



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université Amar Telidji- Laghouat

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GÉNIE DES PROCÉDÉS

MEMOIRE de MASTER - STARTUP

Présenté par :

BENALIA Sara &CHELLAMA Imane

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Génie des Procédés

OPTION : Génie des Procédés de l'Environnement

Thème

**Production d'un Bio-filtre à partir de matériaux
naturels pour le traitement des eaux usées**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Pr. BENALIA Mokhtar	Professeur	Président
Dr. RAHMANI Youcef	MCA	Examinateur
Dr. ADJEROUD Yasmina	MCA	Examinatrice
Dr. BOUDAUD Asma	MCA	Rapporteuse
Pr. DJEDID Mebrouk	Professeur	Co-Rapporteur

Promotion : JUIN 2025



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université Amar Telidji- Laghouat

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GÉNIE DES PROCÉDÉS

MEMOIRE de MASTER

Présenté par :

BENALIA Sara &CHELLAMA Imane

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Génie des Procédés

OPTION : Génie des Procédés de l'Environnement

Thème

**Production d'un Bio-filtre adsorptif à partir de
matériaux naturels pour le traitement des eaux usées**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Pr. BENALIA Mokhtar	Professeur	Président
Dr. RAHMANI Youcef	MCA	Examineur
Dr. ADJEROUD Yasmina	MCA	Examinatrice
Dr. BOUDAUD Asma	MCA	Rapporteuse
Pr. DJEDID Mebrouk	Professeur	Co-Rapporteur

Promotion : JUIN 2025

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail aux
deux personnes les plus précieuses de ma vie,
la source de mon existence et de mon bonheur,
qui méritent tout le respect du monde.
Que ce témoignage soit une expression sincère
de mon amour profond et de mon dévouement infini.

À mon cher père Lzahari,
l'homme le plus admirable, mon grand modèle et le secret de ma réussite.

Que Dieu le protège et lui accorde
une longue vie remplie de bonheur et de santé.

À ma mère Noura,
source de compassion et de tendresse,
l'exemple parfait de patience et de sacrifice,
le pilier de ma vie et la raison de mon existence

À ma chère grand-mère Mohad Rebiha
et ma précieuse grand-mère Gattouache Zohra,
qui sont une source infinie d'amour, de sagesse et de bienveillance.

À mes frères : Ahmed Abderrazak, Seif El Islam Naas et Mokhtar Nasr
Eddine.

À mes chers oncles et tantes maternels et paternels, cousins et cousines,
tout mon respect et ma reconnaissance.

À ma précieuse famille Ben alia Et Sailaa,
source inépuisable de soutien et de motivation,
qui a toujours été présente à mes côtés,

m'encourageant et me poussant vers l'excellence

À mes amies proches : Dokmoussi Bouthaina Ihssane et Chellama Imane.

Que ce travail soit un témoignage de mon estime
et de mon attachement à vous tous.

Sara

Dédicaces

Au meilleur des pères
A ma Chère Mère Kheira chellama
A mon cher père Ahmed

dont le mérite, les sacrifices et les qualités humaines
m'ont permis de vivre ce jour.

A mes Frères et mes sœurs
Mohammed, Abdrahmane, Soundous,
Kouther et ses fils Abdraouf et Abdmohsine, Roumaila et sa fille
Meriem....

A tous les gens qui m'aiment.

A mes Amis

A tous ceux qui me sont chers.

Imane

Remerciements

Nos sincères remerciements vont à nos encadrants :

Dr. BOUDAUD Asma et Pr. DJEDID Mebrouk,
pour leurs orientations précieuses et leur accompagnement tout au long de
ce travail.

Nous tenons à remercier sincèrement les membres du jury de soutenance :
Pr. BENALIA Mokhtar (Président), Dr. RAHMANI Youcef (Examineur) et
Dr. ADJEROUD Yasmina (Examinatrice),
d'avoir accepté d'évaluer ce travail :

Nous tenons aussi à remercier l'incubateur et tous ses partenaires pour leur
accompagnement et leur soutien.

Nous remercions chaleureusement le département de génie des procédés et
le laboratoire de recherche LIPME pour leurs soutiens et l'accès aux
ressources et aux infrastructures nécessaires à la réalisation de cette
étude.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à l'unité des eaux de
Laghouat (ADE) pour son soutien et l'environnement favorable qu'elle nous a
fourni, pour nous permettre à mener à bien les analyses de cette recherche.

À nos estimés professeurs, qui ont contribué par leur savoir et leur
dévouement à enrichir cette expérience académique, nous adressons toute
notre reconnaissance et notre respect.

Un immense merci à tous,
en espérant que ce travail apporte une contribution scientifique
enrichissante.

Sommaire

Dédicaces	
Remerciements	
Liste des abréviations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale et perspective.....	01

Chapitre I : Aperçu théorique

I.1. Introduction.....	03
I.2. Définition des eaux usées	03
I.3. Origine des eaux usées	03
3.1. Les eaux usées domestiques.....	04
3.2. Les eaux usées industrielles.....	04
3.3. Les eaux usées agricoles.....	05
3.4. Les eaux pluviales et de ruissellement.....	06
I.4. Caractéristiques des eaux usées.....	06
4.1. Caractéristiques physiques.....	07
4.2. Caractéristiques chimiques.....	08
4.3. Caractéristiques biologiques	10
I.5. Nature de la pollution.....	11
5.1. Pollution physique.....	11
5.2. Pollution chimique	12
5.3. Pollution biologique.....	13
I.6. Effets de la pollution des eaux	14
6.1. Effets sur la santé humaine	14
6.2. Effets sur les écosystèmes aquatiques	15
6.3. Effets sur l'économie	16
I.7. Les méthodes de traitement des eaux usées	16
7.1. Méthodes physiques	16
7.2. Méthodes chimiques	17
7.3. Méthodes biologiques	18
7.4. Procédés membranaires	20
7.5. Désinfection	20
7.6. Adsorption	21

Chapitre II: Protocole Expérimental

II.1. Appareillage et réactifs.....	22
1.1. Appareillage.....	22
1.2. Réactifs chimiques utilisés.....	22
II.2. Préparation des solutions de réactifs.....	23
II.3. Prétraitement de la matière première.....	24
II.4. Fabrication du biofiltre.....	24
II.5. Techniques d'analyse	26
5.1. Spectrophotométrie UV-Visible.....	26
5.2. Spectroscopie FTIR	26
5.3. Analyse par DRX	26
5.4. Technique d'analyse par MEB	27

5.5. Méthode BET	27
II.6. Essais de traitement	27

Chapitre III: Résultats et discussion

III.1. Caractérisation du biofiltre	28
1.1. Analyse par FTIR	28
1.2. Analyse par BET	29
1.3. Analyse par DRX	32
III.2. Evaluation des performances de traitement	34
2.1. Evaluation des paramètres physico-chimiques	34
2.2. Etude de l'élimination de chlore libre	35
2.3. Etude de l'élimination des polluants colorés	36
Conclusion générale	42
Références bibliographiques	44

.

Liste des abréviations

A : Absorbance
BET: Brunauer-Emmett-Teller
BM : Bleu de méthylène
C : Concentration molaire de la substance colorée dans la solution (mol/L)
C₀: Concentration initiale du colorant (mg/L)
Ca²⁺ : les ions calcium
Cd : Cadmium
CT: Concentration de Chlore Total
C_r: Concentration résiduelle du colorant (mg/L)
CV: Cristal violet
DBO₅ : Demande Biochimique en Oxygène après 5 jours
DCO : Demande Chimique en Oxygène
DL50 : Dose Létale 50
DLCS : Dose Létales Chronique Sub-létal
DRX: Diffraction des rayons X
E. coli : Escherichia coli
ED : Électrodialyse
FA: Filtre avancé
FC : Filtre commercial
FF : Filtre fabriqué
FTIR: Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier
H₂O₂: Peroxyde d'hydrogène
HAP : Hydrocarbures Aromatiques
Hg : Mercure
l : longueur de trajet optique
MES : Matières en suspension
Mg²⁺ : les ions magnésium
MO : Méthyle orange
MOI: Membrane d'osmose inverse
Na⁺ : les ions sodium
NaClO : Hypochlorite de sodium
NO³⁻ : Nitrate
NaOH : Hydroxyde de sodium
OI : Osmose Inverse
OM: Matière Organique
OMS : Organisation Mondiale de la Santé
Pb : Plomb
PBT : Persistants, Bioaccumulables et Toxique
pH: potentiel d'hydrogène
POAs: Procédés d'Oxydation Avancée
SB: Sciure de bois
UE : Union Européenne
UFC/100 mL : Unité Formant Colonie par 100 millilitres
UTN : Unité de turbidité Néphélométrique
UV-Visible : Ultra Violet –Visible
Zn²⁺ : Ion zinc
ε : Le coefficient d'extinction molaire (L/mol.cm).

Liste des figures

Figure I.1 : Déversement des eaux usées.	3
Figure I.2 : Les eaux usées domestiques.	4
Figure I.3 : Les eaux usées industrielles.	5
Figure I.4 : Les eaux agricoles.	6
Figure I.5 : Les eaux pluviales et de ruissellement.	6
Figure II.1 : SB prétraité sous forme de poudre	24
Figure II.2 : L'état du biofiltre fabriqué (FF).	25
Figure III.1 : Le spectre FTIR de la sciure de bois SB prétraité	28
Figure III.2 : Le spectre FTIR du biofiltre fabriqué FF.	28
Figure III.3 : Isothermes d'adsorption/désorption d'azote (méthode BET) pour SB prétraité.	30
Figure III.4 : Isothermes d'adsorption/désorption d'azote (méthode BET) pour FF.	30
Figure III.5 : Courbe de DRX de SB.	32
Figure III.6 : Courbe de DRX de FF.	33
Figure III.7 : Courbe d'étalonnage du BM.	37
Figure III.8 : Courbe d'étalonnage du MO.	38
Figure III.9 : Courbe d'étalonnage du CV.	38
Figure III.10 : Le taux d'élimination du BM selon le type de filtre.	39
Figure III.11 : Le taux d'élimination du MO selon le type de filtre.	40
Figure III.12 : Le taux d'élimination du CV selon le type de filtre.	40

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Normes de qualité et de rejet des eaux.	7
Tableau I.2 : Qualité de l'eau en fonction de la DBO ₅ .	9
Tableau I.3 : La nature et les causes des principaux types de pollution des eaux	14
Tableau II.1 : Propriétés des réactifs utilisés.	22
Tableau III.1 : Comparaison des résultats BET entre SB poudre et FF.	31
Tableau III.2 : Comparaison des paramètres physico-chimiques avant et après le traitement	34
Tableau III.3 : Comparaison des taux d'élimination de chlore libre selon le type de filtre	36
Tableau III.4 : Comparaison des taux d'élimination des polluants colorés selon le type de filtre	41

Introduction générale et perspective

La filtration de l'eau est une méthode essentielle et largement utilisée dans le traitement de l'eau, visant à éliminer les impuretés, les particules en suspension ainsi que les micropolluants présents dans les sources d'eau. Ce procédé joue un rôle fondamental dans la production d'une eau claire, propre et conforme aux normes sanitaires, garantissant ainsi sa potabilité et sa sécurité pour la consommation humaine.

Par ailleurs, en améliorant la clarté de l'eau, la filtration optimise l'efficacité des traitements complémentaires tels que la désinfection par chlore ou par rayons UV. Elle protège également les équipements de traitement plus avancés, comme les membranes d'osmose inverse, en prévenant leur colmatage et en prolongeant leur durée de vie. Au-delà de ces aspects techniques, la filtration contribue à diminuer les coûts opérationnels en réduisant la quantité de produits chimiques nécessaires et en assurant la conformité réglementaire. Dans un contexte mondial marqué par la raréfaction des ressources en eau et l'augmentation des pollutions, la filtration s'impose comme une étape incontournable pour garantir un approvisionnement durable en eau de qualité, protégeant ainsi la santé publique et l'environnement.

L'objectif de ce travail est de concevoir un filtre naturel à base de bois et d'évaluer son efficacité dans le traitement des eaux polluées, en le comparant aux performances d'un filtre commercial actuellement disponibles sur le marché. Cette étude vise à proposer une alternative écologique, économique et durable pour le traitement de l'eau, en exploitant les propriétés filtrantes du bois.

Pour atteindre cet objectif, ce travail est structuré en trois grands chapitres :

Le premier chapitre, théorique, présente une revue approfondie des méthodes de filtration de l'eau, ainsi que des mécanismes d'élimination des polluants dans les eaux usées. Cette section permet de poser les bases scientifiques nécessaires à la compréhension du procédé envisagé.

Le deuxième chapitre, expérimental, décrit la fabrication du filtre naturel à partir de bois, les protocoles de préparation et de caractérisation du matériau, ainsi que les conditions de mise en œuvre des essais de filtration. Cette partie détaille également les méthodes utilisées pour mesurer la qualité de l'eau avant et après traitement.

Le troisième chapitre concerne l'analyse, la présentation et la discussion des résultats obtenus. Les performances du filtre naturel sont évaluées en termes d'efficacité de réduction des polluants puis comparées aux résultats d'un filtre commerciaux. Cette section met en lumière les avantages et les limites de la solution proposée.

Enfin, une conclusion synthétise les principaux enseignements de l'étude et formule des recommandations pour de futures améliorations et applications pratiques.

Chapitre I

Généralités sur les eaux usées

I.1- Introduction

Les eaux usées constituent un problème majeur de santé publique et environnementale, particulièrement dans les pays en développement. Ces eaux, qui proviennent de diverses sources telles que les ménages, les industries et les hôpitaux, contiennent une variété de polluants qui peuvent inclure des micro-organismes pathogènes, des résidus chimiques et pharmaceutiques, ainsi que des déchets physiques. La gestion des eaux usées est cruciale pour prévenir la propagation des maladies infectieuses et protéger les écosystèmes aquatiques.

I.2-Définition des eaux usées

Les eaux usées sont des liquides de composition hétérogène, chargées de matières minérales ou organiques, pouvant être en suspension ou en solution, et dont certaines peuvent avoir un caractère toxique. Les eaux usées (figure I.1), qui sont un mélange de plusieurs types d'eaux et pour éviter la pollution, sont acheminées par un réseau d'assainissement vers une station d'épuration pour y être traitées et si possible réutilisées. Avant le choix d'une filière de traitement, il est essentiel de connaître la composition des eaux usées [1].



Figure I.1 : Déversement des eaux usées.

I.3-Origine des eaux usées

Comme l'eau est très utilisée par l'homme dans plusieurs domaines, cela implique une formation d'eaux usées en différentes concentrations d'impuretés. Suivant l'origine et la qualité des substances polluantes, on distingue quatre (4) catégories d'eaux usées :

I.3.1-Les eaux usées domestique

Les eaux usées domestiques sont un mélange d'eaux contenant des déjections humaines : urines, fèces (eaux vannes) et eaux de toilette et de nettoyage des sols et des aliments (eaux ménagères) (figure I.2). Ces eaux sont généralement constituées de matières organiques dégradables et de matières minérales; ces substances sont sous forme dissoute ou en suspension. Elles proviennent essentiellement [2] :

- Des eaux de cuisine qui contiennent des matières minérales en suspension provenant du lavage des légumes, des substances alimentaires à base de matières organiques (glucides, lipides, protides) et des produits détergents utilisés pour le lavage de la vaisselle et ayant pour effet la solubilisation des graisses ;
- Des eaux de buanderie contenant principalement des détergents ;
- Des eaux de salle de bain chargées en produits utilisés pour l'hygiène corporelle, généralement des matières grasses hydrocarbonées ;
- Des eaux de vannes qui proviennent des sanitaires, très chargées en matières organiques hydrocarbonées, en composés azotés, phosphatés et microorganismes.



Figure I.2 : Les eaux usées domestiques.

I.3.2-Les eaux usées industrielles

Les déchets et les effluents industriels définissent largement la qualité et le taux de pollution de ces eaux usées (figure I.3). Les établissements industriels utilisent une quantité importante d'eau qui tout en restant nécessaire à leur bonne marche, n'est réellement consommée qu'en très faible partie, le reste est rejeté. On peut néanmoins,

faire un classement des principaux rejets industriels suivant la nature des inconvénients qu'ils déversent [3]:

- Pollution due aux matières en suspension minérales (Lavage de charbon, carrière, tamisage du sable et gravier, industries productrices d'engrais phosphatés....) ;
- Pollution due aux matières en solution minérales (usine de décapage, galvanisation...)
- Pollution due aux matières organiques et graisses (industries agroalimentaires, équarrissages, pâte à papier...) ;
- Pollution due aux rejets hydrocarbonés et chimiques divers (raffineries de pétrole, produits pharmaceutiques...) ;
- Pollution due aux rejets toxiques (déchets radioactifs non traités, effluents radioactifs des industrie nucléaires...)



Figure I.3 : Les eaux usées industrielles.

I.3.3-Les eaux usées agricoles

Elle résulte de l'élevage et de la culture des terres. Les eaux usées d'origine agricole (figure I.4) sont la cause potentielle des pollutions diffuses [4].

Cette pollution se caractérise par :

- De fortes teneurs en sels minéraux (azote, phosphore...) provenant d'engrais et des purins (élevage) ;
- Présence de produit chimique de traitement (pesticides, herbicides...) [5].



Figure I.4 : Les eaux agricoles.

I.3.4-Les eaux pluviales et de ruissellement

Ce sont les eaux de ruissellement (eaux pluviales, eaux d'arrosage des voies publiques, eaux de lavage des caniveaux, des marchés et des cours) (figure I.5). Les eaux qui ruissellent sur les toitures, les cours, les jardins, les espaces verts, les voies publiques et les marchés entraînent toute sortes de déchets minéraux et organiques : de la terre, des limons, des déchets végétaux, etc... et toutes sortes de micropolluants (hydrocarbures, pesticides, détergents...) [6].



Figure I.5 : Les eaux pluviales et de ruissellement.

I.4- Caractéristiques des eaux usées

La composition des eaux usées s'analyse par le biais de diverses mesures physiques, chimiques et biologiques. Les analyses les plus fréquentes comportent des mesures des

matières particulaires (MES), de la demande biochimique en oxygène mesurée après 5 jours (DBO₅), de la demande chimique en oxygène (DCO), ainsi que les paramètres bactériologiques [7]. Le tableau I.1 regroupe quelques normes de qualité et de rejet des eaux de l'OMS et de l'UE et les normes Algériennes.

Tableau I.1 : Normes de qualité et de rejet des eaux.

Paramètre	Normes OMS (Eau Potable)	Normes UE	Normes Algérie
pH	6,5–8,5	6,5–9,5 (Directive 98/83/CE)	6,5–8,5 (Eau potable) 6–9 (Rejet)
Turbidité (NTU)	≤ 5	≤ 1	≤ 5 (Eau potable)
MES (ppm)	–	< 25–35 (Directive 91/271)	< 30 (Rejet)
DBO ₅ (ppm)	–	< 25 (Directive 91/271)	< 30 (Rejet)
DCO (ppm)	–	< 125 (Directive 91/271)	< 125 (Rejet)
E. coli (UFC/100 mL)	0	0 (Directive 98/83/CE)	0 (Eau potable) < 1 000 (Rejet)
Température (°C)	–	< 30 (Directive 91/271)	< 30 (Rejet)

I.4.1- Caractéristiques physiques

a. La température

Il est essentiel de mesurer la température de l'eau, car elle influence plusieurs paramètres importants tels que la solubilité des sels et des gaz et les processus biologiques [8].

b. Turbidité

Elle désigne la teneur d'un liquide en matières qui le troublent. Elle est causée par des particules en suspension qui diffusent ou réfléchissent la lumière. En relation avec la

mesure des matières en suspension, elle donne une première indication sur la teneur en matières colloïdales d'origine minérale ou organique. Une importante turbidité de l'eau entraîne une réduction de sa transparence qui réduit la pénétration du rayonnement solaire utile à la vie aquatique (photosynthèse) [9].

c. Matières en suspension

Ce sont des matières solides contenues dans les eaux usées et qui sont séparables par filtration ou par centrifugation. Elles sont exprimées en poids de matières sèches. Les matières en suspension comportent des matières organiques et minérales. Elles constituent un paramètre important qui marque bien le degré de pollution d'un effluent [10].

I.4.2-Caractéristiques chimiques

a. Le potentiel d'Hydrogène (pH)

Les organismes sont très sensibles aux variations du pH, et un développement correct de la faune et de la flore aquatique n'est possible que si sa valeur est comprise entre 6 et 9. L'influence de pH se fait également ressentir par le rôle qu'il exerce sur les autres éléments comme les ions des métaux dont il peut diminuer ou augmenter leur mobilité en solution bio disponible et donc leur toxicité. Le pH joue un rôle important dans l'épuration d'un effluent et le développement bactérien. La nitrification optimale ne se fait qu'à des valeurs de pH comprises entre 7,5 et 9 [11].

b. La demande chimique en oxygène (DCO)

Selon Bliefert et Perraud (2001), La DCO il s'agit de la quantité d'oxygène (en mg/l ou autres) qui est nécessaire pour oxyder principalement les composés organiques présent dans l'eau. Les substances qui se trouvent dans l'eau sont traités chimiquement dans des conditions d'oxydation très sévères. De façon à estimer aussi celles qui sont difficilement dégradables biologiquement, comme les composés organiques chloré [12].

c. Demande biochimique en oxygène (DBO)

La demande biochimique en oxygène (DBO), constitue une mesure de la pollution des eaux par les matières organiques. C'est la quantité d'oxygène nécessaire aux microorganismes vivants pour assurer l'oxydation et la dégradation des matières

organiques présentes dans l'eau usée. Le rejet des matières organiques fermentescibles par un émissaire d'égout, par exemple, provoque immédiatement une déplétion de la teneur en oxygène dissous par dégradation sous l'action des bactéries aérobies, qui va s'atténuer dans le sens du courant. L'indicateur utilisé est généralement la DBO_5 qui correspond à la quantité d'oxygène (exprimée en mg/l) nécessaire aux microorganismes décomposeurs pour dégrader et minéraliser en 5 jours la matière organique présente dans un litre d'eau polluée.

L'analyse de la DBO_5 est surtout intéressante pour l'appréciation de la qualité des eaux brutes. Le tableau I.2, classe les eaux du point de vue qualité selon les valeurs de DBO_5 [13].

Tableau I.2 : Qualité de l'eau en fonction de la DBO_5 .

DBO_5	Qualification de l'eau
$DBO_5 < 1 \frac{mg}{l} d'O_2$	Excellente qualité
$DBO_5 = 2 \frac{mg}{l} d'O_2$	Bonne qualité
$DBO_5 = 3 \frac{mg}{l} d'O_2$	Qualité moyenne
$DBO_5 = 5 \frac{mg}{l} d'O_2$	Eau moyennement polluée
$DBO_5 > 10 \frac{mg}{l} d'O_2$	Eau polluée

d. La concentration en oxygène dissous

La concentration en oxygène dissous dans l'eau est un indicateur clé de la qualité écologique des milieux aquatiques. Elle varie naturellement selon un cycle diurne de 24 heures, influencée par la photosynthèse des plantes aquatiques et la respiration des organismes.

Des facteurs physico-chimiques comme la température et la présence de nutriments, notamment les nitrates, jouent également un rôle important. Une bonne oxygénation est essentielle pour la survie des poissons et autres espèces aquatiques. La mesure continue de cette concentration permet une évaluation précise de l'état d'un cours d'eau. Des modèles simples peuvent aussi estimer ces variations quand les mesures directes sont difficiles à réaliser [14].

e. La conductivité

La conductivité électrique est une expression numérique de la capacité d'une solution à conduire le courant électrique. La plupart des sels minéraux en solution sont de bons conducteurs. Par contre, les composés organiques sont de mauvais conducteurs. La conductivité électrique standard s'exprime généralement en milli siemens par mètre (mS/m) ou micro siemens ($\mu\text{S/cm}$). L'estimation de la quantité totale de matières dissoutes peut être obtenue par la multiplication de la valeur de la conductivité par un facteur empirique dépendant de la nature des sels dissous et de la température de l'eau [15].

f. La biodégradabilité

La biodégradabilité traduit l'aptitude d'un effluent à être décomposé ou oxydé par les micro-organismes qui interviennent dans le processus d'épuration biologique des eaux. La biodégradabilité est exprimée par un coefficient K, tel que, $K = \text{DCO} / \text{DBO}_5$:

- Si $k < 1,5$: cela signifie que les matières oxydables sont constituées en grande partie de matières fortement biodégradable ;
- Si $1,5 < K < 2,5$: cela signifie que les matières oxydables sont moyennement biodégradables.
- Si $2,5 < K < 3$: les matières oxydables sont peu biodégradables.
- Si $K > 3$: les matières oxydables sont non biodégradables.

Un coefficient K très élevé traduit la présence dans l'eau d'éléments inhibiteur de la croissance bactérienne, tels que, les sels métalliques, les détergents, les phénols, les hydrocarbures ... etc. La valeur du coefficient K détermine le choix de la filière de traitement à adopter, si l'effluent est biodégradable on applique un traitement biologique, sinon on applique un traitement physico-chimique [16].

I.4.3-Caractéristiques biologiques**a. Les bactéries**

Les bactéries sont des cellules vivantes microscopiques. Elles se multiplient dans les eaux usées et dans les boues résiduelles. L'exposition à celles-ci provient surtout de l'inhalation des aérosols qu'elles utilisent comme vecteurs pour leur transport ou encore, de la contamination du système gastro-intestinal par le contact des mains à la bouche. Les bactéries Gram négatives¹ et leurs sous-produits comme les endotoxines

peuvent causer de l'irritation des muqueuses ainsi que des problèmes gastro-intestinaux et respiratoires [17].

b. Les virus

Ce sont des organismes infectieux de très petite taille (10 à 350 nm) qui se reproduisent en infectant un organisme hôte. Les virus ne sont pas naturellement présents dans l'intestin, contrairement aux bactéries. Ils sont présents soit intentionnellement (après une vaccination contre la poliomyélite, par exemple), soit chez un individu infecté accidentellement. On estime leur concentration dans les eaux usées urbaines comprise entre 10^3 et 10^4 particules par litre. Leur isolement et leur dénombrement dans les eaux usées restent difficiles, ce qui conduit vraisemblablement à une sous-estimation de leur nombre réel. Les virus entériques sont ceux qui se multiplient dans le trajet intestinal. Parmi les virus entériques humains les plus nombreux, nous citerons les entérovirus (exemple : polio), les rotavirus, les retrovirus, les adénovirus et le virus de l'Hépatite A. Il semble que les virus soient plus résistants dans l'environnement que les bactéries [18].

c. Les protozoaires

Sa structure est plus complexe que celle des bactéries, la différence entre les protozoaires est relativement simple. Certains protozoaires sont puissant prédateur de bactéries. Ils ont la capacité de se déplacer et d'être classés selon leur locomotion (nageur, liane, sans poignée). Ces organismes jouent un rôle important dans le processus de purification en raison de leur abondance et de leur interaction avec les bactéries épuratrices (compétition et prédation) [19, 20].

I.5-Nature de la pollution

La pollution des eaux se manifeste sous différentes formes, impactant la qualité de l'eau et les écosystèmes aquatiques. Le Tableau I.3 donne la nature et les causes des principaux types de pollution des eaux. On peut classer ces pollutions selon leur nature:

I.5.1- Pollution physique

La pollution physique altère les propriétés physiques de l'eau par l'introduction d'éléments non dissous, se manifestant sous trois formes distinctes.

a. Pollution mécanique

Les effluents industriels solides (déchets métallurgiques, plastiques) et les décharges à ciel ouvert génèrent un colmatage des écosystèmes aquatiques. Ces particules en suspension réduisent de 40% la transmission lumineuse nécessaire à la photosynthèse des phytoplanctons, tout en abrasant les branchies des poissons.

b. Pollution thermique

Le rejet d'eaux chaudes par les circuits de refroidissement industriels élève la température moyenne des cours d'eau de 3 à 8°C. Cette élévation diminue exponentiellement la solubilité de l'oxygène dissous (-0.17 ppm par °C), favorisant les blooms de cyanobactéries thermophiles comme *Microcystis aeruginosa*.

c. Pollution nucléaire

Les radioisotopes (¹³⁷Césium, Strontium) issus des retombées atmosphériques ou des accidents nucléaires induisent des mutations génétiques par radiolyse de l'ADN. Leur demi-vie prolongée (30 ans pour le ¹³⁷Cs) nécessite une réglementation internationale stricte des rejets, avec des seuils de concentration fixés à 0.1 Bq/L par l'AIEA [21].

I.5.2- Pollution chimique

Cette catégorie regroupe les substances altérant la composition chimique des eaux, classées en trois sous-catégories aux dynamiques distinctes [22].

a. Pollution organique

Les composés carbonés représentent 68% des polluants aquatiques selon les études récentes :

Origine urbaine : Protéines hydrolysées en acides aminés (3.2 g/L dans les eaux usées), lipides générant 23% du CH₄ anthropique, et polysaccharides responsables de l'hypoxie saisonnière [23].

- Origine industrielle : Phénols (seuil toxique 0.1 mg/L) et hydrocarbures aromatiques (HAP) persistants dans les sédiments pendant 50 ans [24].

b. Pollution minérale

Les effluents industriels libèrent annuellement 450 millions de tonnes de substances inorganiques :

- Nitrates (NO_3^-) et phosphates (PO_4^{3-}) responsables de 78% des cas d'eutrophisation continentale
- Ions métalliques (Cu^{2+} , Zn^{2+}) inhibant à 0.1 mg/L l'activité nitrificatrice des stations d'épuration [25].

c. Métaux lourds

Historiquement liés au saturnisme romain (plomb des canalisations), ces éléments présentent une toxicité dépendant de leur spéciation chimique :

Les métaux lourds, tels que le mercure, le cadmium et le plomb, présentent des toxicités variées selon leur source et leur biodisponibilité. Le mercure est particulièrement toxique pour les poissons (DL50 de 0,1 $\mu\text{g/L}$), tandis que le cadmium affecte les crustacés avec une DL50 de 2,5 $\mu\text{g/L}$. Le plomb est plus toxique pour les mammifères aquatiques (DL50 de 15 $\mu\text{g/L}$), s'accumulant dans les tissus nerveux et osseux. Ces différences de sensibilité soulignent la nécessité d'une approche écosystémique pour évaluer les risques métalliques dans les milieux aquatiques [26].

I.5.3-Pollution biologique

La contamination microbienne affecte 780 millions de personnes annuellement selon l'OMS, avec des pathogènes aux caractéristiques distinctes [27].

a. Bactéries entériques

Escherichia coli et *Vibrio cholerae* persistent 30 jours dans les eaux à 20°C, provoquant 1.4 millions de gastro-entérites annuelles. Leur propagation est favorisée par les défauts d'assainissement (35% des réseaux africains non conformes) [28].

b. Virus hydriques

Les norovirus et hépatovirus (A/E) résistent aux traitements par chloration (CT >15 mg/min/L), nécessitant des méthodes avancées d'ozonation pour leur inactivation complète [29].

c. Parasites protozoaires

Cryptosporidium parvum, avec sa paroi kystique résistante, cause des infections persistantes chez 80% des patients immunodéprimés. Sa concentration maximale atteint 10^5 kystes/L dans les eaux agricoles non traitées [30].

Tableau I.3 : La nature et les causes des principaux types de pollution des eaux [31].

Type de Pollution	Nature	Causes
Pollution Biologique	Présence de micro-organismes pathogènes (bactéries, virus, parasites)	Eaux usées domestiques et industrielles, ruissellement agricole, déchets humains
Pollution Chimique	Présence de substances chimiques toxiques (métaux lourds, pesticides, etc.)	Activités industrielles, agricoles, et urbaines (rejets chimiques)
Pollution Physique	Modification des caractéristiques physiques (température, turbidité)	Activités humaines (construction, minage), changements climatiques
Pollution Thermique	Modification de la température de l'eau	Rejets d'usines, centrales thermiques

I.6-Effets de la pollution des eaux

I.6.1-Effets sur la santé humaine

a. Maladies Hydriques

La consommation d'eau contaminée par des agents pathogènes tels que les bactéries (*E. coli*, *Vibrio cholerae*), les virus (hépatite A) et les parasites (*Giardia*) peut entraîner diverses maladies hydriques. Les symptômes les plus courants sont les diarrhées, qui peuvent être particulièrement graves chez les jeunes enfants et les personnes immunodéprimées. D'autres maladies plus graves, comme le choléra, la dysenterie et l'hépatite, peuvent également être contractées par l'ingestion d'eau contaminée.

L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) estime que 829 000 décès par an sont attribuables à l'eau insalubre, soulignant l'ampleur du problème [32].

b. Toxicités chroniques

L'exposition prolongée à de faibles concentrations de polluants chimiques dans l'eau peut avoir des effets néfastes sur la santé humaine. Les métaux lourds, comme le plomb et le mercure, sont neurotoxiques et peuvent entraîner des retards de développement, en particulier chez les enfants. Les pesticides, tels que l'atrazine, sont suspectés d'être des perturbateurs endocriniens et d'augmenter le risque de certains cancers. Les substances per- et polyfluoroalkylées (PFAS), surnommées "polluants éternels" en raison de leur persistance dans l'environnement, sont associées à des effets sur le système immunitaire et à des dysfonctionnements hépatiques.

I.6.2-Effets sur les écosystèmes aquatiques

a. Eutrophisation

L'apport excessif de nutriments, principalement des nitrates et des phosphates provenant des engrais agricoles, des rejets d'eaux usées et des effluents industriels, est la principale cause de l'eutrophisation. Ces nutriments stimulent la croissance excessive d'algues, formant des "marées vertes" qui bloquent la lumière du soleil et perturbent l'équilibre des écosystèmes aquatiques. La décomposition de ces algues consomme de grandes quantités d'oxygène dissous, créant des zones hypoxiques, voire anoxiques, appelées "zones mortes", où la vie aquatique est asphyxiée. Un exemple frappant de ce phénomène est la zone morte du Golfe du Mexique, qui s'étend sur plus de 15 000 km².

b. Bioaccumulation de polluants

La bioaccumulation est le processus par lequel les polluants s'accumulent dans les tissus des organismes vivants à des concentrations supérieures à celles présentes dans l'environnement. Ce phénomène est particulièrement préoccupant pour les polluants persistants, bioaccumulables et toxiques (PBT), tels que les métaux lourds et certains composés organiques. Les microplastiques peuvent également agir comme vecteurs de polluants, facilitant leur transfert dans la chaîne alimentaire. Un exemple classique de bioaccumulation est celui du mercure, qui se transforme en méthylmercure, une forme hautement toxique, dans les milieux aquatiques. Le méthylmercure se concentre ensuite dans les poissons, et les humains qui consomment ces poissons sont exposés à des

niveaux élevés de méthylmercure, ce qui peut entraîner des problèmes neurologiques graves [33].

I.6.3-Effets sur l'économie

La pollution de l'eau a des impacts économiques significatifs. Premièrement, elle nécessite des investissements importants dans les infrastructures de traitement pour rendre l'eau potable et assainir les eaux usées, ce qui coûteux. Deuxièmement, la pollution de l'eau d'irrigation peut réduire les rendements agricoles en affectant la qualité de l'eau utilisée pour les cultures, entraînant des pertes économiques pour les agriculteurs. Troisièmement, la pollution des eaux côtières et des lacs peut nuire au tourisme, entraînant des pertes de revenus pour les entreprises et les communautés locales. Enfin, les propriétés situées à proximité de sources d'eau polluées peuvent perdre de leur valeur, ce qui affecte le marché immobilier local.

Ces impacts soulignent l'importance d'une gestion durable des ressources en eau pour prévenir la pollution et protéger les économies locales et les écosystèmes aquatiques [34].

I.7-Les méthodes de traitement des eaux usées

I.7.1-Méthodes Physiques

a. Sédimentation

La sédimentation est un procédé physique qui exploite la force de gravité pour séparer les particules en suspension dans l'eau. Les particules plus denses que l'eau se déposent au fond du bassin de sédimentation, formant une couche de boues. L'efficacité de la sédimentation dépend de la taille, de la forme et de la densité des particules, ainsi que de la viscosité et de la température de l'eau. Ce procédé est souvent utilisé comme prétraitement pour réduire la charge des étapes de traitement ultérieures. Les polluants directement ciblés sont les solides en suspension, comme le sable, le limon, et l'argile [35].

b. Filtration

La filtration utilise un milieu poreux (sable, charbon actif, membranes) pour retenir les particules en suspension et certaines substances dissoutes. Différents types de filtration existent, allant de la filtration grossière (dégrillage) à la filtration membranaire

(microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration). La taille des pores du milieu filtrant détermine la taille des particules retenues. Les polluants directement ciblés dépendent du type de filtration : sable et charbon actif retiennent les particules en suspension, le chlore, et certains composés organiques ; les membranes peuvent retenir des particules plus fines, incluant des bactéries et des virus [36].

c. Aération

L'aération consiste à introduire de l'air dans l'eau pour éliminer les gaz dissous indésirables, tels que le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4), et le sulfure d'hydrogène (H_2S). L'aération peut également oxyder le fer et le manganèse dissous, facilitant leur élimination par précipitation. Ce procédé améliore le goût et l'odeur de l'eau en réduisant les concentrations de ces gaz. Les polluants directement ciblés sont donc les gaz dissous et certains métaux dissous [37].

d. Dégrillage

Le dégrillage est la première étape du traitement des eaux usées et consiste à éliminer les gros débris (branches, feuilles, plastiques) à l'aide de grilles ou de tamis. Ce procédé protège les équipements en aval des dommages et améliore l'efficacité des traitements suivants. Les polluants directement ciblés sont les gros solides, les débris, et les matières flottantes [38].

I.7.2-Méthodes Chimiques

a. Coagulation-floculation

La coagulation et la floculation sont des procédés chimiques utilisés pour éliminer les particules colloïdales et les matières en suspension fines qui ne se déposent pas facilement par sédimentation. La coagulation consiste à ajouter un coagulant (ex: sulfate d'aluminium, chlorure ferrique) qui neutralise les charges électriques des particules, permettant leur agglomération. La floculation consiste ensuite à agiter lentement l'eau pour favoriser la formation de floes plus gros et plus faciles à sédimenter ou à filtrer. Les polluants directement ciblés sont les particules colloïdales, la turbidité, et certains composés organiques [39].

b. Chloration

La chloration est un procédé de désinfection qui utilise le chlore (Cl_2 , hypochlorite de sodium, dioxyde de chlore) pour inactiver les micro-organismes pathogènes (bactéries, virus, protozoaires) présents dans l'eau. Le chlore est un oxydant puissant qui

réagit avec les composés organiques et inorganiques présents dans l'eau. Les polluants directement ciblés sont les micro-organismes pathogènes. Il est important de contrôler la dose de chlore pour éviter la formation de sous-produits de désinfection potentiellement nocifs [40].

c. Ozonation

L'ozonation utilise l'ozone (O_3), un puissant oxydant, pour désinfecter l'eau et éliminer les contaminants organiques, les goûts et les odeurs. L'ozone réagit rapidement avec les micro-organismes et les composés organiques, les décomposant en substances moins nocives. L'ozonation ne laisse pas de résidus persistants dans l'eau, contrairement à la chloration. Les polluants directement ciblés sont les micro-organismes, les composés organiques, les goûts et les odeurs [41].

d. Oxydation Avancée

Les procédés d'oxydation avancée (POA) sont des techniques qui utilisent des réactions chimiques pour générer des radicaux hydroxyles (OH), des oxydants très puissants capables de dégrader un large éventail de contaminants organiques réfractaires. Ces procédés combinent généralement l'ozone, le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), la lumière ultraviolette (UV), ou des catalyseurs. Les polluants directement ciblés sont les composés organiques persistants, les pesticides, les produits pharmaceutiques, et autres micropolluants [42].

e. Échange d'Ions

L'échange d'ions est un procédé chimique qui utilise des résines échangeuses d'ions pour éliminer les ions indésirables de l'eau. Les résines sont des matériaux solides contenant des sites actifs qui peuvent attirer et retenir des ions spécifiques. Par exemple, des résines échangeuses de cations peuvent remplacer les ions calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) (responsables de la dureté de l'eau) par des ions sodium (Na^+). Les polluants directement ciblés sont la dureté de l'eau, le nitrate, l'arsenic, et certains métaux lourds [38].

I.7.3-Méthodes Biologiques

a. Boues Activées

Le procédé à boues activées est un traitement biologique aérobie utilisé pour éliminer les matières organiques biodégradables des eaux usées. Il implique la mise en

contact des eaux usées avec une population mixte de micro-organismes (bactéries, protozoaires, etc.) en suspension dans un bassin aéré. Ces micro-organismes consomment la matière organique comme source de nourriture et d'énergie, la transformant en biomasse, en dioxyde de carbone et en eau. Les boues activées, composées de la biomasse microbienne, sont ensuite séparées de l'eau traitée par sédimentation. Les polluants directement ciblés sont la matière organique biodégradable (DBO, DCO), l'azote et le phosphore [38].

b. Lits Bactériens

Les lits bactériens, aussi appelés filtres percolateurs, sont des réacteurs biologiques aérobies utilisés pour le traitement des eaux usées. L'eau usée est distribuée sur un lit de matériau de support (ex: pierre, plastique) recouvert d'un biofilm de micro-organismes. L'eau percole à travers le lit, permettant aux micro-organismes de dégrader la matière organique présente dans l'eau usée. L'air circule à travers le lit pour fournir l'oxygène nécessaire à l'activité microbienne. Les polluants directement ciblés sont la matière organique biodégradable [39].

c. Zones Humides Construites

Les zones humides construites sont des systèmes d'épuration des eaux usées qui reproduisent les processus naturels d'épuration des zones humides naturelles. Elles sont composées de bassins peu profonds plantés de végétation aquatique. L'eau usée circule lentement à travers le système, permettant aux plantes, aux micro-organismes et aux substrats de filtrer et de dégrader les polluants. Les polluants directement ciblés sont la matière organique, les nutriments (azote et phosphore), les solides en suspension, et certains pathogènes [43].

d. Digestion Anaérobie

La digestion anaérobie est un processus biologique qui se déroule en l'absence d'oxygène. Des micro-organismes décomposent la matière organique complexe (boues, déchets alimentaires) en biogaz (principalement du méthane et du dioxyde de carbone) et en un résidu stabilisé appelé digestat. Ce procédé est souvent utilisé pour traiter les boues d'épuration et les déchets organiques, permettant de réduire le volume des boues et de produire une source d'énergie renouvelable. Les polluants directement ciblés sont la matière organique [44].

I.7.4- Procédés membranaires

a. Osmose Inverse

L'osmose inverse (**OI**) est un procédé de séparation membranaire qui utilise une pression appliquée pour forcer l'eau à traverser une membrane semi-perméable, retenant les sels dissous, les minéraux, et autres impuretés. La membrane d'OI a des pores extrêmement fins qui ne laissent passer que les molécules d'eau, rejetant les contaminants dans un flux concentré. L'OI est utilisée pour le dessalement de l'eau de mer, la production d'eau potable, et le traitement des eaux usées industrielles. Les polluants directement ciblés sont les sels dissous, les minéraux, les métaux lourds, la silice, et les composés organiques de grande taille [45].

b. Électrodialyse

L'électrodialyse (**ED**) utilise des membranes sélectives aux ions et un champ électrique continu pour séparer les ions dissous de l'eau. Des membranes cationiques perméables aux cations et des membranes anioniques perméables aux anions sont disposées alternativement dans une cellule d'électrodialyse. Sous l'influence du champ électrique, les cations migrent vers la cathode et les anions vers l'anode, traversant les membranes sélectives. Ce procédé est utilisé pour le dessalement de l'eau saumâtre et le traitement des eaux usées industrielles. Les polluants directement ciblés sont les ions dissous, notamment les sels [38].

I.7.5- Désinfection

a. Rayonnement UV

La désinfection par rayonnement ultraviolet (UV) utilise la lumière UV pour inactiver les micro-organismes pathogènes (bactéries, virus, protozoaires) dans l'eau. Les rayons UV endommagent l'ADN et l'ARN des micro-organismes, empêchant leur reproduction et les rendant inoffensifs. Ce procédé est efficace, rapide, et ne produit pas de sous-produits de désinfection. Les polluants directement ciblés sont les micro-organismes pathogènes [46].

b. Dioxyde de Chlore

Le dioxyde de chlore (ClO_2) est un désinfectant puissant utilisé comme alternative au chlore pour le traitement de l'eau potable. Il est efficace contre un large spectre de

micro-organismes, y compris les protozoaires résistants au chlore comme *Cryptosporidium* et *Giardia*. Le ClO_2 produit moins de sous-produits de désinfection que le chlore et est moins affecté par la présence de matière organique. Les polluants directement ciblés sont les micro-organismes pathogènes [47].

I.7.6. Adsorption

L'adsorption est un phénomène de surface exothermique où des atomes, ions ou molécules (adsorbats) se fixent à la surface d'un matériau (adsorbant), contrairement à l'absorption où une substance est incorporée dans le volume d'une autre. Deux mécanismes principaux existent : la physisorption, impliquant des forces de van der Waals faibles, réversibles et non spécifiques, favorisée par les basses températures ; et la chimisorption, impliquant des liaisons chimiques fortes, souvent irréversibles et spécifiques, favorisée par les hautes températures [48].

Chapitre II

Protocole Expérimental

Dans ce chapitre, nous présentons le protocole expérimental utilisé pour étudier la préparation d'un filtre à partir d'un matériau agricole. Les expériences visent à évaluer l'efficacité du biofiltre préparé dans le traitement des eaux polluées, en analysant notamment les propriétés du filtre à l'aide de diverses techniques d'analyse

Toutes ces expériences ont été menées dans le laboratoire de recherche LIPME et le laboratoire du département Génie des Procédés de l'université de Laghouat et les analyses en Plateau Techniques en Analyse Physico-Chimiques (PTAPC) annexe de Laghouat.

II.1-Appareillage et réactifs

II.1.1-Appareillage

- Agitateur magnétique (SCIOLOGEX) ;
- Un pH-mètre (WTW INOLAB 7310) ;
- Balance analytique ;
- Spectrophotomètre UV-Visible (UVILINE 9400) ;
- Turbidimètre (HACH TL2300) ;
- Conductimètre (HACH SL 1000);

II.1.2-Réactifs chimiques utilisés

Les produits chimiques utilisés dans cette étude sont reportés dans le tableau II.1.

Tableau II.1 : Propriétés des réactifs utilisés.

Produits	Pureté	Etat physique
NaOH	98 %	Solide
Acide acétique glacial	99 %	Liquide
Bleu de méthylène	99 %	Poudre
Methyl orange	99 %	Poudre
Cristal violet	95 %	Poudre

II.2-Préparation des solutions de réactifs

Préparation de NaOH (18%)

- À l'aide d'une balance électrique, on pèse une quantité de NaOH
- On dissout cette quantité dans l'eau distillée dans une fiole jaugée de 1000 mL.

Préparation de l'eau usée

- Pour préparer la solution, peser précisément 0.1 g de Na_2SO_4 , NaCl et CaCl_2 anhydres chacun, puis les transférer dans des béchers individuels.
- Prélever 0.05 mL de solution de chlorite de sodium et 0.05 mL d'acide nitrique à l'aide de pipettes graduées et les ajouter à un autre bécher.
- Dissoudre chaque sel dans environ 50 mL d'eau distillée. Transvaser quantitativement toutes les solutions dans une fiole jaugée de 100 mL, rincer les béchers avec de l'eau distillée, ajouter les eaux de rinçage à la fiole jaugée, et compléter jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée.

Préparation de solution du BM

- On pèse 0.5 g de BM avec une balance électrique
- On met cette quantité dans une fiole jaugée de 500 mL (en verre), puis on ajoute l'eau distillée jusqu'au trait de jauge.
- Puis on dilue pour obtenir 100 mg/L.

Préparation de solution du MO

- On pèse 0.5 g de MO avec une balance électrique
- On met cette quantité dans une fiole jaugée de 500 mL (en verre), puis on ajoute l'eau distillée jusqu'au trait de jauge.
- Puis on dilue pour obtenir 100 ppm.

Préparation de solution du CV

- On pèse 0.5 g de CV avec une balance électrique
- On met cette quantité dans une fiole jaugée de 500 mL (en verre), puis on ajoute l'eau distillée jusqu'au trait de jauge.

- Puis on dilue pour obtenir 100 ppm.

II.3-Prétraitement de la matière première

Le prétraitement de la matière première « la sciure de bois noté SB » a été effectué selon les étapes suivantes [49, 50]:

- a. Lavage : une quantité de 1kg de SB, est lavée avec l'eau du robinet plusieurs fois, puis rinçage à l'eau distillée.
- b. Séchage : le séchage est réalisé dans une étuve à 105 °C pendant 24 heures.
- c. Broyage : SB a été coupé en petits morceaux pour effectuer le broyage facilement, Le broyage a été réalisé à l'aide d'un broyeur afin d'obtenir des matériaux homogènes en petite taille.
- d. Tamisage : le matériau broyé est tamisé à l'aide d'un tamis métallique de maille adaptée. Le SB obtenu sous forme de poudre, après ce prétraitement, est présenté dans la Figure II.1.

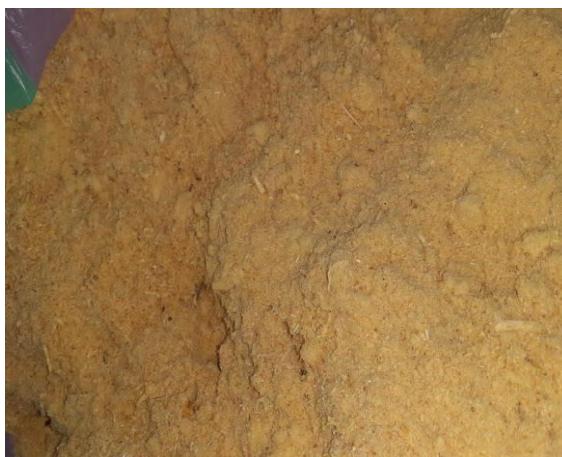


Figure II.1 : SB prétraité sous forme de poudre.

II.4- Fabrication du biofiltre

Le biofiltre (FF) est fabriqué à partir de sciure de bois (SB) prétraité, selon les étapes suivantes:

a. Traitement Alcalin

Une ébullition a été effectuée en faisant bouillir la sciure de bois dans une solution d'hydroxyde de sodium pendant environ 4 heures. Ce processus élimine la lignine et l'hémicellulose tout en gardant la cellulose [51, 52].

b. Blanchiment

Après le traitement alcalin, la sciure de bois a été soigneusement lavée avec de l'eau distillée pour neutraliser le pH. Ensuite, un traitement des fibres a été réalisé avec une solution de blanchiment contenant du chlorite de sodium et de l'acide acétique glacial à une température contrôlée (environ 70 °C) jusqu'à obtenir une apparence blanche [53].

c. Formation du matériau filtrant

Le filtre est formé à travers les étapes suivantes [54]:

- Moulage : La pâte de cellulose blanchie a été humidifiée et placée dans une boîte pour former une forme circulaire. Cela a été suivi d'une pression ou d'un séchage.
- Filtration Sous Vide : La cellulose a été homogénéisée dans de l'eau déionisée et filtrée sous vide en utilisant un papier filtrant.
- Pression : La pâte a été placée dans un moule et une pression a été appliquée pour compacter les fibres et former une feuille de filtre dense.

d. Séchage

Après sa formation, le biofiltre (FF) est laissé sécher à température ambiante puis dans un four à basse température (30– 40°C) pendant plusieurs heures jusqu'à ce qu'il soit complètement sec [55]. Le biofiltre (FF) fabriqué est présenté dans la Figure II.2.



Figure II.2 : L'état du biofiltre fabriqué (FF).

II.5-Techniques d'analyse

Plusieurs techniques d'analyse ont été employées dans ce travail.

II.5.1-Spectrophotométrie UV-Visible

La spectrophotométrie UV-Visible est la technique utilisée pour déterminer la concentration des différents polluants du type colorant (BM, MO et CV).

Cette technique mesure l'absorption de lumière visible (400–700 nm) par des molécules. L'absorption se produit lorsque l'énergie des photons correspond à la différence d'énergie entre les orbitales moléculaires (ex. : transitions $\pi-\pi^*$ ou $n-\pi^*$).

Le principe d'analyse par spectrophotométrie UV-visible est basé sur la loi de Beer Lambert [56]:

$$A = \varepsilon.l.C \dots\dots\dots(1)$$

Avec :

A : Absorbance

ε : Coefficient d'absorption moléculaire ou coefficient d'extinction molaire
(l/mol.cm ou cm²/mol)

l : Trajet optique (cm)

C : Concentration de la substance (mol/l)

II.5.2-Spectroscopie FTIR

La spectroscopie Infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) repose sur l'absorption de la lumière infrarouge par les molécules. L'absorption d'un photon IR provoque des vibrations moléculaires (élongation, déformation). Le spectre FTIR représente la transmittance ou l'absorbance en fonction du nombre d'onde. Les bandes d'absorption sont caractéristiques des liaisons chimiques et des groupes fonctionnels présents dans la molécule [57].

Elle est utilisée pour identifier les différentes fonctions de la structure moléculaire en examinant leurs vibrations moléculaires.

II.5.3- Analyse par DRX

La technique de diffraction des Rayons X noté « DRX » repose sur la diffraction des rayons X par les plans atomiques d'un matériau cristallin. Lorsque les rayons X interagissent avec un cristal, ils sont diffractés selon la loi de Bragg:

$$n\lambda=2d \sin\theta\dots\dots\dots(2)$$

Le diffractogramme obtenu représente l'intensité des rayons X diffractés en fonction de l'angle de diffraction. L'analyse du diffractogramme permet de déterminer la structure cristalline, la taille des cristallites et les phases présentes dans l'échantillon [58].

II.5.4- Technique d'analyse par MÉB

La technique d'analyse par microscopie électronique à balayage (MEB) utilise un faisceau d'électrons pour balayer la surface d'un échantillon. Les interactions entre les électrons et l'échantillon produisent différents signaux, notamment des électrons secondaires et des électrons rétrodiffusés. Ces signaux sont utilisés pour former une image de la surface de l'échantillon avec une grande résolution et une grande profondeur de champ.

Permet d'observer la forme et la morphologie de la surface de l'échantillon avec une grande précision [59].

II.5.5- Méthode BET

La méthode BET (**Brunauer-Emmett-Teller**) est utilisée pour déterminer la surface spécifique d'un matériau poreux. Elle repose sur l'adsorption physique d'un gaz (généralement l'azote) sur la surface du matériau à basse température. En mesurant la quantité de gaz adsorbé à différentes pressions, il est possible de déterminer la surface spécifique du matériau en utilisant l'équation BET [60].

II.6-Essais de traitement

Les expériences de traitement des eaux usées synthétiques préparées ont été réalisées avec un système de filtration afin d'éliminer cette pollution. Les essais de traitement ont été effectués sur trois filtres : le premier filtre noté FC, c'est le papier filtre de laboratoire commercialisé, le deuxième noté FF, c'est le biofiltre fabriqué à partir de Sb et le troisième noté FA, c'est le biofiltre avancé constitué de plusieurs couches de FF. Le débit est de 0.1 mL/min.

Les échantillons ont ensuite été dilués pour mesurer les concentrations résiduelles des différents polluants. Le dosage par UV-visible des concentrations résiduelles du BM, MO et CV. La turbidité des eaux usées synthétiques est mesurée à l'aide d'un turbidimètre. Le pH à l'aide d'un pH-mètre et la concentration résiduelle du chlore provenant de l'eau de Javel est déterminé par un test de chlore.

Chapitre III

Résultats et discussion

Ce chapitre présente les résultats obtenus de cette étude et leur discussion. Les trois filtres objet de ces expériences sont : le filtre commercial FC puis le filtre fabriqué FF à partir de la poudre de sciure de bois (SB) prétraité ainsi que le filtre avancé FA constitué de plusieurs couches de FF.

III.1. Caractérisation du biofiltre

III.1.1. Analyse par FTIR

Les figures III.1 et III.2, représentent respectivement les spectres FTIR de SB prétraité et le biofiltre fabriqué FF.

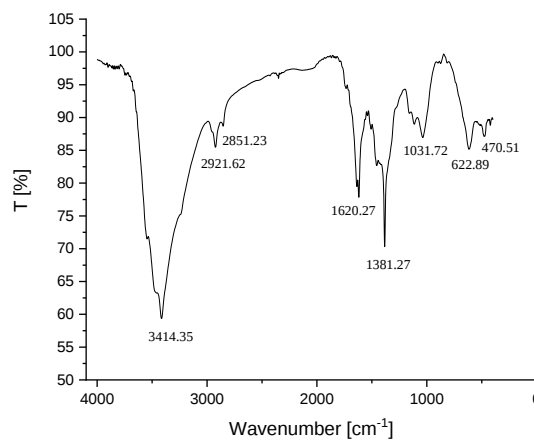


Figure III.1: Le spectre FTIR de la sciure de bois SB prétraité.

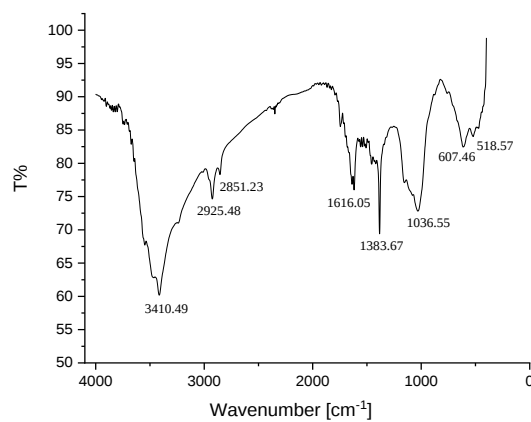


Figure III.2: Le spectre FTIR du biofiltre fabriqué FF.

L'analyse FTIR des deux échantillons révèle que les positions des bandes d'absorption principales sont très proches, ce qui indique la présence des mêmes groupes fonctionnels dans l'échantillon initial et dans le filtre fabriqué :

- ✓ La bande autour de 3400 cm^{-1} correspondent généralement aux vibrations d'élongation des liaisons O-H ou N-H,
- ✓ Les bandes vers 2920 et 2850 cm^{-1} sont typiques des liaisons C-H aliphatiques.
- ✓ La bande à 1620 cm^{-1} est souvent associé aux vibrations C=C ou C=O,
- ✓ Les bandes situées autour de 1380 et 1030 cm^{-1} peuvent être attribués à des vibrations C-H déformées ou à des liaisons C-O.
- ✓ Les bandes en dessous de 700 cm^{-1} sont généralement liés à des vibrations hors plan, caractéristiques de certains cycles ou groupements aromatiques [61, 62].

La principale différence entre les deux échantillons réside dans l'intensité des pics, systématiquement plus élevée pour le SB que pour le filtre après fabrication. Cela signifie que la concentration des groupes fonctionnels détectés est plus importante dans l'échantillon initial. Après la fabrication du filtre, l'intensité des pics diminue, traduisant une réduction de la quantité de groupes fonctionnels, et donc des substances organiques ou des impuretés présentes. Cette observation met en évidence la neutralité du filtre après fabrication, qui conserve ainsi un caractère naturel.

III.1.2. Analyse par BET

Les figures III.3 et III.4 représentent les isothermes d'adsorption/désorption d'azote (méthode BET) pour SB prétraité et FF, respectivement. Le tableau III.1 présente une comparaison des résultats entre ces deux échantillons.

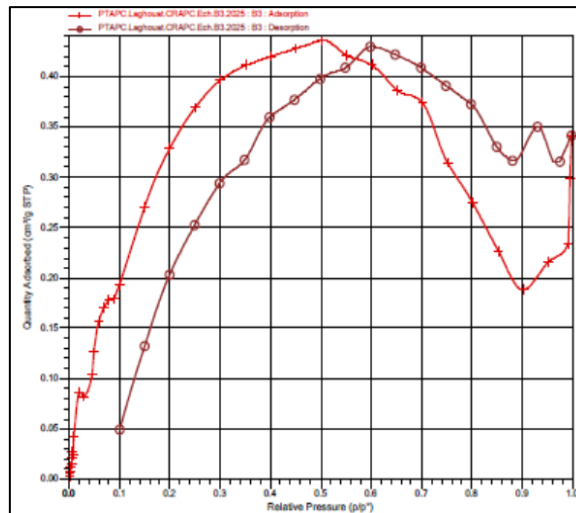


Figure III.3: Isothermes d'adsorption/désorption d'azote (méthode BET) pour SB prétraité.

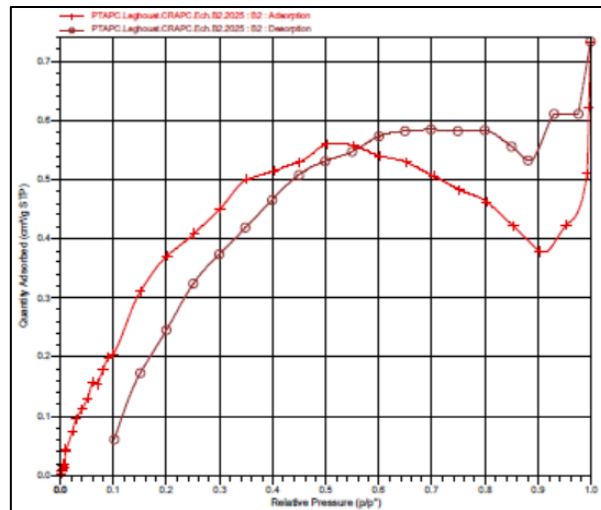


Figure III.4: Isothermes d'adsorption/désorption d'azote (méthode BET) pour FF.

Les isothermes présentent une hystérésis caractéristique des matériaux mésoporeux, indiquant la présence de pores de taille intermédiaire et un phénomène de condensation capillaire [63]. La quantité maximale d'azote adsorbée est plus élevée pour le FF que pour la SB, reflétant une surface spécifique et un volume poreux supérieurs. Bien que la pente initiale des deux isothermes soit similaire, la courbe de FF montre une augmentation plus marquée à haute pression relative, témoignant d'une meilleure capacité d'adsorption globale. De plus, la boucle d'hystérésis plus prononcée pour FF confirme une porosité plus développée et une distribution plus large de la taille

des pores [64]. En résumé, le filtre fabriqué présente une capacité d'adsorption et une porosité supérieure à celles de la sciure brute, le rendant plus adapté aux applications de filtration ou d'adsorption.

Tableau III.1: Comparaison des résultats BET entre SB poudre et FF.

Paramètre	SB prétraité	FF
Surface spécifique BET (m ² /g)	1,6015	1,9742
Volume de pores (adsorption, $p/p^{\circ} = 0,95$) (cm ³ /g)	0,000332	0,000650
Volume de pores (désorption, $p/p^{\circ} = 0,95$) (cm ³ /g)	0,000513	0,000943
Taille moyenne des pores (BJH adsorption) (nm)	2,9598	2,4992
Taille moyenne des pores (BJH désorption) (nm)	2,3312	2,7665
Taille moyenne des nanoparticules (nm)	3 746,4897	3 039,2336

L'analyse comparative des échantillons FF et SB révèle des différences significatives quant à leurs propriétés physiques, influençant leur aptitude à la filtration (tableau III.1).

L'échantillon FF présente une surface spécifique plus élevée (1,9742 m²/g) que l'échantillon SB (1,6015 m²/g). Cette caractéristique suggère que FF offre une plus grande surface active disponible pour les interactions, ce qui est un atout pour la filtration.

Concernant la porosité, FF se distingue par un volume de pores en adsorption (0,000650 cm³/g) presque double de celui de SB (0,000332 cm³/g). Cette tendance est confirmée par les mesures en désorption, où FF atteint 0,000943 cm³/g contre 0,000513 cm³/g pour SB. Une porosité plus importante, comme celle de FF, améliore généralement la capacité du matériau à piéger ou filtrer des molécules.

Pour ce qui est de la taille des pores, les résultats varient selon la méthode de mesure. SB affiche des pores légèrement plus larges lors de l'adsorption (2,9598 nm

contre 2,4992 nm pour FF). Inversement, en désorption, FF présente des pores plus larges (2,7665 nm) que SB (2,3312 nm). Ces variations dans la distribution de la taille des pores peuvent affecter la cinétique d'adsorption et de désorption, et par conséquent, l'efficacité de la filtration.

Enfin, la taille moyenne des particules diffère également : environ 3 039 nm pour FF et 3 746 nm pour SB. Des particules plus petites, comme celles de FF, conduisent généralement à un rapport surface/volume plus élevé, ce qui peut augmenter la surface effective disponible pour la filtration.

III.1.3. Analyse par DRX

Les figures III.5 et III.6 représentent les courbes DRX pour SB prétraité et FF, respectivement.

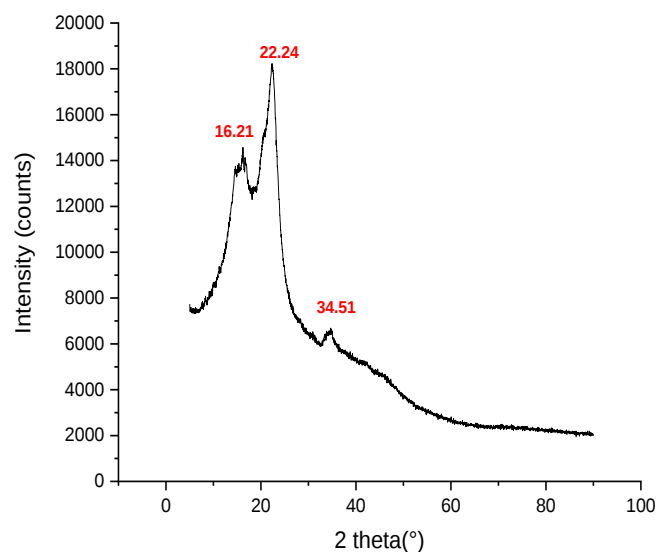


Figure III.5: Courbe de DRX de SB.

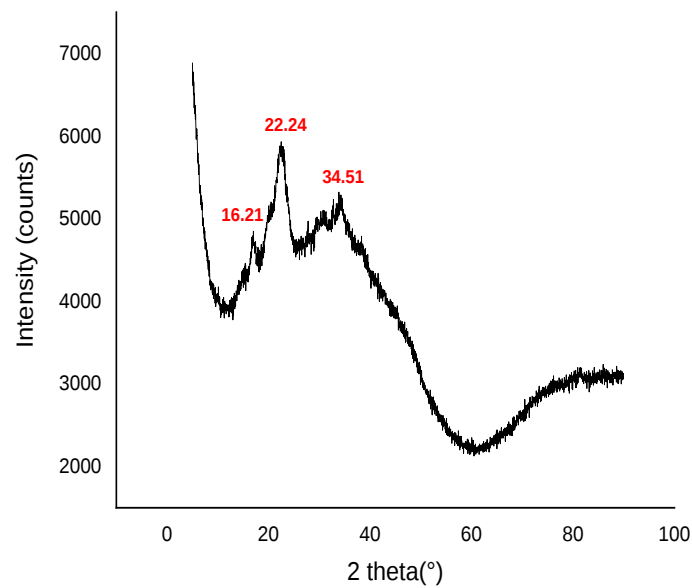


Figure III.6: Courbe de DRX de FF.

L'échantillon SB (figure III.5) présente une structure mixte comportant à la fois des composants amorphes et cristallins, ce qui est typique de la biomasse lignocellulosique [65, 66].

L'intensité élevée observée à 16° indique une teneur significative en phase amorphe, due à l'hémicellulose et à la cellulose amorphe. Le pic marqué à 22° confirme la présence de cellulose cristalline, qui contribue à la résistance mécanique et à la stabilité de la sciure de bois. Enfin, le pic à 34° suggère la présence de structures cristallines mineures ou d'autres composants tels que la lignine.

L'échantillon naturel (SB) présente des pics intenses, témoignant d'une structure lignocellulosique riche en phases amorphes (hémicellulose, cellulose amorphe) et cristallines (cellulose).

Le traitement à la soude NaOH (FF) (Figure III.6) entraîne une diminution générale des intensités des pics, indiquant une réduction de la masse amorphe et cristalline. Ceci est cohérent avec l'effet connu du NaOH qui décompose l'hémicellulose, modifie la cellulose et peut partiellement extraire la lignine, conduisant à une structure plus désorganisée ou modifiée.

III.2. Évaluation des performances de traitement

III.2.1. Évaluation des paramètres physico-chimiques

Mesurer des paramètres tels que le pH, la conductivité, la température et la turbidité (Tableau III.2) est essentiel pour contrôler la qualité de l'eau, car ils influencent directement les processus de traitement et la santé des écosystèmes aquatiques. Le respect des normes de qualité de l'eau garantit que ces paramètres restent dans des limites sûres, assurant ainsi la protection de la santé humaine et la préservation de l'environnement.

- pH : Assure un équilibre chimique et biologique optimal, évite la corrosion des canalisations et limite la toxicité de l'eau.
- Conductivité : Indique la concentration totale en ions dissous ; des valeurs élevées peuvent affecter le goût de l'eau et sa potabilité.
- Température : Influence la vie aquatique et l'efficacité des traitements biologiques ; des températures élevées peuvent favoriser la prolifération bactérienne.
- Turbidité : Limite la présence de particules en suspension qui peuvent abriter des micro-organismes pathogènes et réduire l'efficacité des procédés de désinfection.

Tableau III.2: Comparaison des paramètres physico-chimiques avant et après le traitement

Paramètre	Avant filtration	FC	FF	FA	Norme
pH	2,03	7,47	7,50	8,15	6,5 – 8,5
Conductivité, $\mu\text{S}/\text{cm}$	9170	1061	469	471	≤ 2500
Température, $^{\circ}\text{C}$	24,3	21,6	21,9	24,8	< 30
Turbidité, NTU	4,11	3,57	1,47	0,37	≤ 1

Tous les trois filtres corrigent efficacement le pH, le ramenant dans la plage normale. Le filtre FA élève légèrement le pH vers une valeur alcaline mais reste conforme aux normes. Le traitement est donc efficace pour la neutralisation de l'acidité initiale.

Les trois filtres réduisent significativement la conductivité, indiquant une diminution importante de la concentration en ions dissous. Les filtres FF et FA sont plus performants que FC, car ils abaissent la conductivité bien en dessous de la limite maximale.

Tous les filtres maintiennent la température dans la plage acceptable. Les filtres FC et FF abaissent légèrement la température, ce qui peut être bénéfique pour certains usages, tandis que FA la laisse quasiment inchangée.

La turbidité diminue après filtration, mais seul le filtre FA permet d'atteindre une valeur conforme à la norme (0,37 NTU). Les filtres FC et FF réduisent la turbidité, mais restent au-dessus de la limite acceptable, ce qui indique une efficacité moindre dans la clarification de l'eau.

Tous les filtres améliorent la qualité de l'eau en corrigeant le pH, la conductivité et la température. Cependant, en termes de réduction de la turbidité, seul le filtre FA répond pleinement aux exigences normatives. Par conséquent, le filtre FA semble être le plus efficace globalement, suivi par FF, puis FC.

III.2.2. Étude de l'élimination de chlore libre

L'eau de Javel (solution d'hypochlorite de sodium, NaClO) est un désinfectant majeur utilisé pour éliminer les germes et assurer la potabilité de l'eau. Toutefois, son pourcentage doit être maintenu à un niveau raisonnable afin d'éviter des effets indésirables.

Un dosage trop élevé de chlore peut entraîner des désagréments pour le consommateur, notamment un goût ou une odeur de javel perceptible au-delà de 0,6 mg/L, ainsi que des risques sanitaires liés à l'accumulation de sous-produits de la chloration.

Ces sous-produits, issus de la réaction du chlore avec des matières organiques ou des composés azotés présents dans l'eau, peuvent être associés à certains effets toxiques ou à un risque accru de cancers [67, 68].

Le tableau III.3, présente une comparaison de l'efficacité de trois types de filtres: un filtre fabriqué, un filtre avancé et un filtre commercial. En faisant passer de l'eau contenant une teneur en chlore libre initiale de 0,3 mg/L à travers ces filtres, on observe une diminution différente de cette teneur selon le filtre utilisé.

La teneur en chlore libre est réduite à 0,1 mg/L après passage dans le filtre commercial, tandis qu'elle est quasiment nulle (présence de traces) après passage dans les filtres avancé et fabriqué.

Tableau III.3: Comparaison des taux d'élimination de chlore libre selon le type de filtre

Type de filtre	Teneur en chlore libre après traitement (ppm)
Filtre commercial	0,1
Filtre avancé	Traces (quasi-nulle)
Filtre fabriqué	Traces (quasi-nulle)

III.2.3. Étude de l'élimination des polluants colorés

À ce stade, l'efficacité du filtre préparé pour éliminer les polluants colorés de l'eau, à savoir le bleu de méthylène (BM), le méthyle orange (MO) et le cristal violet (CV), est évaluée en comparant les résultats avant et après filtration avec ceux obtenus à l'aide d'un filtre commercial, du filtre fabriqué et du filtre avancé.

a. Les courbes d'étalonnage

Après avoir déterminé la longueur d'onde $\lambda_{\max}$ correspondant à ces polluants, une courbe a été tracée à partir d'une série de concentrations différentes, à l'aide d'un

spectromètre UV-Vis (Annexe 1). Cette méthode a permis de quantifier la teneur en polluants selon la loi de Beer-Lambert .

La loi est généralement exprimée par l'équation suivante :

$$A = \varepsilon \cdot l \cdot C \quad (1)$$

Où :

A : est l'absorbance de la solution.

ε : (epsilon) est le coefficient d'extinction molaire (ou absorptivité molaire) ($L \cdot /mol$ cm).

l: est la longueur du trajet optique, (cm)

C : est la concentration molaire de la substance colorées dans la solution. (mol/L).

Les résultats obtenus ont ensuite servi à tracer la courbe d'étalonnage de BM (Figure III.7), la courbe d'étalonnage de MO (figure III.8) et la courbe d'étalonnage de CV (figure III.9).

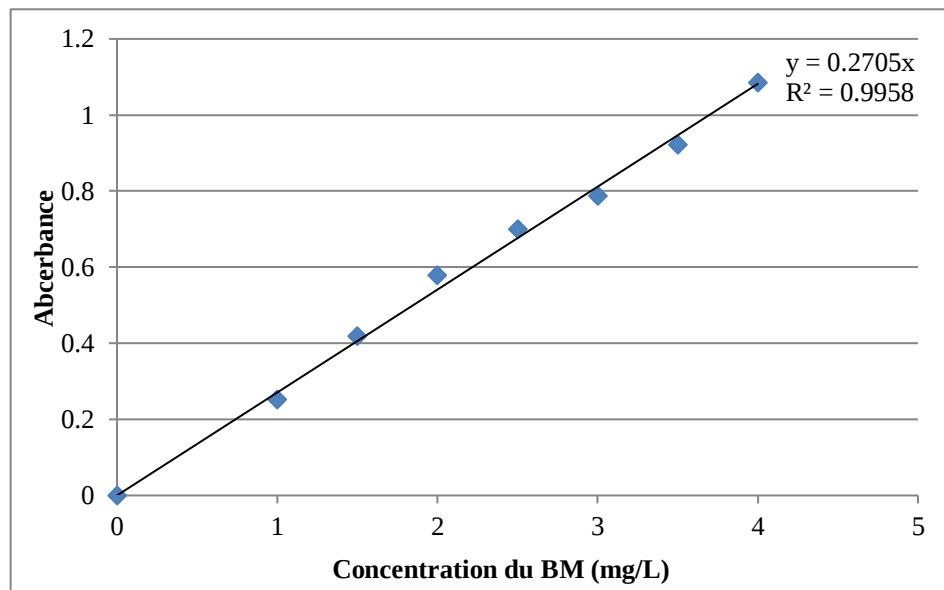


Figure III.7: Courbe d'étalonnage du BM.

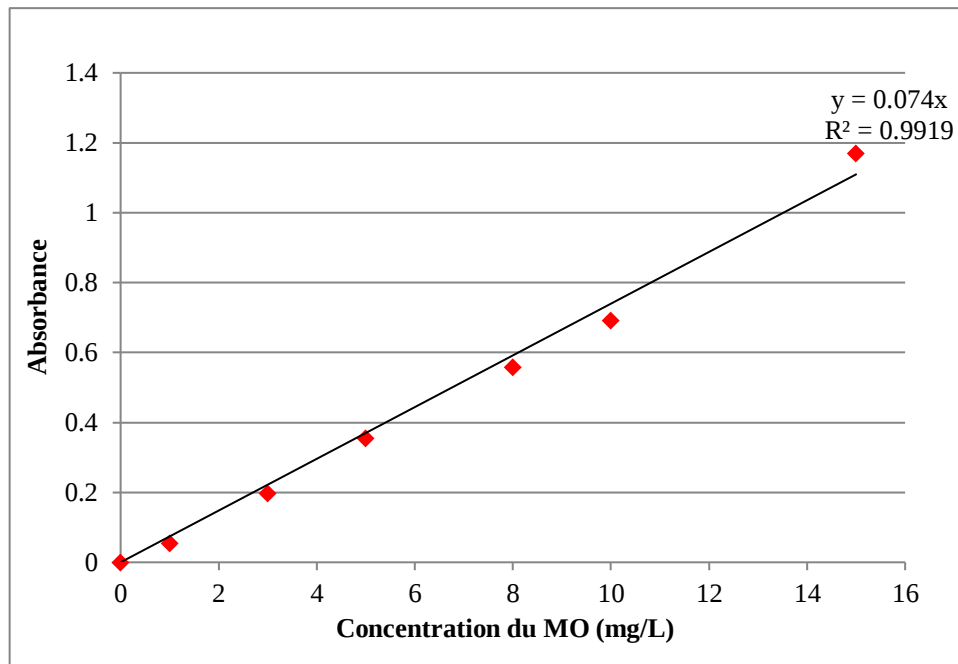


Figure III.8: Courbe d'étalonnage du MO.

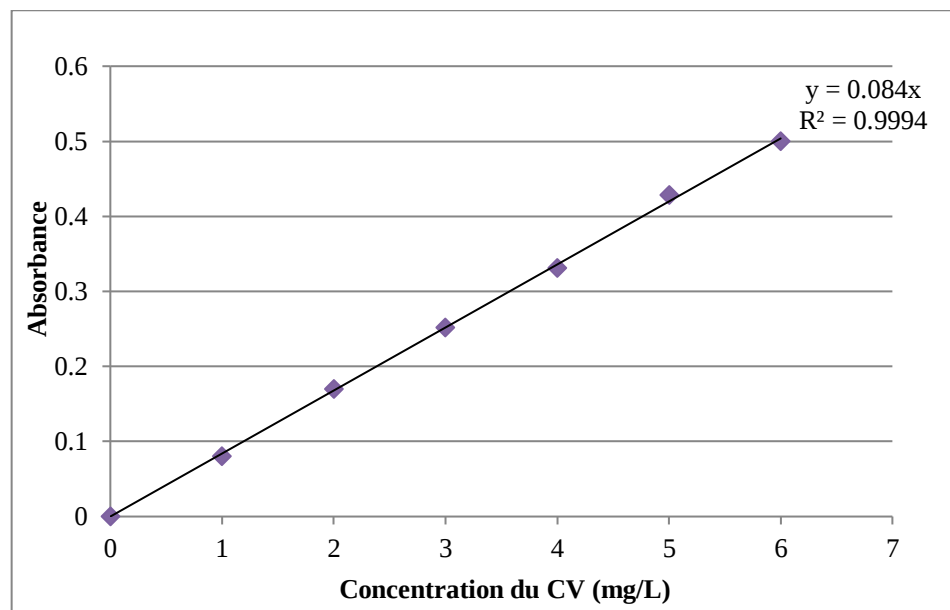


Figure III.9: Courbe d'étalonnage du CV.

b. Le taux d'élimination

La détermination du taux d'élimination par filtration des polluants colorés, noté T_e et exprimé en pourcentage (%), il est défini par l'équation (2) :

$$Te = \frac{(C_0 - C_r)}{C_0} \times 100 \dots \dots \dots (2)$$

Où :

C_0 : Concentration initiale du colorant (mg/L).

C_r : Concentration du colorant reste (mg/L).

Les figures III.10, III.11 et III.12, représentent respectivement les résultats du taux d'élimination de la filtration et de l'adsorption des polluants colorés : bleu de méthylène (BM), le méthyle orange (MO) et le cristal violet (CV).

Le Tableau III.4 regroupe les taux d'élimination des polluants colorés selon le type de filtre.

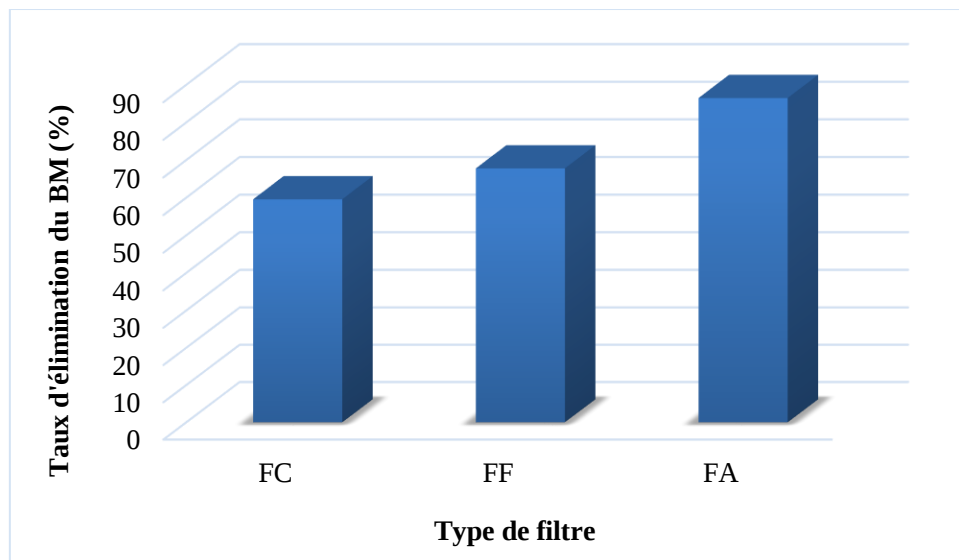


Figure III.10: Le taux d'élimination du BM selon le type de filtre.

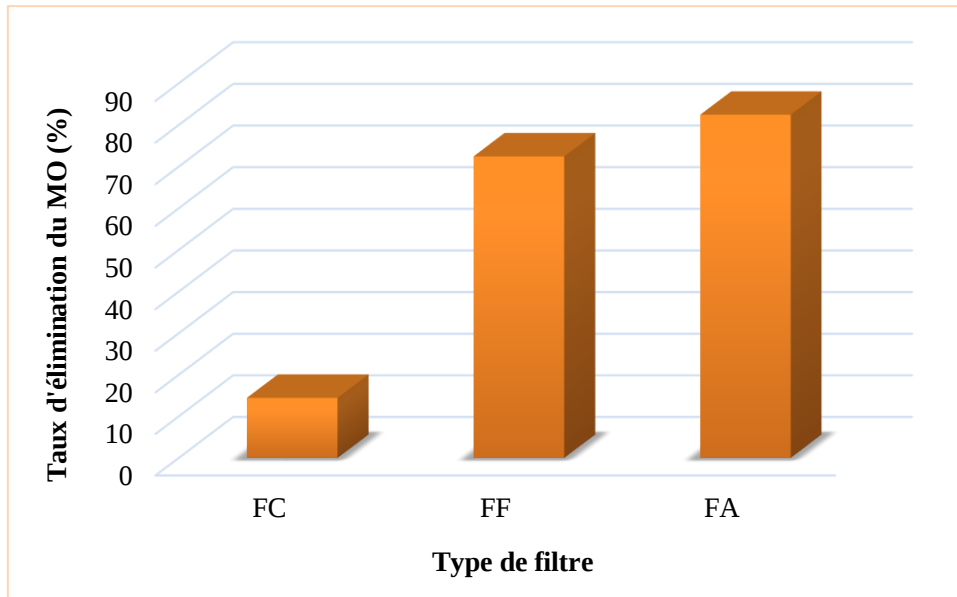


Figure III.11: Le taux d'élimination du MO selon le type de filtre.

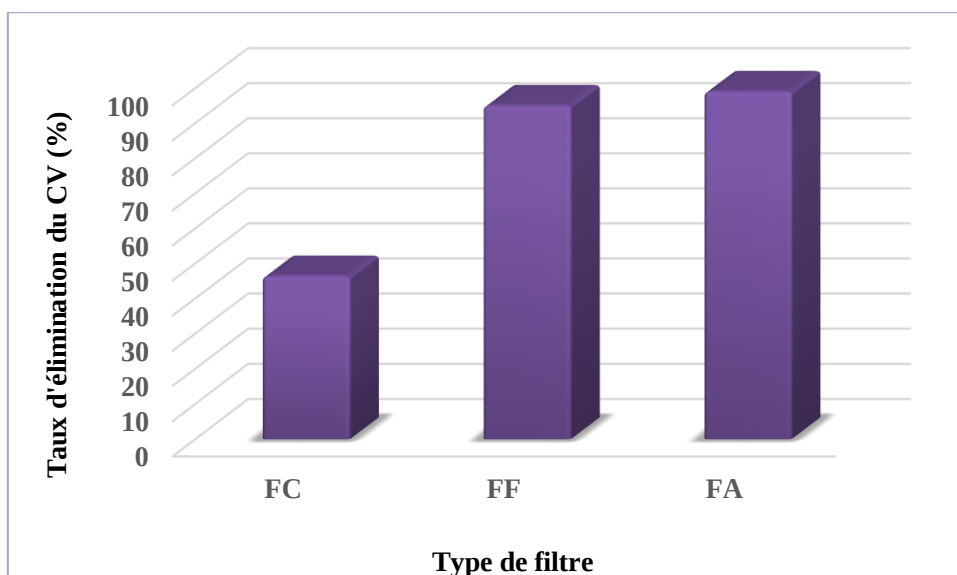


Figure III.12: Le taux d'élimination du CV selon le type de filtre.

L'analyse comparative des taux d'élimination selon le type de filtre met en évidence des différences significatives entre les trois filtres étudiés (FC, FF, FA) pour les colorants BM, MO et CV. Pour le BM (figure III.10 et Tableau III.4) le taux d'élimination s'améliore progressivement, passant de 59,55 % avec le filtre classique (FC) à 67,77 % avec le filtre FF, puis atteignant 86,47 % avec le filtre FA. Cette progression traduit une nette amélioration de l'efficacité, avec une différence importante entre le filtre le moins performant et le plus performant.

Tableau III.4: Comparaison des taux d'élimination des polluants colorés selon le type de filtre

Type de filtre	BM (%)	MO (%)	CV (%)
FC	59,55	14,44	46,32
FF	67,77	72,44	95,08
FA	86,47	82,44	99,04

Concernant le MO, (figure III.11 et Tableau III.4) le contraste est encore plus marqué. Le filtre FC affiche un taux d'élimination très faible de 14,44 %, tandis que le filtre FF permet d'atteindre 72,44 %, et le filtre FA, 82,44 %. L'écart entre le minimum et le maximum souligne l'importance du filtre FA

Pour le CV, (figure III.12 et Tableau III.4) on observe également une forte augmentation de l'efficacité : le taux d'élimination passe de 46,32 % (FC) à 95,08 % (FF), puis à 99,04 % (FA). Ici encore, la différence illustre la supériorité du filtre FA.

Conclusion générale

L'étude de caractérisation met en évidence les avantages structuraux du biofiltre fabriqué (FF) pour la filtration :

✚ Le spectre infrarouge révèle une diminution marquée de l'intensité des pics fonctionnels dans le filtre fabriqué (FF) par rapport à la sciure brute (SB). Cette réduction indique une baisse significative de la concentration des groupes fonctionnels et des impuretés organiques suite à la fabrication. Le FF présente ainsi un profil spectral plus neutre, suggérant une purification ou une modification structurale lors de son élaboration. Cette neutralité pourrait expliquer sa capacité à minimiser les interactions indésirables lors de la filtration, tout en conservant une base matérielle naturelle.

✚ L'analyse BET montre que le filtre fabriqué (FF) possède une surface spécifique plus élevée ($1,97 \text{ m}^2/\text{g}$) que la sciure brute (SB) ($1,60 \text{ m}^2/\text{g}$), ce qui lui confère un plus grand nombre de sites actifs pour l'adsorption.

✚ En termes de porosité, le volume de pores du FF est presque doublé par rapport à celui de la SB (par exemple, $0,00065 \text{ cm}^3/\text{g}$ contre $0,00033 \text{ cm}^3/\text{g}$ mesuré lors de l'adsorption) et reste supérieur ($0,00094 \text{ cm}^3/\text{g}$ contre $0,00051 \text{ cm}^3/\text{g}$ mesuré lors de la désorption), ce qui favorise une meilleure capacité à piéger les molécules. Concernant la taille des pores, le FF présente des pores plus étroits lors de l'adsorption ($2,49 \text{ nm}$ contre $2,96 \text{ nm}$ pour la SB), mais plus larges lors de la désorption ($2,76 \text{ nm}$ contre $2,33 \text{ nm}$), ce qui pourrait optimiser à la fois la rétention et la libération des substances. Enfin, la taille moyenne des particules est plus petite pour le FF ($3,04 \text{ nm}$ contre $3,74 \text{ nm}$ pour la SB), ce qui augmente le rapport surface/volume et améliore l'efficacité de filtration.

✚ Les résultats de la DRX confirment que le traitement alcalin décompose partiellement les composants amorphes et perturbe la cristallinité de la cellulose, modifiant ainsi la structure globale de la biomasse lignocellulosique de SB. Cette transformation pourrait améliorer l'accessibilité chimique et enzymatique de la biomasse pour des applications industrielles telles que la filtration.

Concernant les résultats d'efficacité du filtre fabriqué et l'étude d'optimisation des paramètres physico-chimiques :

✚ Tous les trois filtres corrigent efficacement le pH en le ramenant dans la plage normale, le filtre FA ayant toutefois tendance à l'élever légèrement vers une valeur alcaline tout en restant conforme aux normes.

✚ Ils réduisent significativement la conductivité, ce qui traduit une diminution importante de la concentration en ions dissous, les filtres FF et FA étant plus performants que le filtre FC à cet égard.

✚ La température est maintenue dans une plage acceptable par tous les filtres, FC et FF la diminuant légèrement, ce qui peut être bénéfique selon l'usage envisagé.

✚ En ce qui concerne la turbidité, celle-ci diminue après filtration, mais seul le filtre FA permet d'atteindre une valeur conforme à la norme, tandis que les filtres FC et FF restent au-dessus de la limite acceptable.

✚ L'étude démontre que les filtres avancé et fabriqué sont nettement plus efficaces que le filtre commercial pour réduire le taux de chlore libre dans l'eau. Alors que le filtre commercial ne parvient à diminuer la concentration qu'à 0,1 mg/L, les filtres avancé et fabriqué éliminent quasi totalement le chlore libre, ne laissant que des traces.

L'analyse comparative d'élimination des trois colorants donne :

✚ Les trois filtres FC, FF et FA révèlent des différences significatives dans leur capacité à éliminer les colorants BM, MO et CV. Pour chaque colorant, le filtre FA se distingue par une efficacité nettement supérieure, avec des taux d'élimination atteignant respectivement 86,47 % pour le BM, 82,44 % pour le MO, et 99,04 % pour le CV. Le filtre FF montre également une amélioration notable par rapport au filtre classique FC, mais reste en deçà des performances du filtre FA.

Ces résultats soulignent clairement la supériorité du filtre FA pour le traitement des eaux contaminées par ces colorants, offrant une solution plus efficace pour la clarification. Ainsi, bien que tous contribuent à améliorer globalement la qualité de l'eau, le filtre FA se révèle le plus efficace suivi de FF puis de FC.

Ces perspectives visent à améliorer la performance globale de filtre, à assurer une meilleure qualité de l'eau traitée et à faciliter leur adoption dans un contexte réel :

- ✓ Optimisation du matériau filtrant : Explorer de nouvelles combinaisons de matériaux ou des traitements innovants afin d'améliorer davantage la performance des filtres.

- ✓ Évaluation microbiologique approfondie : Compléter l'analyse physico-chimique par une étude détaillée de l'élimination des contaminants microbiens (bactéries, virus, protozoaires) pour garantir la sécurité sanitaire de l'eau filtrée.

- ✓ Adaptation à divers types d'eaux : Tester les filtres sur un éventail de sources d'eau (eaux de surface, eaux souterraines, eaux usées traitées) afin d'évaluer leur efficacité dans des conditions variées et face à différents profils de polluants.

- ✓ Intégration de traitements complémentaires : Étudier la combinaison des filtres avec d'autres procédés physico-chimiques (par exemple, désinfection UV, adsorption) pour traiter des contaminants plus complexes, tels que les métaux lourds ou les micropolluants.

Références bibliographiques

- [1]. Grosclaude, G.D. (1999). L'eau, tome 1, Milieu naturel et maîtrise, et tome 2, Usages et polluants. Versailles, Institut National de la recherche Agronomique.
- [2]. Vaillant J.R. (1974). Perfectionnement et nouveautés pour l'épuration des eaux usées urbaines et eaux résiduaires industrielles. Edition Eyrolles, Paris
- [3] Gherara, N. (2019). Étude des performances de la station d'épuration des eaux usées de la région Haoud Berkaoui. Thèse de doctorat. <https://www.h2o-de.com> > [Accueil](#) > [Guide](#)
- [4]. Metahri, M. S. (2012). Elimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées traitées par des procédés mixtes: cas de la STEP est de la ville de Tizi Ouzou. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri.
- [5]. Krid, L. et Bouldjedri, M. (2006). Evaluation spatio-temporelle de la qualité physico-chimique des eaux du lac El-Kennar. Thèse de doctorat. Université de Jijel <https://www.mapaq.gouv.qc.ca> > [Pages](#) > [eaux usées](#)
- [6]. Hamiche L. (2013). Conception d'une station d'épuration pour la région de béli douala. Mémoire d'ingénieur d'état en hydraulique, école nationale supérieure de l'hydraulique.
- [7]. Bendiaf, R. (2018). Évaluation de la qualité des eaux usées brutes et épurées de la STEP d'Ain Sfiha (Sétif). Mémoire de master, Université de Biskra, Faculté des Sciences et de la Technologie, Département de Génie Civil et d'Hydraulique.
- [8]. Mahmoud Bali. (2024), Traitement des eaux usées. Licence. Institut Supérieur des Sciences et Techniques des Eaux, Université de Gabès, Tunisie.
- [9]. Boukhari, H. (2020). Étude physico-chimique des eaux usées traitées de la STEP de Draa El Mizan pour des fins de valorisation agricole, Mémoire de master. Université de Tizi-Ouzou, Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques, Département des Sciences Agronomiques.
- [10]. Bertrand, P.B.E.N. (2008). Étude de l'influence des matières en suspension sur les sols irrigués par les eaux usées traitées, Mémoire d'ingénieur de l'équipement rural. Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement.
- [11]. Khali, S., & Sebaa, N. (2021). Mémoire de master professionnel, Université Kasdi Merbah d'Ouargla, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie.
- [12]. Boumalek, W. (2020). Études des possibilités de valorisation agricole des sous-produits d'épuration et l'amélioration de la gestion des processus épuratoires d'une station d'épuration. Thèse de doctorat, École Nationale Polytechnique.
- [13]. Keddari, D. (2015). Mise au point des techniques de mesure de la DBO5, des formes azotées et des paramètres physiques des eaux superficielles, Mémoire de master. Université des Sciences et de la Technologie de Constantine, Algérie.
- [14]. Villeneuve, V., Légaré, S., Painchaud, J., & Vincent, W. (2006). Dynamique et modélisation de l'oxygène dissous en rivière. Revue des Sciences de l'Eau, 19(4), 259-274.
- [15]. Lounici, A., & Makhoukh, L. (2022). Étude de la performance de la station d'épuration de Bordj Bou Arreridj, Mémoire de master, Université Mohammed el Bachir el Ibrahimi, Bordj Bou Arreridj.
- [16]. Mohammed M. (2012). Élimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées traitées, par des procédés mixtes. Cas de la Step Est de la ville de Tizi-Ouzou. Thèse de doctorat, Université de Tizi-Ouzou.
- [17]. Gilbert, D., & Lavoie, J. (1999). Les risques biologiques reliés aux eaux usées. Montréal, Québec, Canada : APSAM. Fiche technique / APSAM, no 19, 4 p.
- [18]. Attab, S. (2011). Amélioration de la qualité microbiologique des eaux épurées par boues activées de la station d'épuration Haoud Berkaoui par l'utilisation d'un filtre à sable local. Mémoire de magistère, Université Kasdi Merbah, Ouargla.

- [19]. Bagui, A., & Benbouali Ahmed Mounir. (2022). Traitement des eaux usées industrielles, Mémoire de master, Université d'Oran 2, Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle, Département de Sécurité Industrielle et Environnement.
- [20]. Bouzidi, Y. (2020). Réutilisation des Eaux Usées Epurées en Algérie, Mémoire de Master. Université de Guelma, Faculté des Sciences et de la Technologie.
- [21]. Touati L. (2021). Cours de pollution des eaux. Université Frères Mentouri Constantine 1
- [22]. Leclerc-Olive, M. (1997). Le Dire de l'événement:(biographique). Presses Univ. Septentrion. France, 259.
- [23]. Centre d'Information sur l'Eau (2019) La pollution de la ressource en eau : d'où vient-elle et comment la réduire ? <https://www.cieau.com/connaitre-leau/la-pollution-de-leau/pollution-ressourceeau-comment-reduire/>
- [24]. Ben mehraz, A. et Louelh, D. (2016). Contribution à l'évaluation de la qualité des effluents industriels au niveau de l'Entreprise Nationale des Industries de l'Electroménager « ENIEM ». Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri.
- [25]. [25] Gana O. K., & Draoui A. (2023). Mémoire de master, Université de Ouargla, Faculté des sciences appliquées, Département de Génie des Procèdes.
- [26]. Nriagu, J. O. (1989). A history of global meta pollution. Science of the Total Environment, 87-88,
- [27]. Office français de la biodiversité Eau france : <https://www.eaufrance.fr/les-impacts-de-la-pollution-de-leau>
- [28]. Institut Pasteur (2024), Institut Pasteur <https://www.pasteur.fr/fr/centre-medical/fiches-maladies/escherichia-coli>
- [29]. bioMérieux Industry, (2020) BioMérieux <https://www.biomerieux-industry.com/fr/food-safety-quality/resources/food-microorganisms-library/food-borne-virus>
- [30]. Safe Drinking Water Foundation (2016) Safe Drinking Water Foundation <https://www.safewater.org/french-fact-sheets/2017/2/1/cryptosporidium-detaille>
- [31]. Ramande F., (1998). Dictionnaire encyclopédique de l'eau. Édition Edi science international, Paris. 487
- [32]. World Health Organization. (2019). Safer water, better health. 12. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/329905>
- [33]. Rabalais, N.N., Turner, R.E., & Wiseman, W.J. (2010). Hypoxia in the northern Gulf of Mexico. Journal of Environmental Quality, 39(2), 320-332.
- [34]. Lomova, L.A., Voronkova, O., Aleshko, R.A., Goneev, I.A., Avdeev, Yu. & Sochnikova, I. (2019). Ecological and economic consequences of water pollution. Int. Journal of Engineering and Advanced Technology, 9(1), 7056-7062.
- [35]. WHO (2017). Guidelines for Drinking-water Quality. Geneva: World Health Organization.
- [36]. EPA (2021). Water Treatment Manual. Washington, DC: EPA.
- [37]. AWWA (2018). Membrane Filtration Guidance Manual. Denver, CO: American Water Works Association.
- [38]. Metcalf & Eddy, Inc. (2014). Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- [39]. EPA (2000). Wastewater Technology Fact Sheet: Screening and Grit Removal. Washington, DC: EPA.
- [40]. WHO (2011). Safe Drinking-water from Desalination. Geneva: World Health Organization.
- [41]. AWWA (2020). Ozone in Water Treatment. Denver, CO: American Water Works Association.

- [42]. EPA (1998). Advanced Oxidation Processes for Water Treatment. Washington, DC: EPA.
- [43]. EPA (1993). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. Washington, DC: EPA.
- [44]. EPA (2006). Anaerobic Digestion of Biosolids. Washington, DC: EPA.
- [45]. AWWA (2015). Reverse Osmosis and Nanofiltration. Denver, CO: American Water Works Association.
- [46]. WHO (2017). Guidelines for Drinking-water Quality. Geneva: World Health Organization.
- [47]. EPA (1999). Alternative Disinfectants and Oxidants Guidance Manual. Washington, DC: EPA.
- [48]. Bonilla-Petriciolet, A., Mendoza-Castillo, D. I., & Reynel-Ávila, H. E. (Eds.). (2017). Adsorption Processes for Water Treatment and Purification. Springer.
- [49]. Ad, C., Djedid, M., Benalia, M., Boudaoud, A., Elmsellem, H., & Ben Saffedine, F. (2018). Adsorptive removal of nickel (II) using *Luffa cylindrica*: effect of NaCl concentration on equilibrium and kinetic parameters. In Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions: Proceedings of Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration (EMCEI-1), Tunisia(2017) (pp. 1305-1306). Springer International Publishing.
- [50]. Boudaoud, A., Djedid, M., Benalia, M., Ad, C., Bouzar, N., & Elmsellem, H. (2017). Removal of nickel (II) and cadmium (II) ions from wastewater by palm fibers. Scientific Study & Research. Chemistry & Chemical Engineering, Biotechnology, Food Industry, 18(4), 391-406.
- [51]. Imoisili, P.E., Olusunle, S.O., Popoola, A.V., & Okoronkwo, A.E. (2017). Effect of Alkaline Treatment on the Macromolecular, Thermal, and Crystallographic Structures of Plantain (*Musa paradisiaca*) Fibers.
- [52]. Nguyen, T.T., Tran, C.C., Khanh Nguyen, T.V., Nguyen, T.K., Xiao, Z., & Xie, Y. (2024). Shrinkage of poplar and radiata pine wood after treatment with sodium silicate and sodium hydroxide. *Holzforschung*, 78, 257 - 269.
- [53]. Majid, A.M. (2017). Optimization condition of isolation cellulose nanofibrils using naoh alkaline treatment.
- [54]. Odusote, J.K., Onowumab, S.A., & Fodeke, E.A. (2016). Production of paperboard briquette using waste paper and sawdust. *The Journal of Engineering Research*, 13(1), 80-88.
- [55]. Raharjo, W.P., Soenoko, R., Purnowidodo, A., Choiron, M.A., & Triyono (2016). Mechanical properties of untreated and alkaline treated fibers from zalacca midrib wastes.
- [56]. Skoog, D.A., Holler, F.J., & Crouch, S.R. (2019). Textbook principles of instrumental analysis. Cengage learning.
- [57]. Stuart, B.H. (2004). Infrared spectroscopy: fundamentals and applications. John Wiley & Sons.
- [58]. Ali, A., Chiang, Y.W., & Santos, R.M. (2022). X-ray diffraction techniques for mineral characterization: A review for engineers of the fundamentals, applications, and research directions. *Minerals*, 12(2), 205.
- [59]. Goldstein, J.I., Newbury, D.E., Michael, J.R., Ritchie, N.W., Scott, J.H.J., & Joy, D.C. (2017). Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis. Springer.
- [60]. Brunauer, S., Emmett, P.H., & Teller, E. (1938). Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American chemical society*, 60(2), 309-319.

- [61]. Boudaoud, A., AD, C., Djedid, M., Guermit M., Benalia, M., & Soltani, A. (2024). Removal of azo toxic dye from synthetic wastewater using dry spearmint sprigs. *LARHYSS Journal*, 21(1), 45-67. <https://asjp.cerist.dz/en/article/256552>
- [62]. Saadallah, K., AD, C., Djedid, M., Batool, M., Benalia, M., Saadallah, S., & Hamamda, S. (2024). Potential of the Algerian pine tree bark for the adsorptive removal of methylene blue dye: Kinetics, isotherm and mechanism study. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 1–19. <https://doi.org/10.1080/01932691.2024.2425957>
- [63]. Thommes, M., and al., (2015). Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 87(9-10), 1051-1069.
- [64]. Zhang, Y. and al. (2022). Morphological modulation of iron carbide embedded nitrogen-doped hierarchically porous carbon by manganese doping as highly efficient bifunctional electrocatalysts for overall water. *J. of Colloid and Interface Sci.*, 618.
- [65]. Afzal, R.A. and al. (2022). Lignocellulosic plant cell wall variation influences the structure and properties of hard carbon derived from sorghum biomass. *Carbon Trends*, 7, 100168. <https://doi.org/10.1016/j.cartre.2022.100168>
- [66]. Semaan, G., Klausen, S.J., Martín, C. & et al. (2025). Fractionation and characterization of multi-feedstock lignocellulosic biomass via two-stage pretreatment. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-025-06576-8>
- [67]. Ishihara, S. and al. (2022). Health effects of sodium hypochlorite: Review of published case reports. *Int. J. of Env. Research and Public Health*, 19(7), 4123. <https://doi.org/10.3390/ijerph19074123>
- [68]. Chung, I., Ryu, H., Yoon, S.Y., & Ha, J. (2022). Health effects of sodium hypochlorite: Review of published case reports. *Environmental Analysis Health and Toxicology*, 37, e2022006.

عنوان المذكرة: إنتاج فلتر حيوي من مواد طبيعية لمعالجة مياه الصرف الصحي

اللقب: بن عليّة وشلّامة الإسم: سارة و إيمان
المؤطر: د. بوداود أسماء و أ.د. جديد مبروك

ملخص: في هذه الدراسة تم اعداد مرشحا قائما على نشارة الخشب (FF) لمعالجة مياه الصرف الصحي، مما يدل على تحسينات هيكلية مقارنةً بنشارة الخشب الخام (SB) مع انخفاض الشوائب العضوية. أظهر FF مساحة سطح نوعية أعلى (1.97 متر مربع/جم مقابل 1.60 متر مربع/جم) وحجم مسام أكبر تقريباً (0.00065 سم³/جم مقابل 0.00033 سم³/جم). عزز حجم مسامه وحجم جسيماته الأصغر (3.04 نانومتر مقابل 3.74 نانومتر) من كفاءة الترشيح. قامت جميع المرشحات المختبرة بتطبيع الرقم الهيدروجيني وخفض الموصلية، حيث تفوق FF والمرشح المتقدم (FA) على المرشح التجاري (FC). أظهر FA إزالة فائقة للصبغة (تصل إلى 99.04%)، وإلى جانب FF، أزال الكلور الحر بالكامل تقريباً، على عكس FC. بشكل عام، كان FA هو المرشح الأكثر فعالية، يليه FF ثم FC.

كلمات مفتاحية: الترشيح، فلتر من نشارة الخشب، التحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء (FTIR)، تحليل BET، حيود الأشعة السينية (XRD)، المياه العادمة.

Memory title: Production of a Bio-filter from Natural Materials for Wastewater Treatment

Name: BENALIA & CHELLAMA First name: Sara & Imane
Supervised by: Dr. BOUDAUD Asma & Pr. DJEDID Mebrouk

Abstract:

In this study, a sawdust-based (FF) filter was prepared for wastewater treatment, demonstrating structural improvements compared to raw sawdust (SB) with reduced organic impurities. FF exhibited a higher specific surface area (1.97 m²/g versus 1.60 m²/g) and a larger pore volume (0.00065 cm³/g versus 0.00033 cm³/g). Its smaller pore size and particle size (3.04 nm versus 3.74 nm) enhanced filtration efficiency. All tested filters normalized pH and reduced conductivity, with FF and the advanced filter (FA) outperforming the commercial filter (FC). FA demonstrated superior dye removal (up to 99.04%) and, together with FF, almost completely removed free chlorine, unlike FC. Overall, FA was the most effective filter, followed by FF and then FC.

Key words: Filtration, Sawdust-based filter, FTIR, BET, XRD, Wastewater.

Titre du mémoire : Production d'un Bio-filtre à partir de Matériaux Naturels pour le Traitement des Eaux Usées

Nom: BENALIA & CHELLAMA Prénom : Sara & Imane
Encadreur: Dr. BOUDAUD Asma et Pr. DJEDID Mebrouk

Résumé: Dans cette étude, un filtre fabriqué à partir de sciure de bois (FF) a été préparé pour le traitement des eaux usées, montrant des améliorations structurelles par rapport à la sciure brute (SB) avec une réduction des impuretés organiques. Le FF présente une surface spécifique plus élevée (1,97 m²/g contre 1,60 m²/g) et un volume de pores plus important (0,00065 cm³/g contre 0,00033 cm³/g). Sa plus petite taille de pores et de particules (3,04 nm contre 3,74 nm) améliore l'efficacité de filtration. Tous les filtres testés normalisent le pH et réduisent la conductivité, le FF et le filtre avancé (FA) surpassant le filtre commercial (FC). Le filtre FA démontre une élimination supérieure des colorants (jusqu'à 99,04 %) et, avec le FF, élimine presque complètement le chlore libre, contrairement au FC. Globalement, le FA est le filtre le plus efficace, suivi du FF, puis du FC.

Mots clés : Filtration, Filtre à base de sciure, FTIR, BET, DRX, Eaux usées.