $V_{sfa}$ )

**C- Calcul**

- Calcul du facteur T :  $T = \frac{N_{bic} \cdot V_{bic}}{V_{sfa}} = \frac{0.24 \times 10}{V_{sfa}} = \frac{2.4}{V_{sfa}}$

Avec :

- ✓  $N_{bic}$  : La normalité de la solution de bichromate de potassium
  - ✓  $V_{bic}$  : Le volume de la solution de bichromate de potassium
- Calcul de la DCO :  $DCO = \frac{8000(V_0 - V_i)T}{V_t}$  (avec  $i = \text{échantillon 1 ou 2}$ )



**Figure IV.10: Préparation des réactifs (Photo prise au laboratoire de l'ENSH)**



**FigureIV.11:Titrage par sulfate de fer et d'ammonium (Photo prise au laboratoire de l'ENSH)**

## **IV.5. Présentation des Résultats**

Les paramètres de qualité de l'eau ont été mesurés avant et après filtration

**IV.5.1. Résultats de la Qualité de l'Eau Avant Filtration**

**Tableau IV. 5:** Résultats de la Qualité de l'Eau Avant Filtration

	<b>Conductivité</b>	<b>Ph</b>	<b>DCO mg/l</b>	<b>DBO5</b>	<b>MES</b>	<b>Turbidité</b>
<b>27/05/2025</b>	<b>1,44</b>	<b>9.2</b>	<b>211,2</b>	<b>55</b>	<b>/</b>	<b>6,33</b>
<b>30/05/2024</b>	<b>1,463</b>	<b>8,24</b>	<b>80</b>	<b>30</b>	<b>72</b>	<b>3,8</b>
<b>03/06/2024</b>	<b>1,491</b>	<b>7,85</b>	<b>208</b>	<b>/</b>	<b>108</b>	<b>7,02</b>
<b>05/06/2024</b>	<b>1,558</b>	<b>8.17</b>	<b>128</b>	<b>95</b>	<b>132</b>	<b>10,2</b>
<b>09/06/2024</b>	<b>1,556</b>	<b>8,49</b>	<b>224</b>	<b>115</b>	<b>152</b>	<b>12,9</b>
<b>11/06/2024</b>	<b>1,591</b>	<b>8</b>	<b>240</b>	<b>145</b>	<b>186</b>	<b>20,5</b>

**IV.5.2. Résultats de la Qualité de l'Eau après Filtration**

**Tableau IV. 6:** Résultats de la Qualité de l'Eau après Filtration

	<b>Conductivité</b>	<b>Ph</b>	<b>DCO mg/l</b>	<b>DBO5</b>	<b>MES</b>
<b>27/05/2025</b>	<b>1,317</b>	<b>8.5</b>	<b>88</b>	<b>32</b>	<b>/</b>
<b>30/05/2024</b>	<b>1,461</b>	<b>8,18</b>	<b>32</b>	<b>20</b>	<b>8</b>
<b>03/06/2024</b>	<b>1,481</b>	<b>7.61</b>	<b>80</b>	<b>/</b>	<b>18</b>
<b>05/06/2024</b>	<b>1,541</b>	<b>7.82</b>	<b>32</b>	<b>40</b>	<b>90</b>
<b>09/06/2024</b>	<b>1,4781</b>	<b>8,15</b>	<b>112</b>	<b>100</b>	<b>88</b>
<b>11/06/2024</b>	<b>1,577</b>	<b>7,88</b>	<b>192</b>	<b>110</b>	<b>74</b>

**Tableau IV.7:** Mesure de la turbidité après filtration

<b>Turbidité (NTU)</b>		
	<b>Sortie</b>	<b>heure</b>
<b>27/05/2025</b>	<b>5,32</b>	<b>12:00:00</b>
<b>30/05/2024</b>	<b>2,23</b>	<b>12:22:00</b>
	<b>2,02</b>	<b>13:27:00</b>
	<b>1,98</b>	<b>14:31:00</b>
	<b>2,53</b>	<b>15:35:00</b>

Tableau IV.8 ( Suite )

	Turbidité (NTU)	
	Sortie	heure
03/06/2024	2,87	11:00:00
	2,79	12:25:00
	2,29	13:32:00
05/06/2024	6,87	12:26:00
	6,5	13:31:00
	6,61	14:35:00
	8,04	15:41:00
09/06/2024	6,48	11:14:00
	6,17	12:23
	6,11	13:33
	6,04	14:36
11/06/2024	14,2	11:59
	12,8	13:02

IV.5.3. Graphiques des paramètres de qualité de l'eau

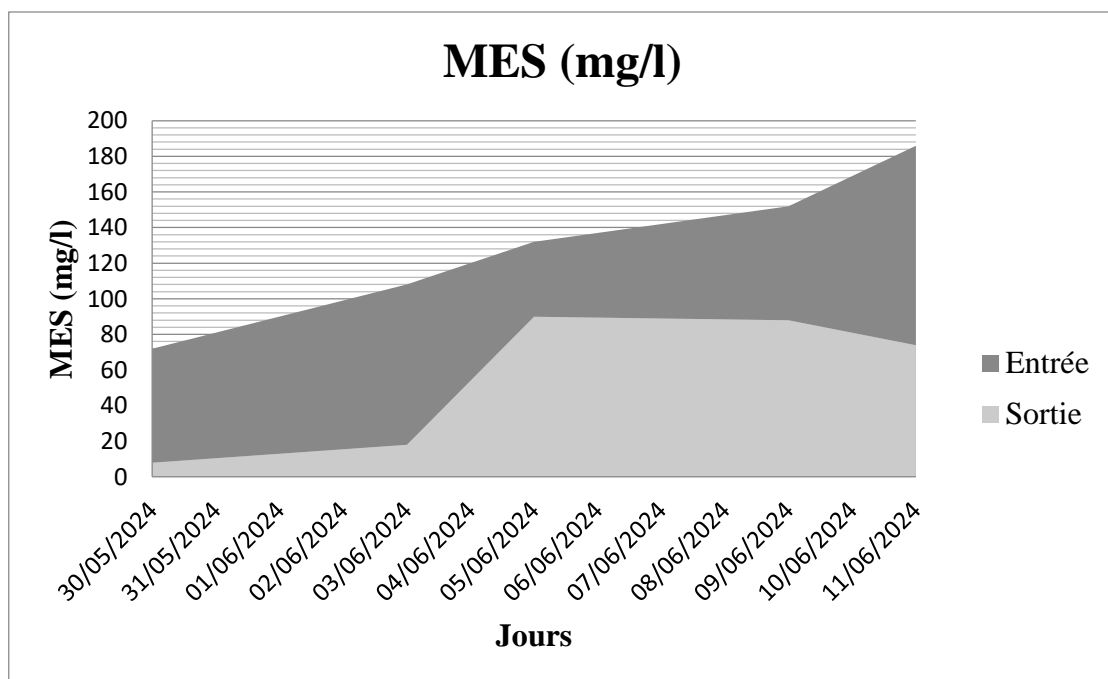


Figure IV.12: Variation de MES avant et après filtration

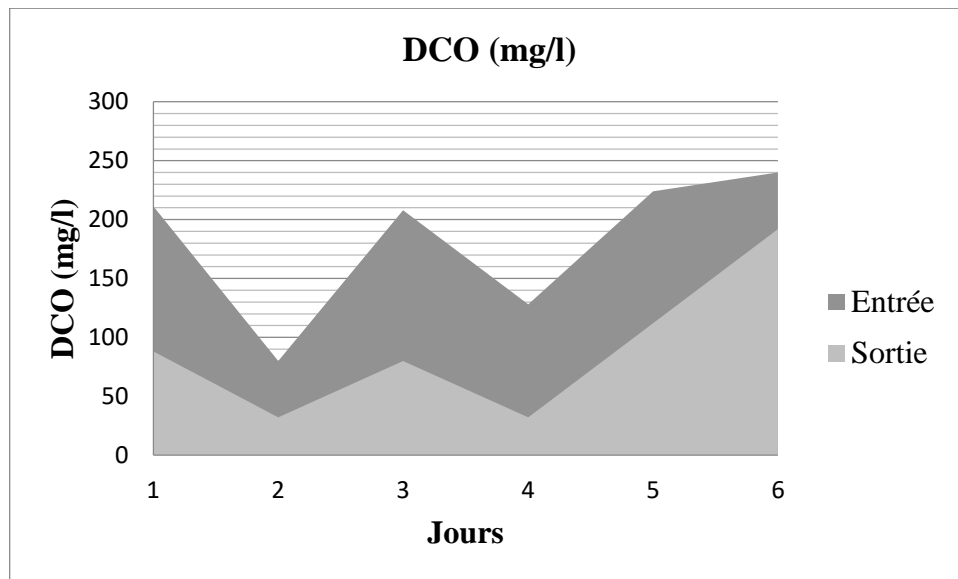


Figure IV.13: Variation de la DCO avant et après filtration

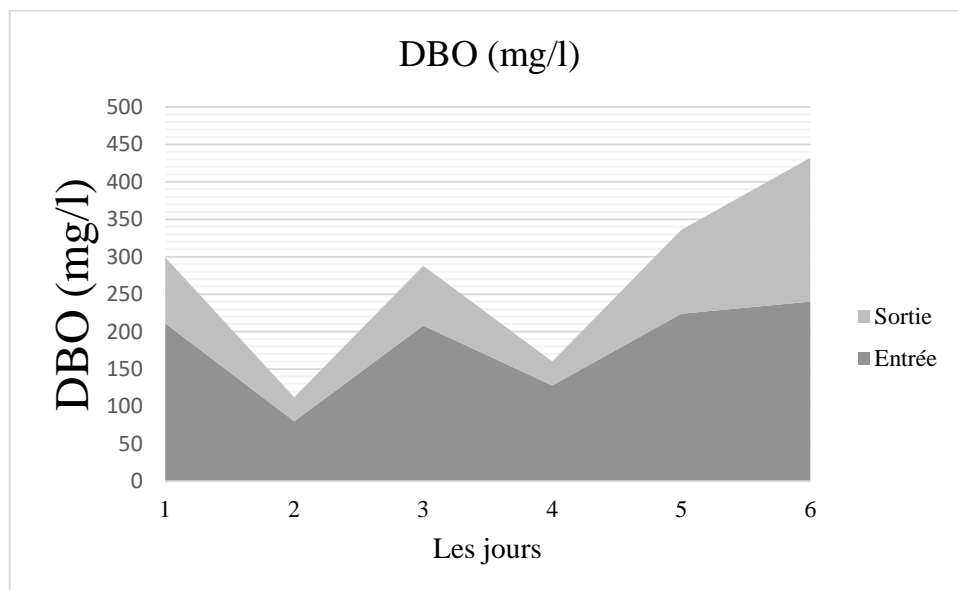


Figure IV.14: Variation de la DBO<sub>5</sub> avant et après filtration

## IV.6. Discussion

Les points de discussion suivants concernent les analyses des paramètres de l'eau

### IV.6.1. Conductivité

La conductivité des eaux usées varie légèrement après filtration, avec une réduction modérée. Avant filtration, les valeurs oscillent entre 1,44 et 1,591 mS/cm, et après filtration, elles sont comprises entre 1,317 et 1,577 mS/cm. Cette diminution, bien que faible, suggère

que le filtre à sable élimine certaines particules ioniques, mais reste limité pour la réduction des ions dissous. Cependant, au fur et à mesure des jours d'utilisation, la baisse de la conductivité devient moins marquée, ce qui peut indiquer que le filtre commence à s'encrasser. Un colmatage du filtre pourrait limiter son efficacité globale.

#### **IV.6.2. PH**

Le pH initial, qui se situe entre 8 et 9,2, devient plus stable après filtration, entre 7,61 et 8,5. Cette légère neutralisation est un signe d'une amélioration de la qualité de l'eau, le pH se stabilisant dans une plage favorable pour l'irrigation. Cependant, les faibles variations du pH après plusieurs jours peuvent aussi indiquer un début de saturation du filtre, d'autant plus si aucune réduction supplémentaire n'est observée au fil du temps.

#### **IV.6.3. Demande Chimique en Oxygène (DCO)**

La DCO montre une réduction importante après filtration, avec une diminution de 58% à 75% selon les jours. Cependant, sur les dernières journées, la DCO a tendance à stagner ou à être moins réduite, voire à remonter (192 mg/l le 11/06/2024 contre 224 mg/l avant filtration). Ce comportement est typique d'un filtre en cours de colmatage. Lorsque les pores du sable se colmatent avec le temps, l'efficacité du filtre diminue, ce qui justifie la nécessité d'un nettoyage régulier.

#### **IV.6.4. Demande Biochimique en Oxygène (DBO5)**

Les résultats pour la DBO5 suivent une tendance similaire à celle de la DCO. Initialement, la filtration entraîne une réduction significative de la DBO5, allant jusqu'à 33% de réduction le 30/05/2024. Cependant, des augmentations de DBO5 après filtration (par exemple, de 115 mg/l avant filtration à 110 mg/l après filtration le 11/06/2024) peuvent indiquer la saturation du filtre. Cela pourrait signifier que la dégradation biologique à l'intérieur du filtre devient moins efficace en raison du colmatage, ce qui rend le nettoyage du filtre indispensable.

#### **IV.6.5. Matières en Suspension (MES)**

Les MES subissent la réduction la plus significative après filtration, avec une élimination allant de 60% à 88%. Néanmoins, sur certaines dates, la réduction devient moins efficace, par exemple avec une valeur de 18 mg/l le 11/06/2024 contre 72 mg/l avant filtration,



soit une réduction moindre que les jours précédents. Cette accumulation de matières en suspension dans le sable peut boucher les pores du filtre, ce qui non seulement réduit la capacité de filtration, mais augmente aussi le risque de colmatage. Lorsque les MES ne sont plus efficacement éliminées, cela constitue un signal clair qu'un nettoyage du filtre à sable est nécessaire pour restaurer son efficacité.

#### **IV.6.6. Turbidité**

La turbidité subit une réduction significative après la filtration sur sable, avec une élimination allant de 50% à 75%. Par exemple, la valeur de turbidité à l'entrée le 03/06/2024 était de 7,02 NTU, contre 2,8 NTU après filtration, soit une réduction d'environ 60%.

#### **IV.7. Colmatage et Besoin de Nettoyage**

Le colmatage du filtre à sable est un phénomène naturel qui se produit lorsque les pores du sable se bouchent avec le temps à cause de l'accumulation de matières solides, organiques et inorganiques. Ce processus de colmatage est illustré par la réduction moindre de certains paramètres au fil du temps, comme la DCO, la DBO5, et les MES. Lorsque les performances de filtration stagnent ou diminuent, cela indique que le filtre ne peut plus assurer une bonne rétention des particules et qu'un nettoyage est nécessaire.

Le nettoyage du filtre à sable a été réalisé en deux étapes distinctes. Tout d'abord, une **injection d'air** a été effectuée pendant une durée de 5 minutes. Cette étape permet de désagréger et de décoller les particules de saleté et les matières fines piégées dans le sable, facilitant ainsi leur élimination. Ensuite, une **injection d'eau** a été réalisée pendant 10 minutes. L'eau injectée rince le filtre en éliminant les particules désagrégées, assurant ainsi une remise en état du filtre pour un fonctionnement optimal.

#### **IV.8. Analyse des pertes de charge**

Les essais pour déterminer les pertes de charge ont été réalisés en mesurant la variation de la pression à travers le filtre. Les tableaux présentés résumant les résultats d'une série d'essais réalisés sur un filtre à sable. Les essais ont été conduits sur plusieurs jours, du 27 mai au 11 juin 2024, et à différents moments de la journée. Le paramètre principal mesuré est le niveau de l'eau, qui est relevé à différents temps après le début de chaque essai. D'autres paramètres, comme la perte de charge, sont également calculés et reportés

TableauIV.9: Résultats de l'étude du lit de sable avec les eaux usées

27/05/2024 (1h)												
Niveau du liquide dans la tube piézométrique L à 30l/h	70,5	81,2	86,4	87,5	89	90	91,1	92,1	93,2	94,3	96,2	96,8
Pression à 30l/h	70,5	58,2	53,4	52	51	49,5	48,1	46,6	45,2	43,8	40,7	36,3
Perte de charge ( cm,C,E)	26,5	15,8	10,6	9,5	8	7	5,9	4,9	3,8	2,7	0,8	0,2
Après 15min												
Niveau du liquide dans la tube piézométrique L à 30l/h	74	84	89	90,1	91,5	92,6	93,8	94,7	95,5	96,5	95,5	94
Pression à 30l/h	74	61	56	54,6	53,5	52,1	50,8	49,2	47,5	46	40	33,5
Perte de charge ( cm,C,E)	23	13	8	6,9	5,5	4,4	3,2	2,3	1,5	0,5	1,5	3
Après 15min												
Niveau du liquide dans la tube piézométrique L à 30l/h	73,4	83,5	88,4	89,6	90,7	92	93	94	94,9	95,9	96,2	95,3
Pression à 30l/h	73,4	60,5	55,4	54,1	52,7	51,5	50	48,5	46,9	45,4	40,7	34,8
Perte de charge ( cm,C,E)	23,6	13,5	8,6	7,4	6,3	5	4	3	2,1	1,1	0,8	1,7
30/05/2024 11h:00-15h:35												
11h:22												
Niveau du liquide dans la tube piézométrique L à 36l/h	63,8	80	86,4	87,7	89	90,5	91,9	92,6	94	95,4	95,9	94,6
Pression à 36l/h	63,8	57	53,4	52,2	51	50	48,9	47,1	46	44,9	40,4	34,1
Perte de charge ( cm,C,E)	33,2	17	10,6	9,3	8	6,5	5,1	4,4	3	1,6	1,1	2,4
12h:22												
Niveau du liquide dans la tube piézométrique L à 36l/h	61,5	78	84	85,3	86,6	88	89,4	90,4	91,7	93	96	96
Pression à 36l/h	61,5	55	51	49,8	48,6	47,5	46,4	44,9	43,7	42,5	40,5	35,5
Perte de charge ( cm,C,E)	35,5	19	13	11,7	10,4	9	7,6	6,6	5,3	4	1	1
13h:27												
Niveau du liquide dans la tube piézométrique L à 36l/h	63	79	84,7	86	87,3	88,6	89,9	90,7	92	93,2	96	95,5
Pression à 36l/h	63	56	51,7	50,5	49,3	48,1	46,9	45,2	44	42,7	40,5	35

Perte de charge ( cm,C,E)	34	18	12,3	11	9,7	8,4	7,1	6,3	5	3,8	1	1,5
<b>14h:31</b>												
Niveau du liquide dans la tube piézométrique L à 36l/h	64,5	81	86,4	87,5	88,5	89,9	91	91,8	93	93,8	96	95,1
Pression à 36l/h	64,5	58	53,4	52	50,5	49,4	48	46,3	45	43,3	40,5	34,6
Perte de charge ( cm,C,E)	32,5	16	10,6	9,5	8,5	7,1	6	5,2	4	3,2	1	1,9
<b>15h:35</b>												
Niveau du liquide dans la tube piézométrique L à 36l/h	63,7	79,5	85	85,5	84,5	87,2	88	88,5	89	90	91,6	94,5
Pression à 36l/h	63,7	56,5	52	50	46,5	46,7	45	43	41	39,5	36,1	34
Perte de charge ( cm,C,E)	33,3	17,5	12	11,5	12,5	9,8	9	8,5	8	7	5,4	2,5
<b>03/06/2024 10h:04-14h:38</b>												
<b>10h:04</b>												
Niveau du liquide dans la tube piézométrique L à 36l/h	64	77,1	83,2	84,6	86	87,5	89	90,5	92	93,4	96,9	94,6
Pression à 30l/h	64	54,1	50,2	49,1	48	47	46	45	44	42,9	41,4	34,1
Perte de charge ( cm,C,E)	33	19,9	13,8	12,4	11	9,5	8	6,5	5	3,6	0,1	2,4
<b>11h:20</b>												
Niveau du liquide dans la tube piézométrique L à 36l/h	62	76	81,3	92,5	83,6	84,7	85,9	87,2	88,5	89,7	93,4	94,4
Pression à 36l/h	62	53	48,3	57	45,6	44,2	42,9	41,7	40,5	39,2	37,9	33,9
Perte de charge ( cm,C,E)	35	21	15,7	14,5	13,4	12,3	11,1	9,8	8,5	7,3	3,6	2,6
<b>12h:25</b>												
Niveau du liquide dans la tube piézométrique L à 36l/h	59	73,4	78,5	79,7	80,8	81,9	83	84,1	85,1	86,4	90	93,3
Pression à 36l/h	59	50,4	45,5	44,2	42,8	41,4	40	38,6	37,1	35,9	34,5	32,8
Perte de charge ( cm,C,E)	38	23,6	18,5	17,3	16,2	15,1	14	12,9	11,9	10,6	7	3,7
<b>13h:22</b>												
Niveau du liquide dans la tube piézométrique L à 36l/h	63,6	74,6	79,1	80	81	81,9	82,9	83,5	84,2	85	88,4	92,5
Pression à 36l/h	63,6	51,6	46,1	44,5	43	41,4	39,9	38	36,2	34,5	32,9	32
Perte de charge ( cm,C,E)	33,4	22,4	17,9	17	16	15,1	14,1	13,5	12,8	12	8,6	4,5
<b>14h:38</b>												
Niveau du liquide dans la tube piézométrique L à 36l/h	58	75	79,5	80,6	78	79,8	81,1	83	85,5	86,5	92,5	93
Pression à 36l/h	58	52	46,5	45,1	40	39,3	38,1	37,5	37,5	36	37	32,5
Perte de charge ( cm,C,E)	39	22	17,5	16,4	19	17,2	15,9	14	11,5	10,5	4,5	4
<b>05/06/2024 ( 11:02-15)</b>												
<b>12h:26</b>												
Niveau du liquide dans la tube piézométrique L à 36l/h	55	66	71,2	72,9	74,4	75,8	77,3	78,4	79,7	80,9	86	95,4

Pression à 36l/h	55	43	38,2	37,4	36,4	35,3	34,3	32,9	31,7	30,4	30,5	34,9
Perte de charge ( cm,C,E)	42	31	25,8	24,1	22,6	21,2	19,7	18,6	17,3	16,1	11	1,6
<b>13h:31</b>												
Niveau du liquide dans la tube piézométrique L à 36l/h	59,5	65	72	73	73,7	74,8	75,8	76,6	77,5	78,5	82,4	95,6
Pression à 36l/h	59,5	42	39	37,5	35,7	34,3	32,8	31,1	29,5	28	26,9	35,1
Perte de charge ( cm,C,E)	37,5	32	25	24	23,3	22,2	21,2	20,4	19,5	18,5	14,6	1,4
<b>14h:35</b>												
Niveau du liquide dans la tube piézométrique L à 36l/h	65,6	67	73,7	74,3	75	75,6	76,5	77	77,8	78,5	81,9	93
Pression à 36l/h	65,6	44	40,7	38,8	37	35,1	33,5	31,5	29,8	28	26,4	32,5
Perte de charge ( cm,C,E)	31,4	30	23,3	22,7	22	21,4	20,5	20	19,2	18,5	15,1	4
<b>09/06/2024 10h:07-15h:19</b>												
<b>10h:09</b>												
Niveau du liquide dans la tube piézométrique L à 36l/h	65	72,1	78,5	80,4	82,5	83,7	85,7	87	88,6	90	93,5	96,5
Pression à 36l/h	65	49,1	45,5	44,9	44,5	43,2	42,7	41,5	40,6	39,5	38	36
Perte de charge ( cm,C,E)	32	24,9	18,5	16,6	14,5	13,3	11,3	10	8,4	7	3,5	0,5
<b>11h:14</b>												
Niveau du liquide dans la tube piézométrique L à 36l/h	58,1	66,5	72,3	73,6	75	76,2	77,9	79	79,8	80,6	84,6	96,2
Pression à 36l/h	58,1	43,5	39,3	38,1	37	35,7	34,9	33,5	31,8	30,1	29,1	35,7
Perte de charge ( cm,C,E)	38,9	30,5	24,7	23,4	22	20,8	19,1	18	17,2	16,4	12,4	0,8
<b>12h:23</b>												
Niveau du liquide dans la tube piézométrique L à 36l/h	53	59	64,5	66,9	67,5	69,4	70,1	70,8	71	72,2	76,4	96,5
Pression à 36l/h	53	36	31,5	31,4	29,5	28,9	27,1	25,3	23	21,7	20,9	36
Perte de charge ( cm,C,E)	44	38	32,5	30,1	29,5	27,6	26,9	26,2	26	24,8	20,6	0,5
<b>13h:33</b>												
Niveau du liquide dans la tube piézométrique L à 36l/h	42,5	49,1	54,3	54,8	56	56,1	56,6	58	60,9	61,5	65	96,5
Pression à 36l/h	42,5	26,1	21,3	19,3	18	15,6	13,6	12,5	12,9	11	9,5	36
Perte de charge ( cm,C,E)	54,5	47,9	42,7	42,2	41	40,9	40,4	39	36,1	35,5	32	0,5
<b>14h:36</b>												
Niveau du liquide dans la tube piézométrique L à 36l/h	44,5	47,6	51,4	52,5	53,1	53,3	53,9	54,2	54,9	55,4	62,1	96,5
Pression à 36l/h	44,5	24,6	18,4	17	15,1	12,8	10,9	8,7	6,9	4,9	6,6	36
Perte de charge ( cm,C,E)	52,5	49,4	45,6	44,5	43,9	43,7	43,1	42,8	42,1	41,6	34,9	0,5
<b>11/06/2024 10h:45-12h:44</b>												
<b>10h:50</b>												
Niveau du liquide dans la tube piézométrique L à 36l/h	35,2	40,8	47,6	49,8	51,2	52,4	54,3	55,2	56,7	58,8	66	96,5
Pression à 36l/h	35,2	17,8	14,6	14,3	13,2	11,9	11,3	9,7	8,7	8,3	10,5	36

Perte de charge ( cm,C,E)	61,8	56,2	49,4	47,2	45,8	44,6	42,7	41,8	40,3	38,2	31	0,5
---------------------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	----	-----

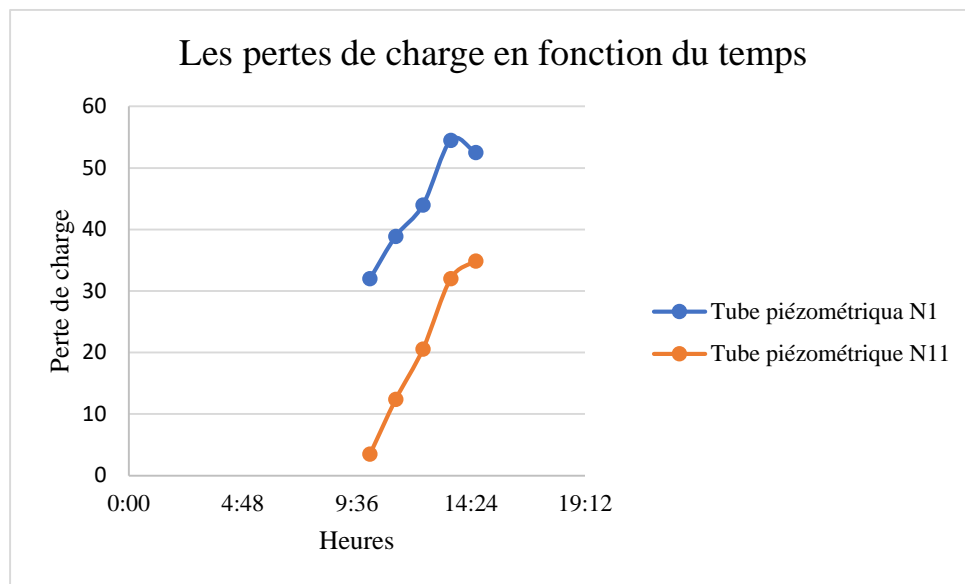


Figure IV.15: Les pertes de charge dans le tube piézométrique le plus haut et le plus bas

➤ **Interprétation**

Au fil des jours, on observe une augmentation générale de la perte de charge. Cette évolution est caractéristique d'un processus de colmatage progressif du filtre. Les particules en suspension dans l'eau se déposent sur la surface des grains de sable, réduisant ainsi la porosité du milieu filtrant et augmentant la résistance à l'écoulement.

Les pertes de charge dans le tube piézométrique le plus haut sont nettement supérieures à celles du tube piézométrique le plus bas. Cela indique que les pertes de charge augmentent proportionnellement à la hauteur du sable dans le filtre. En effet, plus le sable est haut, plus la résistance à l'écoulement de l'eau à travers les grains de sable augmente, ce qui entraîne une augmentation des pertes de charge

Le fait que les essais aient été arrêtés le 11 juin 2024 suggère que le filtre était alors complètement colmaté. Les valeurs de perte de charge et de niveau d'eau à cette date confirment cette hypothèse.

**Conclusion**

Les résultats des essais montrent clairement que le filtre à sable s'est colmaté progressivement au cours de la période d'observation. Ce colmatage est dû au dépôt de particules en suspension sur la surface des grains de sable. L'augmentation de la perte de charge et la diminution du niveau de l'eau sont les conséquences directes de ce phénomène.

Les résultats montrent que le filtre à sable est efficace pour améliorer la qualité de l'eau, notamment en réduisant les matières en suspension (MES) et la demande chimique en oxygène (DCO). Cependant, certains paramètres, tels que la DBO5 et la DCO, indiquent une diminution de l'efficacité de filtration avec le temps, principalement en raison du colmatage progressif du filtre. Il est donc essentiel de procéder à des nettoyages réguliers, en utilisant une injection d'air suivie d'une injection d'eau, pour restaurer l'efficacité du système.

En dépit des performances satisfaisantes du filtre pour éliminer les particules et certaines matières organiques, il est important de noter que le filtre à sable seul n'est pas suffisant pour éliminer les éléments pathogènes, comme les bactéries et autres agents microbiens présents dans l'eau usée. Pour garantir une eau totalement sûre pour la réutilisation en irrigation, un traitement complémentaire est nécessaire pour désinfecter l'eau.

Nous avons envisagé l'utilisation de l'ozone comme méthode de désinfection pour compléter le traitement par filtration à sable. Nous n'avons pas pu faire les essais L'ozone est reconnu pour son efficacité dans l'élimination des agents pathogènes, en offrant une désinfection rapide et sans résidus chimiques. Malheureusement, nous n'avons pas pu réaliser d'essais pratiques avec l'ozone, car nous n'avons pas trouvé de laboratoire capable de réaliser les analyses bactériologiques nécessaires pour valider ce traitement complémentaire.

Ainsi, bien que le filtre à sable améliore la qualité de l'eau pour certaines applications, la mise en place d'un traitement complémentaire, comme la désinfection par ozone ou une autre méthode, est indispensable pour garantir une eau sans danger pour l'irrigation, en éliminant efficacement les éléments pathogènes.

# **Chapitre V :**

**Dimensionnement du filtre à  
sable et du bassin de  
désinfection**

## **CHAPITRE V :                    Dimensionnement du filtre à sable et du bassin de Désinfection**

### **V. Introduction**

Le dimensionnement du filtre à sable et du bassin de désinfection est une étape clé dans le traitement des eaux usées. Ce chapitre examine les principes et les méthodes pour concevoir ces systèmes de manière efficace, afin d'assurer une purification optimale et de répondre aux exigences réglementaires en matière de qualité de l'eau.

#### **V.1. Dimensionnement du filtre à sable**

Le filtre à sable rapide utilisé dans le traitement des eaux est caractérisé par :

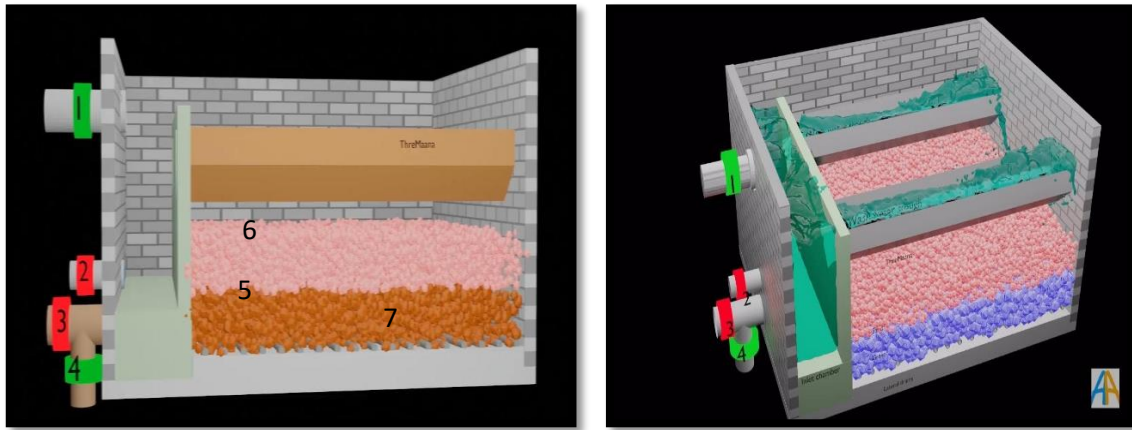
**Tableau V.1:** Caractéristique du filtre a sable rapide

<b>Paramètres</b>	<b>Valeur</b>	<b>Unité</b>
<b>Vitesse</b>	<b>5 à 7</b>	<b>m<sup>3</sup>/h</b>
<b>Surface du sable</b>	<b>40 à 60</b>	<b>m<sup>2</sup></b>
<b>Longueur</b>	<b>(1---&gt;1.25)×Largeur</b>	<b>m</b>
<b>Hauteur du sable</b>	<b>0.6 à 0.8</b>	<b>m</b>
<b>Hauteur du gravier</b>	<b>0.3 à 0.6</b>	<b>m</b>
<b>Hauteur de l'eau</b>	<b>1.8 à 2.5</b>	<b>m</b>
<b>Nombre des filtres</b>	<b>Surface totale / Surface du sable</b>	<b>/</b>
<b>Nombre des filtres de réserve</b>	<b>Si <math>N \leq 5</math> : <math>N_{réserve} = 1</math></b> <b>Si <math>5 &lt; N \leq 30</math> : <math>N_{réserve} = 2</math></b> <b>Si <math>N &gt; 30</math> : <math>N_{réserve} = 4</math></b>	<b>/</b>
<b>Nombre total des filtres</b>	<b><math>N_{filtres} + N_{réserves}</math></b>	<b>/</b>

**Source :** [23], [24]

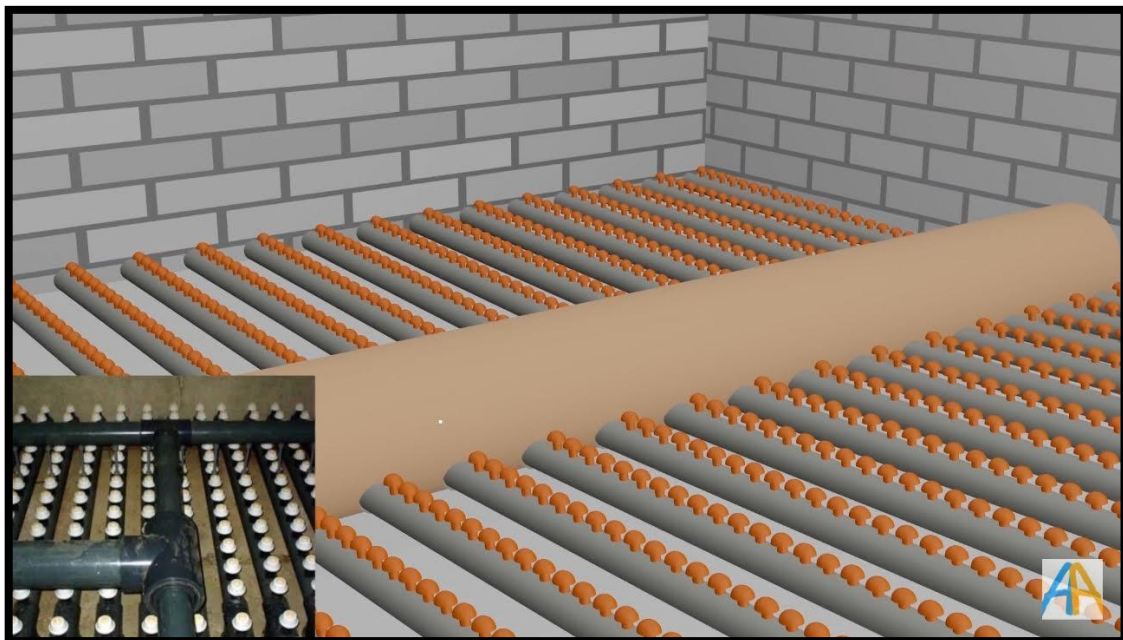


**CHAPITRE V :**                    *Dimensionnement du filtre à sable et du bassin de Désinfection*



**FigureV.1:** Représentation 3D d'un filtre à sable rapide [25]

- 1 Entrée d'eau brute
- 2 et 3 pour vidanger l'eau de lavage
- 4 eau filtrée
- 5 graviers
- 6 Sable
- 7 systèmes de vidange



**FigureV.2:** Système de vidange sous filtre à sable [25]

## **CHAPITRE V : Dimensionnement du filtre à sable et du bassin de Désinfection**

### **V.1.1. La surface du lit de sable**

Le calcul de la surface est en fonction de la vitesse de filtration optimale (v)

$$Q_{ptp} = V \times S_{lit}$$

Avec :

$S_{lit}$  : Surface du lit (m<sup>2</sup>).

V : Vitesse de filtration, on prend V = 5 m/h.

Q<sub>ptp</sub> : Débit de point en temps de pluie

$$D'où : S_{lit} = \frac{Q_{ptp}}{V} = \frac{4800}{5} = 960m^2$$

### **V.1.2. Nombre des filtres**

Dans le filtre à sable rapide la surface du sable est de 40 à 60 [24]. On utilise des filtres de surface 60m<sup>2</sup>

$$N_{filtre} = \frac{S_{totale}}{60} = \frac{960}{60} = 16 \text{ filtres}$$

### **V.1.3. Nombre des filtres de réserve**

On a  $5 < N \leq 30$  donc  $N_{filtre \text{ de réserve}} = 2$  [23]

$$N_{filtre \text{ de réserve}} = 16 + 2$$

On utilise 18 filtres

### **V.1.4. La largeur (b) et la longueur (L) du filtre**

On a  $L = 1.25b$  [24]

Et on a :  $S = L \times b$

Donc :  $S = 1.25b \times b$

$$b = (S/1.25)^{1/2} = (60/1.25)^{1/2}$$

$$b = 6.9m$$

## **CHAPITRE V : Dimensionnement du filtre à sable et du bassin de Désinfection**

Donc  $L=1.25b$

$L=8.6m$

### **V.1.5. Hauteur de la couche filtrante**

Dans le filtre à sable rapide Hauteur de la couche filtrante est de 0.6 à 0.8 [24]

On prend  $H = 0.8m$

### **V.1.6. Les pertes de charge**

Pour calculer les pertes de charges on utilisera la formule de KOZENY :

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{k\mu V(1 - e)^2}{gd^2\varepsilon^3\phi^2}$$

Avec :  $\Delta P$  : Perte de charge (m)

H : Hauteur du lit (m)

v : Vitesse de filtration (m/s)

$d_p$  : Diamètre moyen des particules (m)

$\mu$  : Viscosité cinématique de 'eau à 20°C

$\varepsilon$  : porosité

K : Constant de Kozeny

$\phi$  : Facteur de forme 1 pour les grains spherique

**TableauV.2:Propriétés du lit de filtration**

<b>d (mm)</b>	<b>K</b>	<b><math>\varepsilon</math></b>	<b><math>\mu</math> (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>H (m)</b>	<b><math>\rho_{\text{sable}}</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>0.5</b>	<b>200</b>	<b>0.4</b>	<b>10<sup>-6</sup></b>	<b>0.8</b>	<b>2610</b>

## **CHAPITRE V : Dimensionnement du filtre à sable et du bassin de Désinfection**

$$\Delta H = \frac{200 \times 10^{-6} \times \frac{5}{3600} \times (1 - 0.4)^2}{9.81 \times (0.5 \times 10^{-3})^2 \times 0.4^3 \times 1} \times 0.8$$

$$\Delta H = 0.51\text{m}$$

### **V.2. Dimensionnement du système de drainage**

#### **V.2.1. Surface des perforations**

S<sub>des perforations</sub> = 0.3% de la surface du lit [22]

$$S_{\text{perforations}} = 0.003 \times 60 = 0.18\text{m}^2$$

#### **V.2.2. La surface des latéraux**

S<sub>Des latéraux</sub> = 2 × La surface de perforation [22]

$$S_{\text{Des latéraux}} = 2 \times 0.18 = 0.36\text{m}^2$$

#### **V.2.3. La surface du collecteur**

S<sub>collecteur</sub> = 2 × La surface des latéraux [22]

$$S_{\text{du collecteur}} = 2 \times 0.36 = 0.72\text{m}^2$$

#### **V.2.4. Diamètre du collecteur**

$$S = \frac{\pi D^2}{4} \text{ donc } D = \left(\frac{S \times 4}{\pi}\right)^{0.5} = 0.96\text{m} = 96\text{cm}$$

#### **V.2.5. L'espacement des canalisations latérales**

L'espacement des canalisations latérales doit être compris entre 150 et 300 mm. [22]

On choisit un espacement de 15 cm

#### **V.2.6. Le nombre de latéraux**

$$N_{\text{latéraux}} = \frac{\text{Longueur du lit}}{\text{Espacement}}$$

$$N_{\text{latéraux}} = \frac{8.6}{0.15} = 58$$

Le nombre total des latéraux = 58 × 2 = 116

## **CHAPITRE V : Dimensionnement du filtre à sable et du bassin de Désinfection**

### **V.2.7. La longueur de chaque latéral**

$$\text{La longueur de chaque latéral} = \frac{\text{Largeur} - \text{diamètre du collecteur}}{2}$$

$$\text{La longueur de chaque latéral} = \frac{6.9 - 0.96}{2} = \mathbf{2.97m}$$

### **V.2.8. Le diamètre des perforations**

Le diamètre des perforations des canalisations latérales doit être compris entre 5 et 12 mm.

[22]

On suppose le diamètre des perforations est 12 mm

### **V.2.9. Surface d'une perforation**

$$S_{\text{perforation}} = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi 0.012^2}{4} = \mathbf{113.04 \times 10^{-6} m^2}$$

### **V.2.10. Nombre total des perforations**

$$N_{\text{T.perforations}} = \frac{\text{Surface total de perforation}}{\text{Surface de perforation}}$$

$$N_{\text{T.perforations}} = \frac{0.18}{113.04 \times 10^{-6}} = \mathbf{1593}$$

### **V.2.11. Nombre des perforations par latéral**

$$N_{\text{perforation par latéral}} = \frac{\text{Nombre total de perforation}}{\text{Nombre des latéraux}}$$

$$N_{\text{perforation par latéral}} = \frac{1593}{116} = \mathbf{14}$$

### **V.2.12. Espacement des perforations**

$$E_{\text{des perforation}} = \frac{\text{La longueur de chaque latéral}}{\text{Nombre des perforation}}$$

$$E_{\text{des perforation}} = \frac{2.97}{14} = \mathbf{21cm}$$

## **CHAPITRE V : Dimensionnement du filtre à sable et du bassin de Désinfection**

### **V.2.13. La surface de perforation dans chaque latéral**

$S_{\text{perforation dans chaque latéral}} = \text{Nombre des perforation} \times \text{Surface de perforation}$

$$S_{\text{perforation dans chaque latéral}} = 14 \times 113.04 \times 10^{-6} = 1.58256 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

### **V.2.14. La surface d'un latéral**

$S_{\text{latéral}} = 2 \times \text{La surface de perforation}$  [22]

$$S_{\text{Latéral}} = 2 \times 1.58256 \times 10^{-3} = 3.16512 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

### **V.2.15. Le diamètre des Latéraux**

$$D = \left( \frac{S \times 4}{\pi} \right)^{0.5} = 0.06 \text{ m} = 6 \text{ cm}$$

### **V.2.16. Vérification du rapport**

$$\frac{\text{Longueur de latéraux}}{\text{Diametre des Latéraux}} < 60 \text{ [22]}$$

$$\frac{2.97}{0.06} = 49.5 < 60$$

**Tableau V.3 :Fiche technique du système de drainage**

<b>Paramètre</b>	<b>Unité</b>	<b>Valeur</b>
<b>Surface totale des perforations</b>	<b>m<sup>2</sup></b>	<b>0.18</b>
<b>La surface des latéraux</b>	<b>m<sup>2</sup></b>	<b>0.36</b>
<b>La surface du collecteur</b>	<b>m<sup>2</sup></b>	<b>0.72</b>
<b>Diamètre du collecteur</b>	<b>cm</b>	<b>96</b>
<b>L'espacement des canalisations latérales</b>	<b>cm</b>	<b>15</b>
<b>Le nombre total des latéraux</b>		<b>116</b>
<b>La longueur de chaque latéral</b>	<b>m</b>	<b>2.97</b>
<b>le diamètre des perforations</b>	<b>mm</b>	<b>12</b>
<b>Surface d'une perforation</b>	<b>m<sup>2</sup></b>	<b>113.04 × 10<sup>-6</sup></b>
<b>Total nombre de perforations</b>		<b>1593</b>
<b>Nombre des perforation par latéral</b>		<b>14</b>

## **CHAPITRE V : Dimensionnement du filtre à sable et du bassin de Désinfection**

**Tableau V.4 ( Suite )**

Paramètre	Unité	Valeur
Espacement des trous	cm	21
La surface de perforation dans chaque latéral	m <sup>2</sup>	1.58256×10 <sup>3</sup>
La surface d'un Latéral	m <sup>2</sup>	3.16512×10 <sup>-3</sup>
Le diamètre des Latéraux	cm	6

### **V.3. Dimensionnement du rétro-lavage**

Pour dimensionner efficacement le système de rétro-lavage, il est essentiel de déterminer divers paramètres

#### **V.3.1. La vitesse de sédimentation de l'eau du média filtrant**

On utilise la relation simplifiée de Haider et Levenspiel

$$\text{Equation (01) : } V_t = V_t^* \times [\rho^2 / (\mu \times (\rho_p - \rho_f) \times g)]^{-1/3} \quad [26]$$

Avec :

$$\text{Equation (02) : } V_t^* = \left( \frac{18}{d_p^{*2}} + \frac{2.335 - 1.744\Phi}{d_p^{*0.5}} \right)^{-1} \quad [26]$$

et

$$\text{Equation (03) : } d_p^* = d_p \times \left( \frac{\rho_f(\rho_p - \rho_f)g}{\mu^2} \right)^{1/3} \quad [26]$$

- $V_t$  : Vitesse de sédimentation (m/s)
- $V_t^*$  : vitesse terminale sans dimension
- $\rho_f$  : Masse volumique de l'eau à 20°C
- $\mu$  : Viscosité dynamique (Pa.s)
- $\Phi$  : Facetur de la forme de sable ( $\Phi=1$ )
- $g$  : L'accélération de la pesanteur
- $d_p^*$  : diamètre de particule sans dimension

**CHAPITRE V : Dimensionnement du filtre à sable et du bassin de Désinfection**

**Tableau V.5:** Caractéristique des fluides du rétro-lavage

	<b>Masse volumique à 20°C (<math>\rho_f</math>) (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Viscosité dynamique (Pa.s) à 20°C</b>
<b>L'eau</b>	1000	10 <sup>-3</sup>
<b>L'air sec</b>	1.204	1.81.10 <sup>-5</sup>

$$\text{On met } d_p \times \left( \frac{\rho_f(\rho_p - \rho_f)g}{\mu_f^2} \right)^{1/3} = A$$

$$A = (0.0005^3 \times 1000 \times (2610 - 1000) \times 9.81) / (10^{-3})^2$$

$$A = 1974.2625$$

$$d_p^* = A^{1/3}$$

$$= 1974.2625^{1/3}$$

$$d_p^* = 12.54$$

$$V_t^* = \left( \frac{18}{d_p^{*2}} + \frac{2.335 - 1.744\theta}{d^{*0.5}} \right)^{-1}$$

$$= \left( \frac{18}{12.54^2} + \frac{2.335 - 1.744}{12.54^{0.5}} \right)^{-1}$$

$$V_t^* = 3.56$$

Donc la vitesse de sédimentation de l'eau du média filtrant

$$V_{t \text{ eau}} = 3.56 \times \left( \frac{1000^2}{0.001 \times (2610 - 1000) \times 9.81} \right)^{-1/3}$$

$$V_{t \text{ eau}} = 0.089 \text{ m/s}$$

### V.3.2. La vitesse de sédimentation de l'air du média filtrant

$$A = (0.0005^3 \times 1000 \times (2610 - 1000) \times 9.81) / (1.81 \times 10^{-5})^2$$

$$A = 6026258,356$$



## **CHAPITRE V : Dimensionnement du filtre à sable et du bassin de Désinfection**

$$dp^* = A^{1/3}$$

$$dp^* = 181,98$$

$$Vt^* = \left( \frac{18}{181.98} + \frac{2.335-1.744}{181.98 \cdot 0.5} \right)^{-1}$$

$$Vt^* = 22,55$$

Donc La vitesse de sédimentation de l'air du média filtrant

$$V_{t \text{ eau}} = 22.55 \times \left( \frac{1000^2}{1.85 \times 10^{-5} \times (2610 - 1000) \times 9.81} \right)^{-1/3}$$

$$V_{t \text{ air}} = 0,15 \text{ m/s}$$

### **V.3.3. Le débit de lavage**

Selon Hubert Caban la vitesse ascendante d'un fluide doit être égale à approximativement 10% de la vitesse de sédimentation du média filtrant.

$$Q_{\text{lavage}} = 0.1 \times Vt \times S_{\text{filtre}}$$

#### **A. Débit d'eau de lavage**

$$Q_{\text{eau}} = 0.1 \times 0.089 \times 60 = 0.54 \text{ m}^3/\text{s}$$

#### **B. Débit d'air de lavage**

$$Q_{\text{eau}} = 0.1 \times 0.15 \times 60 = 0.98 \text{ m}^3/\text{s}$$

### **V.3.4. La perte de charge du média filtrant**

$$\Delta P = H \times g \times (1 - \epsilon_{\text{lit}}) \times (\rho_p - \rho)$$

#### **A. La perte de charge de l'eau du média filtrant**

$$\Delta P_{\text{eau}} = 0.8 * 9.81 * (1 - 0.4) * (2610 - 1000) = 0.97 \text{ m}$$

#### **B. La perte de charge de l'air du média filtrant**

$$\Delta P_{\text{air}} = 0.8 * 9.81 * (1 - 0.4) * (2610 - 1.204) = 1.5 \text{ m}$$

## **CHAPITRE V : Dimensionnement du filtre à sable et du bassin de Désinfection**

### **V.3.5. La durée d'une phase de rétro lavage**

Nous avons mené des essais en laboratoire afin de déterminer les paramètres les plus adaptés au rétrolavage du filtre à sable. Les résultats obtenus montrent qu'un cycle de rétrolavage de 21 heures, comprenant une phase d'injection d'air de 5 minutes et une phase d'injection d'eau de 10 minutes, permet de maintenir une perte de charge raisonnable dans le filtre. Ces paramètres ont été optimisés en fonction du pouvoir colmatant spécifique de l'eau brute utilisée

### **V.3.6. Le volume nécessaire à la phase de rétro-lavage**

$$V_i = Q_i \times t_{rv}$$

#### **A. Le volume d'eau à la phase de rétro-lavage**

$$V_{eau} = Q_{eau} \times t_{rv}$$

Tel que :  $t_{rv} = 10\text{min}$ .

$$V_{eau} = 0.54 \times 10 \times 60 = 324 \text{ m}^3$$

#### **B. Le volume d'air à la phase de rétro-lavage**

Tel que :  $t_{rv} = 5\text{min}$

$$V_{air} = 0.89 \times 5 \times 60 = 267\text{m}^3$$

**Tableau V.6:** Fiche technique de filtre sable

<b>Paramètre</b>	<b>Unité</b>	<b>valeur</b>
<b>La surface du lit de sable (<i>Slit</i>)</b>	<b>m<sup>2</sup></b>	960
<b>Nombre des filtres</b>		16
<b>Nombre des filtres de reserve</b>		2
<b>Nombre des filtres total</b>		18
<b>Les pertes de charge d'un filtre à sable (<math>\Delta P</math>)</b>	m	0.68
<b>La vitesse de sédimentation de l'eau du média filtrant (<math>V_{t_{eau}}</math>)</b>	m/s	0.089

**CHAPITRE V : Dimensionnement du filtre à sable et du bassin de Désinfection**

**TableauV.7 ( Suite )**

<b>Paramètre</b>	<b>Unité</b>
<b>La vitesse de sédimentation de l'air du média filtrant (<math>V_{tair}</math>)</b>	m/s
<b>Débit d'eau de lavage (<math>Q_{eau}</math>)</b>	$m^3/s$
<b>Débit d'air de lavage (<math>Q_{air}</math>)</b>	$m^3/s$
<b>La perte de charge de l'eau du média filtrant (<math>\Delta P_{eau}</math>)</b>	m
<b>La perte de charge de l'air du média filtrant (<math>\Delta P_{air}</math>)</b>	m
<b>Volume d'eau à la phase de rétro-lavage (<math>V_{eau}</math>)</b>	$m^3$
<b>Volume d'air à la phase de rétro-lavage (<math>V_{air}</math>)</b>	$m^3$

Le filtre à sable est efficace pour retenir les particules en suspension et certains agents polluants, mais il ne permet pas d'éliminer les micro-organismes pathogènes tels que les bactéries, les virus. Afin d'assurer une élimination adéquate des agents pathogène il est nécessaire d'intégrer un processus de désinfection supplémentaire.

Pour compléter le traitement par filtration sur sable. L'ozonation a été sélectionnée comme méthode de désinfection en raison de ses nombreux avantages par rapport à d'autres méthode.

#### **V.4.Dimensionnement d'un bassin de désinfection par ozonation**

Pour dimensionner correctement le bassin de désinfection par ozonation, il est nécessaire de calculer plusieurs paramètres essentiels.

## **CHAPITRE V :            Dimensionnement du filtre à sable et du bassin de Désinfection**

### **V.4.1. Dose de l'ozone à injecter**

La dose d'ozone pour une eau qui est traitée est de 4 à 5 g/m<sup>3</sup> pour un temps de contact de 3 min [27]

$$D_j = Q_{\text{moy}} * (O_3)$$

On utilise la dose de 5 g/m<sup>3</sup> pour un temps de contact de 3 min

$$D_j = 51\,560 * 0.005 = \mathbf{257,8 \text{ kg/j}}$$

### **V.4.2. Le volume du bassin de désinfection (V)**

$$V = Q_{\text{ptp}} * T_c = 4800 * (3/60) = 240 \text{ m}^3$$

Le volume du bassin est :  $V = \mathbf{240 \text{ m}^3}$

### **V.4.3. La hauteur du bassin**

Généralement la hauteur du bassin de désinfection est de 1.5m à 3 m

On fixe  $H = 3\text{m}$

### **V.4.4. La surface horizontale (S<sub>h</sub>)**

$$S_h = V/H = 240/3 = 80 \text{ m}^2$$

### **V.4.5. La largeur(b) et la longueur (L) du bassin**

On prend  $L = 2b$

Et on a :  $S_h = L \times b$

Donc :  $S_h = 2b \times b$

$$b = (S_h/2)^{1/2} = (80/2)^{1/2}$$

$$b = 6.32 \text{ m}$$

Donc  $L = 2 * 6.32$

$$L = 12.65 \text{ m}$$

## **CHAPITRE V :                    *Dimensionnement du filtre à sable et du bassin de Désinfection***

### **V.4.6.Le choix de la pompe doseuse**

Débit (m<sup>3</sup>/jour)= Dose d'ozone (Kg/jour)/Densité de l'ozone (Kg/m<sup>3</sup>)

Débit =257,8 /2.14=120.47 m<sup>3</sup>/j =5019.85 l/h

Alors le débit de la pompe doseuse est : 5019.85 l/h

#### **Conclusion**

Pour conclure, le dimensionnement adéquat du filtre à sable et du bassin de désinfection est essentiel pour garantir un traitement des eaux usées efficace. Un dimensionnement précis contribue à optimiser la performance de ces équipements, assurant ainsi une eau traitée conforme aux normes de qualité requises



# **Conclusion générale**

## *Conclusion générale*

La qualité des eaux usées traitées et leur réutilisation sont devenues des préoccupations majeures dans le domaine de la gestion de l'eau en Algérie. Face aux défis grandissants liés à la rareté des ressources en eau, il est impératif de mettre en place des solutions innovantes et efficaces pour garantir que les eaux épurées respectent les normes de réutilisation. Le recours à des traitements tertiaires, comme le filtre à sable proposé dans cette étude, offre des perspectives prometteuses pour améliorer la qualité des effluents et répondre aux exigences environnementales et sanitaires.

Les résultats de cette étude montrent que le traitement par filtre à sable a permis d'améliorer de manière significative la qualité de l'eau. La **demande chimique en oxygène (DCO)** a été réduite de **211,2 mg/L à 88 mg/L**, respectant ainsi le seuil réglementaire de **90 mg/L** fixé pour l'irrigation. De même, la **demande biologique en oxygène (DBO5)**, réduite à **32 mg/L**, respecte les normes algériennes de **30 mg/L**. Quant aux **matières en suspension (MES)**, elles ont été diminuées de manière significative, atteignant des valeurs conformes à la réglementation pour l'irrigation. Ces résultats prouvent l'efficacité du filtre à sable pour produire une eau de meilleure qualité, adaptée à la réutilisation, notamment pour des usages agricoles ou industriels.

Dans le cas de la station de Beni Mered, l'introduction d'un traitement tertiaire par filtration sur sable a non seulement permis d'atteindre des performances épuratoires conformes aux standards de réutilisation, mais elle a également mis en lumière le potentiel d'intégration de cette technologie dans d'autres stations d'épuration en Algérie. Cela pourrait renforcer l'autosuffisance en matière de gestion des ressources hydriques, réduisant ainsi la pression sur les ressources en eau potable.

## ➤ Références bibliographiques

### ➤ Références

- [1] B. Laid, « RESSOURCES HYDRIQUES: TRAITEMENT ET REUTILISATION DES EAUX USEES EN ALGERIE », 2017.
- [2] M. Guemache, H. Djellit, H. Ymmel, et S. Gharbi, « SUD DU BASSIN DE LA MITIDJA, ALGERIE) : EXPRESSION NÉOTECTONIQUE ET IMPLICATION DANS L'ÉVALUATION DE L'ALÉA SISMIQUE. », 2010.
- [3] M. K. Fidele, « Conception d'une station expérimentale de traitement des eaux usées par filtres plantés des macrophytes: `` Cas de l'Université Kimpa Vita d'Uíge /Angla ' ' », 2020.
- [4] Y. Djillali *et al.*, « Evaluation expérimentale de l'impact des eaux usées traitées en agriculture », mars 2020.
- [5] T. Haruka et T. Hiroaki, « Water reuse and recycling in Japan — History, current situation, and future perspectives », *Water Cycle*, vol. 1, p. 1-12, 2020, doi: 10.1016/j.watcyc.2020.05.001.
- [6] D. M. Warsinger *et al.*, « A review of polymeric membranes and processes for potable water reuse », *Progress in Polymer Science*, vol. 81, p. 209-237, 2018, doi: 10.1016/j.progpolymsci.2018.01.004.
- [7] « REURapport\_1\_.pdf ». Consulté le: 4 octobre 2024. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.ors-idf.org/fileadmin/DataStorageKit/ORS/Etudes/2004/Etude2004\\_2/REURapport\\_1\\_.pdf](https://www.ors-idf.org/fileadmin/DataStorageKit/ORS/Etudes/2004/Etude2004_2/REURapport_1_.pdf)
- [8] « Mieux partager la ressource en eau : le Gouvernement permet de nouveaux usages des eaux usées traitées », Ministères Écologie Énergie Territoires. Consulté le: 5 octobre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ecologie.gouv.fr/mieux-partager-ressource-en-eau-gouvernement-permet-nouveaux-usages-des-eaux-usees-traitees>
- [9] K. Gaid, *La réutilisation des eaux usées 1: Caractéristiques, usages, applications, filtration et désinfection des eaux*. ISTE Group, 2024.
- [10] C. Costea, « RAPPORT DE SYNTHÈSE 'ALGERIE' », 2022.
- [11] H. Abdelhakim, « GESTION ET VALORISATION DES EAUX USEES EN ALGERIE », janv. 2014.
- [12] A. Chadli et H. Benhasseni, « La réutilisation des eaux usées, une alternative durable pour la gestion des ressources en eau de la ville de Sidi Bel Abbes (Algérie) », 2023.
- [13] S. Khaoulani, « Traitement d'eaux usées par adsorption sur des polymères de cyclodextrine et développement de capteurs chimiques à base de membranes de verres de chalcogénures destinées à la détection des ions Hg<sup>2+</sup> », 2015.
- [14] « Les eaux usées urbaines , réglementation des rejets urbains , traitement de finition par géoépuration ». Consulté le: 6 octobre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RR-31588-FR.pdf>
- [15] B. Bourbon, « Les traitements tertiaires, pour quoi faire ? ».
- [16] J. P. Canler, J. M. Perret, et J. Choubert, *Le traitement du carbone et de l'azote pour les stations d'épuration de type boue activée confrontées à des fortes variations de charge et à des basses températures. Cas des stations touristiques hivernales de montagne*. 2007.
- [17] S. S. N. Team, « Phosphorus Removal From Wastewater », Seven Seas Water Corporation. Consulté le: 6 octobre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://seenseaswater.com/phosphorus-removal-from-wastewater/>
- [18] N. Arora, « Heavy Metal Removal From Wastewater », Mywastesolution Articles. Consulté le: 12 septembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://blog.mywastesolution.com/heavy-metal-removal-from-wastewater/>
- [19] « Polycopié Boumaaza Messaouda.pdf ». Consulté le: 6 octobre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://dspace.univ-guelma.dz/xmlui/bitstream/handle/123456789/8525/Polycopi%C3%A9%20Boumaaza%20Messaouda.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [20] A. H. Maiga, « ETUDIÉE SUR UNE INSTALLATION PILOTE ».



- [21] R. Desjardins, *Le traitement des eaux*. Presses inter Polytechnique, 1997.
- [22] « DESIGN OF RAPID GRAVITY FILTER USING C PROGRAMMING AND AUTOCAD ». Consulté le: 6 octobre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://core.ac.uk/download/pdf/53188801.pdf>
- [23] Mohamed Ashraf Halawa, *Rapid sand filter & Slow sand filter*, (2019). Consulté le: 12 septembre 2024. [En ligne Vidéo]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=Alyy5rJdEW8>
- [24] Mohammed Mansour, *Design of slow sand filter& Rapid sand filter + solving examples*, (2020). Consulté le: 12 septembre 2024. [En ligne Vidéo]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=0oqOXvL0tsw>
- [25] Malayalam Adapala, *RAPID SAND FILTER ANIMATION (Fluid Simulation included)*, (2021). Consulté le: 12 septembre 2024. [En ligne Vidéo]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=rK87TqvEEIA>
- [26] « (PDF) Drag Coefficient and Terminal Velocity of Spherical and Non-Spherical Particles ». Consulté le: 6 octobre 2024. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.researchgate.net/publication/244155878\\_Drag\\_Coefficient\\_and\\_Terminal\\_Velocity\\_of\\_Spherical\\_and\\_Non-Spherical\\_Particles](https://www.researchgate.net/publication/244155878_Drag_Coefficient_and_Terminal_Velocity_of_Spherical_and_Non-Spherical_Particles)
- [27] J.-M. Choubert *et al.*, « Rapport final du projet MICROPOLIS-PROCEDES », 2017.

## ➤ Sites internet

- <https://www.directindustry.fr/prod/memmert-gmbh-co-kg/product-28305-1703298.html>
- <https://www.ecologie.gouv.fr/mieux-partager-ressource-en-eau-gouvernement-permet-nouveaux-usages-des-eaux-usees-traitees>
- [https://www.google.com/maps/place/Station+d%E2%80%99%C3%A9puration+des+eaux+us%C3%A9es+de+B%C3%A9ni+Mered/@36.535651,2.8431916,11z/data=!4m9!1m2!2m1!1sgoogle+maps+station+d%C3%A9puration+de+beni+mered!3m5!1s0x128f0976e1dab887:0xabe7cf6894d566e7!8m2!3d36.5271404!4d2.8700015!16s%2F11cjwxrhty?entry=tту&g\\_ep=EgoyMDI0MDkxMS4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D](https://www.google.com/maps/place/Station+d%E2%80%99%C3%A9puration+des+eaux+us%C3%A9es+de+B%C3%A9ni+Mered/@36.535651,2.8431916,11z/data=!4m9!1m2!2m1!1sgoogle+maps+station+d%C3%A9puration+de+beni+mered!3m5!1s0x128f0976e1dab887:0xabe7cf6894d566e7!8m2!3d36.5271404!4d2.8700015!16s%2F11cjwxrhty?entry=tту&g_ep=EgoyMDI0MDkxMS4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D)
- <https://www.youtube.com/watch?v=0oqOXvL0tsw>
- <https://www.youtube.com/watch?v=Alyy5rJdEW8>
- <https://www.youtube.com/watch?v=rK87TqvEEIA>