



UNIVERSITÉ
DE BISKRA

Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des sciences et de la technologie
Département de chimie industrielle

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie des procédés

Spécialité : Génie des procédés de l'environnement

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :

Rached Abderrafik

Hamzaoui Mohamed Ouassim

Le : 17/juin /2025

Applications du Biochar Fonctionnalisés dans les systèmes de biofiltration

Jury :

Dr.	TIMEDJEGHDINE Mebarka	MCB	Université de Biskra	Président
Pr.	HAMDI Ines	Pr	Université de Biskra	Examineur
Dr.	DJEBABRA Sihem	MCA	Université de Biskra	Rapporteur

Année universitaire : 2024- 2025



Remerciement



*Un grand merci à DIEU pour nous avoir donné le courage et la volonté
d'achever ce modeste travail.*

*Premièrement, nous tenons à remercier nos encadrateurs **Dr. DJEBABRA Sihem**
et **Dr. SOUDANI Amina** pour leurs conseils et leurs remarques, qui nous ont
permis de mener ce travail à bon port.*

*Nos vifs remerciements s'adressent également à **Dr. TIMEDJEGHDINE**
Mebarka et **Pr. HAMDI Ines** d'avoir accepté de faire partie de notre jury
et d'examiner notre travail.*

*Un grand merci aussi à **Mme NAILI Radhia**, responsable du laboratoire
pédagogique du département de chimie industrielle, pour sa disponibilité et sa
gentillesse. Nous remercions aussi l'ensemble des ingénieurs du laboratoire,
Sara et Zehour, pour leur soutien et leur collaboration.*

*Nous adressons n vif mercîments à **Dr. ZIAD Sabrina** pour leur aide*

*Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants de la faculté des sciences et
de la technologie, département de chimie industrielle, ainsi qu'à toutes les
personnes qui nous ont encouragés et soutenus.*

*Enfin, merci à toutes celles et ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à
l'accomplissement de ce travail.*

Merci à tous et à toute



DÉDICACE



*En premier lieu, je tiens à remercier mon DIEU, créateur de donner la force
pour accomplir ce travail.*

*Mes parents, Le deux personne le plus chère on monde que je remercié
Jamais assez leur aides, encouragement soutien pendant me années d'étude*

A mes très chers frères YAKOUB, DOHA, AHMED, OUSSAMA

Ainsi qu'à toute la famille RACHED

A mes chers amis, pour leurs aides et supports dans les moments difficiles

Et à mes amies qui a m'ont partagé le chemin du savoir

ABDEL MUHAYMIN, MOHAMED, ACHRAF

*A toute la promotion GP2025 A tout personne qui a un sentiment d'amour et
de respect envers moi, je vous dis « MERCI »*

ABDERRAFIK



DÉDICACE



*À ma mère et mon père,
Merci pour votre amour, vos sacrifices et votre présence constante.
Que Dieu vous protège, et qu'Il accorde la guérison à mon cher papa.*

*À mon frère et ma sœur,
Merci pour votre soutien et votre affection. Vous êtes mon pilier.*

*À ma chère tante maternelle (ma tante / ma khala),
Merci pour ta tendresse, ton écoute et ta bienveillance.
Tu es une deuxième mère pour moi, et ta présence m'apaise.*

*À ma chère tante paternelle (ma tante / ma amma),
Merci pour ton amour discret, ton soutien sincère et tes prières silencieuses.
Ta force douce m'inspire et m'accompagne.*

*À mes amis,
Merci pour votre sincérité, votre fidélité et vos sourires qui rendent notre
vie plus belle.*

Mohamed Ouassim

Sommaire

Remerciements	
Dédicaces	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Résumé	
Introduction générale	
Partie 1. Partie bibliographique	
Chapitre I : La Pollution Environnementale (Notamment de L'eau) et Les Technique de Traitement	
I. 1. La pollution de l'environnement.....	3
I. 1.1. Types de Pollution Environnementale	3
I. 1.2. Causes de la pollution environnementale	4
I. 1.3. Conséquences de la pollution environnementale	4
I. 1.4. Stratégies de prévention et de contrôle de la pollution	4
I. 2. La pollution de l'eau.....	5
I. 2.1. Sources de pollution de l'eau	5
I. 2.2. Aperçu sur les métaux lourds et du cuivre	6
I. 2.2.1. Généralités sur les métaux lourds	7
I. 2.2.2. Le cuivre (Cu) : Entre essentialité et toxicité	7
I. 2.2.3. Réglementation et limites d'exposition	8
I. 2.3. Conséquences de la pollution de l'eau.....	8
I. 2.4. Gestion et contrôle de la pollution de l'eau.....	8
I. 3. Les techniques de traitement des eaux polluées.....	9
I. 3.1. Méthodes de traitement physiques	9

I. 3.2. Méthodes de traitement chimiques.....	10
I. 3.3. Méthodes de traitement biologiques	10
I. 3.4. Technologies membranaires	11
I. 3.5. Procédés d'oxydation avancés (POA).....	11
I. 3.6. Biofiltration.....	11
I. 3.7. Critères de choix des méthodes de traitement.....	11

Chapitre II : Intégration du Biochar dans les Systèmes de Biofiltration

(Filtres à charbon)

II. 1. La Biofiltration	13
II. 1.1. Principes fondamentaux de la biofiltration.....	13
II. 1.2. Types de biofiltration.....	14
II. 1.3. Applications de la biofiltration	14
II. 1.4. Limites de la biofiltration	15
II. 1.5. La Biofiltration à base du charbon (Les filtres à charbon).....	16
II. 1.5.1. Avantages des filtres à charbon.....	16
II. 1.5.2. Challenges et considérations	16
II. 2. Le biochar dans le domaine du traitement des eaux usées.....	17
II. 2.1. L'origine de Biochar.....	18
II. 2.1.1. Origine et volumes de production du résidu de café.....	18
II. 2.2. Techniques d'élimination des polluants	19
II. 2.3. Applications du biochar	19
II. 2.4. Types de biochar utilisés pour le traitement de l'eau	19
II. 2.5. Avantages de l'utilisation du biochar dans le traitement de l'eau	20
II. 2.6. Défis et perspectives d'avenir	20
II.3. L'Adsorption des métaux lourds	21
II.3.1. Mécanismes d'Adsorption des Métaux Lourds.....	21
II.3.2. Adsorbants pour l'Élimination des Métaux Lourds.....	23
II.3.3. Facteurs influençant l'adsorption des métaux lourds.....	23
II.3.4. Applications et orientations futures	24

Partie II. Expérimental et Application

Chapitre III : Matériel, Méthodes et Interprétations Des Résultats

III.1. Introduction.....	25
III.2. Matériels, produits et méthodes avec interprétation des résultats	25
III.2.1 Matériels	25
III.2.2 Réactifs utilisés	25
III.2.3 Méthodes avec interprétations des résultats.....	25
III.2.3.1 Préparation de l'adsorbant (biochar).....	25
III.2.3.1.1 Définition du café	25
III.2.3.1.2 Les étapes de préparation de biochar.....	26
III.2.3.1.2.a Le Lavage (prétraitement)	27
III.2.3.1.2.b Le séchage	28
III.2.3.1.2.c Carbonisation.....	28
III.2.3.1.2.d Le Tamisage.....	29
III.2.3.2 Caractérisation du Biochar	30
III.2.3.2.1 La Calorimétrie Différentielle à Balayage (DSC).....	30
III.2.3.2.2 pH de point de charge zéro	31
III.2.3.2.3 La spectrométrie infrarouge	32
III.2.3.2.4 La Microscopie Électronique à Balayage (MEB).....	34
III.2.3.2.5 La diffraction des rayons X (DRX).....	36
III.2.3.3 Élimination des ions du cuivre par adsorption sur le biochar.....	37
III.2.3.3.1 Adsorption en mode batch (La cinétique d'adsorption).....	38
III.2.3.3.1.1. Influence des paramètres opératoires.....	40
III.2.3.3.1.2. Modélisation de la cinétique d'adsorption	41
III.2.3.3.1.3 Modélisation des isothermes d'adsorption	43
III.3. Conclusion.....	46

Chapitre IV : Application d'un biochar fonctionnalisé dans un système de biofiltration

IV.1. Introduction	48
IV.2. Matériaux et équipements utilisés	48
IV.3. Innovation et Technologie (conception des deux bio filtre).....	49
IV.3.1. Bio filtre à Biochar Fonctionnalisé (Prototype 1).....	49
IV.3.2. Bio filtre de Référence (Prototype 2)	50
IV.4. Procédure expérimentale	50
IV.5. Résultats et discussions	51
IV.6. Conclusion.....	55
Conclusion générale	57
Références bibliographiques	59
Annexes	

Liste des figures

Figure II.1: Mécanismes d'élimination des métaux.....	22
Figure III.1 : les grains du café et la poudre du café.....	26
Figure III.2 : le prétraitement de marc du café par soxhlet	27
Figure III.3 : Séchage de l'échantillon dans une étuve	28
Figure III.4 : la carbonisation et le lavage de l'adsorbant	29
Figure III.5 : Tamisage de l'adsorbant	29
Figure III.6 : Calorimètre Différentielle à Balayage (DSC) (CRAPC)	30
Figure III.7 : Courbe de flux de chaleur en fonction de température (DSC).....	30
Figure III.8 : Essais de détermination de pH point de zéro charge	31
Figure III.9 : La courbe de pH Zero charge.....	32
Figure III.10: Spectromètre Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR/ATR-DRIFT).....	33
Figure III.11: Le spectre FTIR du Biochar avant et après adsorption du Cu (II)	33
Figure III.12: Un microscope électronique à balayage (CRAPC)	35
Figure III.13: L'analyse MEB du biochar BCR	35
Figure III.14: Diffractomètre à rayon X (CRAPC).....	37
Figure III.15: Les spectre DRX de BRC (a) avant et (b) après adsorption du Cu(II).....	37
Figure III.16: La courbe d'étalonnage.....	39
Figure III.17: Effet de temps de contact sur le Rendement	39
d'élimination du cuivre (II) par le Biochar (BRC)	
Figure III.18: Influence de la concentration du cuivre (II) par le Biochar (BRC)	40
Figure III.19: Influence de dose du biochar sur le rendement d'élimination du Cu(II).....	41
Figure III.20: Le Model Cinétique de pseudo premier ordre.....	42
Figure III.21: Le Model Cinétique de pseudo deuxième ordre.....	43
Figure III.22: Linéarisation du modèle de Langmuir d'élimination du Cu(II) par BRC.....	45
Figure III.23: Linéarisation du modèle de freundlish d'élimination du Cu(II) par BRC	45
Figure IV.1: Montage des deux prototypes	51
Figure III.2: (a) l'eau usée de STEP, (b) l'eau traite par STEP,	52
l'eau filtrée par biochar et l'eau filtrée par charbon actif par ordre de gauche à droite	

Liste des tableaux

Tableau III.1: les principaux groupes fonctionnels caractérisant.....	34
le biochar avant et après adsorption.	
Tableau III.2: Résultats d'analyse morphologique du BCR avant et après adsorption.....	35
Tableau IV.1: Comparaison des paramètres physicochimique	52
des différentes eaux avec les normes	
Tableau IV.2: Comparaison des paramètres physicochimiques	54
des différentes eaux avec les normes	

الملخص

يركز هذا العمل على مشكلة التلوث البيئي، خاصة تلوث المياه، وتقنيات المعالجة المرتبطة به، مع تسليط الضوء على الاستخدام المبتكر للفحم الحيوي في أنظمة البيوفiltration. التلوث البيئي الناتج أساساً عن الأنشطة البشرية يشكل تهديداً كبيراً للصحة والبيئة. تتضمن معالجة المياه الملوثة تقنيات فيزيائية وكيميائية وبيولوجية متقدمة، وتبرز البيوفiltration كحل مستدام وفعال. الفحم الحيوي، المستخرج من الكتلة الحيوية مثل مخلفات القهوة، يُعتبر بديلاً اقتصادياً للفحم النشط، بفضل قدرته العالية على الامتصاص، كما يمكن تحسين أدائه من خلال التنشيط الكيميائي للفحم الحيوي.

باستخدام عامل تنشيط أو طريقة أخرى كالتنشيط الفيزيائي بأكسنة المادة الحيوية عند درجات حرارة معينة. وهذا ما قمنا به في هذه الدراسة عند درجة 400° مئوية، ثم قمنا بتحليل DMC, FTIR, MEB, DRX للتأكد من فعاليتها ومن ثم تطبيقها في المخبر كمزيل لأيونات النحاس الثنائي كدراسة معقدة وأولية.

ثم بعد ذلك تم محاولة ابتكار نظام مكون من مرشحين حيويين، أحدهما يركز على الفحم الحيوي المصنع من بقايا القهوة والآخر كمرجع للمقارنة يركز في تركيبته على الفحم المنشط الصناعي، إذ تم تطبيق مياه مستعملة على هذا النظام وأعطى نتائج جيدة خاصة في إزالة أيونات الفوسفات وأخيراً يمكننا اعتبار الفحم المحضر من بقايا القهوة قد قدم حلاً بديلاً ذات فعالية بأقل تكلفة وصديقة للبيئة لمعالجة المياه بطريقة مستدامة.

الكلمات المفتاحية: الفحم الحيوي، بقايا القهوة، أيونات النحاس، الترشيع الحيوي، الابتكار، التحاليل الفيزيوكيميائية.

Résumé

Ce travail se concentre sur le problème de la pollution environnementale, en particulier la pollution de l'eau, et les techniques de traitement associées, tout en mettant en lumière l'utilisation innovante du biochar dans les systèmes de biofiltration. La pollution environnementale, principalement causée par les activités humaines, constitue une menace majeure pour la santé et l'environnement. Le traitement des eaux polluées implique des techniques physiques, chimiques et biologiques avancées, et la biofiltration se distingue comme une solution durable et efficace. Le biochar, produit à partir de biomasse comme les déchets de café, est considéré comme une alternative économique au charbon actif, grâce à sa forte capacité d'adsorption. Ses performances peuvent être améliorées par activation chimique (en utilisant un agent activant) ou physique (par calcination de la biomasse à des températures spécifiques). C'est ce que nous avons réalisé dans cette étude à 400°C, puis nous avons effectué des analyses (DMC, FTIR, MEB, DRX) pour vérifier son efficacité avant de l'appliquer en laboratoire comme adsorbant d'ions cuivriques (Cu^{2+}) dans une étude approfondie et préliminaire.

Par la suite, nous avons conçu un système innovant composé de deux biofiltres : l'un basé sur du biochar fabriqué à partir de résidus de café et l'autre, utilisé comme référence, contenant du charbon actif industriel. En appliquant des eaux usées à ce système, des résultats prometteurs ont été obtenus, notamment pour l'élimination des ions phosphates. En conclusion, le biochar préparé à partir de déchets de café offre une solution alternative efficace, peu coûteuse et écologique pour un traitement durable de l'eau.

Mot clés : Biochar, Marcs du café, Cuivre(II), Biofiltration, Innovation, Analyse physicochimiques

Abstract :

This work focuses on the issue of environmental pollution, particularly water pollution, and the associated treatment techniques, while highlighting the innovative use of biochar in biofiltration systems. Environmental pollution, primarily caused by human activities, poses a significant threat to health and the ecosystem. Treating polluted water involves advanced physical, chemical, and biological techniques, with biofiltration emerging as a sustainable and effective solution. Biochar, derived from biomass such as coffee waste, is considered an economical alternative to activated carbon due to its high adsorption capacity. Its performance can be enhanced through chemical activation (using an activating agent) or physical methods (such as biomass calcination at specific temperatures). In this study, we produced biochar at 400°C and conducted analyses (DMC, FTIR, SEM, XRD) to confirm its effectiveness before applying it in the laboratory as an adsorbent for copper ions (Cu^{2+}) in an in-depth preliminary study.

Subsequently, we designed an innovative system consisting of two biofilters: one based on biochar made from coffee residues and the other, used as a reference, containing industrial activated carbon. When wastewater was applied to this system, promising results were obtained, particularly in removing phosphate ions. In conclusion, the biochar prepared from coffee waste offers an effective, low-cost, and eco-friendly alternative for sustainable water treatment.

Keywords : Biochar, Coffee grounds, Copper(II), Biofiltration, Innovation, Physicochemical analysis

Introduction

Générale

La pollution de l'environnement représente l'un des défis majeurs du XXI^e siècle, impactant la santé humaine, les écosystèmes et l'économie mondiale (*Jihong, 2024 ; Tripathi & Pal, 2017*). Parmi les différentes formes de pollution, celle de l'eau est particulièrement préoccupante en raison de ses effets directs sur les ressources hydriques, la sécurité alimentaire et la biodiversité aquatique (*Yadav, 2024 ; Bochynska et al., 2024*). Les principales sources de contamination incluent les effluents industriels, agricoles et domestiques, qui libèrent des substances toxiques telles que les métaux lourds, les composés organiques et les nutriments excédentaires (*Vo et al., 2023 ; Arroyo-Ortega et al., 2024*).

Face à cette crise, de nombreuses technologies de traitement de l'eau ont été développées pour restaurer la qualité des milieux aquatiques. Les méthodes conventionnelles, telles que la sédimentation, la filtration, la coagulation-floculation et l'adsorption sur charbon actif, sont couramment utilisées (*Mutegoa, 2024 ; Joseph et al., 2023*). Le charbon actif, un matériau hautement poreux, est efficace pour éliminer une large gamme de polluants (*Sarathchandran et al., 2021 ; Tan et al., 2017*). Cependant, son coût élevé et son impact environnemental ont suscité l'intérêt pour des alternatives plus durables.

Parmi ces alternatives, Des études récentes soulignent le potentiel du biochar comme alternative écologique aux adsorbants traditionnels dans la dépollution de l'eau (*Enaime et al., 2020 ; Kumari et al., 2023*). Produit par pyrolyse de biomasses résiduelles, le biochar a une grande surface spécifique, une porosité développée et une diversité de groupes fonctionnels de surface (*Présiga-López et al., 2024 ; Barquilha & Braga, 2021*). Ces caractéristiques lui confèrent une bonne capacité d'adsorption des métaux lourds, des colorants, des nutriments et des microplastiques (*Meiyao et al., 2024*). De plus, sa production à partir de déchets organiques contribue à une gestion durable des ressources et à une économie circulaire (*Gupta & Gupta, 2022*).

En parallèle, la biofiltration est une technologie biologique qui exploite les capacités métaboliques des micro-organismes fixés sur un support (comme le sable, le charbon ou le gravier) pour dégrader les contaminants présents dans l'eau. Cette méthode est particulièrement adaptée aux zones rurales ou aux pays en développement grâce à sa simplicité, son faible coût et son efficacité pour traiter une large gamme de polluants,

y compris les nutriments, les pathogènes et les composés organiques (*Zhang et al., 2019*).

L'intégration de matériaux comme le biochar dans les biofiltres permet de combiner les avantages de l'adsorption chimique et de la biodégradation microbienne, améliorant ainsi les performances globales de traitement (*Lu et al., 2022 ; Liang et al., 2007*). Cette synergie ouvre la voie à des solutions innovantes, écologiques et peu coûteuses pour la remédiation des eaux polluées. Ces stratégies, offrent des perspectives pour un traitement efficace, durable et accessible des effluents aqueux.

Avec 2 milliards de personnes exposées à une eau polluée (OMS, 2023), notre startup développe des biofiltres combinant biochar et microbiomes pour une dépollution efficace et 30 - 40% moins chère, par utilisation de deux biofiltres dans une étude comparative à base d'un biochar pyrolysé (500°C) + nano-argent (..... nm), issu de déchets alimentaires, testé en labo contre le charbon actif commercial performant.

Cette étude présente quatre chapitres avec l'introduction et la conclusion générale ; Chapitre I présentera une généralité sur la pollution environnementale (notamment de l'eau) ainsi qu'une aperçue sur les techniques de traitement.

Chapitre II donnera un rapport détaillé sur l'intégration du biochar dans les systèmes de biofiltration (Filtres à charbon).

Chapitre III montrera une étude expérimentale ainsi que la discussion des différents résultats.

Chapitre IV consacré pour appliquer le Biochar déjà préparé et analyser dans les parties précédentes dans un système de biofiltration.

Partie

Bibliographique

Chapitre I :

*La Pollution Environnementale
(Notamment de L'eau) et Les
Technique de Traitement*

I.1. La pollution de l'environnement

La pollution de l'environnement représente un problème mondial en constante augmentation, impactant tant les écosystèmes que la santé humaine (*Jihong, 2024*). Elle se définit comme l'introduction de substances polluantes dans le milieu naturel, ce qui entraîne des conséquences néfastes. Cette pollution se manifeste sous diverses formes, chacune ayant ses propres sources, effets et solutions potentielles (*Harvey, 1973*).

I.1.1 Types de Pollution Environnementale

Plusieurs études classent généralement la pollution environnementale en types principaux :

Pollution de l'air : Cette pollution résulte de l'émission de particules et de gaz nocifs dans l'atmosphère. Les principales sources incluent les émissions des véhicules, les activités industrielles et la combustion de combustibles fossiles. La pollution de l'air est liée à divers problèmes de santé, tels que les troubles respiratoires, les maladies cardiovasculaires et même certains cancers (*OECD, 2021*).

Pollution de l'eau : Ce type de pollution se produit lorsque des substances dangereuses contaminent les masses d'eau, comme les rivières, les lacs et les océans. Les sources incluent les eaux usées industrielles, le ruissellement agricole et les déversements d'hydrocarbures. La pollution de l'eau peut nuire à la vie aquatique et rendre l'eau impropre à la consommation (*Huang et al., 2019*).

Pollution du sol : Elle résulte de l'accumulation de contaminants dans le sol, tels que les métaux lourds, les pesticides et les déchets industriels. La pollution du sol peut affecter la croissance des plantes, contaminer les sources d'eau souterraine et présenter des risques pour la santé humaine (*Mehmood et al., 2021*).

Pollution sonore : Ce type de pollution se caractérise par des niveaux de bruit excessifs pouvant nuire à la santé humaine et à la faune. Les sources de pollution sonore comprennent la circulation, les activités industrielles et les chantiers de construction (*Bogdanović et al., 2018*).

Pollution lumineuse : La pollution lumineuse est définie comme un éclairage artificiel excessif ou mal orienté, perturbant les écosystèmes naturels, affectant les rythmes biologiques et masquant la visibilité du ciel nocturne (*Gao et al., 2024*).

Pollution thermique : Ce type de pollution concerne le rejet de chaleur excessive dans les plans d'eau, ce qui peut nuire à la vie aquatique en réduisant les niveaux d'oxygène dissous et en modifiant les températures de l'eau.

Pollution radioactive : Elle est causée par la présence de matériaux radioactifs dans l'environnement, souvent en raison d'accidents nucléaires, d'essais d'armes ou d'une élimination inappropriée des déchets radioactifs.

I.1.2 Causes de la pollution environnementale

La pollution environnementale est largement attribuée aux activités humaines. La rapide urbanisation, l'industrialisation croissante et la surconsommation des ressources naturelles ont conduit à une élévation des niveaux de pollution. De plus, les pratiques agricoles non durables, une gestion des déchets inappropriée et une forte dépendance aux combustibles fossiles jouent également un rôle significatif dans cette problématique (*Mukherjee et al., 2023*).

I.1.3 Conséquences de la pollution environnementale

La pollution environnementale a des conséquences majeures sur la santé humaine, les écosystèmes et l'économie. Elle peut causer divers problèmes de santé, y compris des maladies respiratoires, des cancers et des troubles neurologiques. De plus, la pollution nuit à la biodiversité, dégrade les ressources naturelles et contribue au changement climatique. Par ailleurs, ses effets socio-économiques peuvent être particulièrement sévères pour les communautés à faible revenu (*Ring et al., 2001*).

I.1.4 Stratégies de prévention et de contrôle de la pollution :

Il existe plusieurs stratégies pour prévenir et contrôler la pollution environnementale (*Shareefdeen et al., 2022*). Celles-ci comprennent :

Réduction à la source : Minimiser la production de polluants par le biais de processus de fabrication plus propres, de technologies plus efficaces et de pratiques durables.

Recyclage et réutilisation : Diminuer les déchets en recyclant les matériaux et en réutilisant les produits.

Traitement de la pollution : Éliminer ou neutraliser les polluants avant leur rejet dans l'environnement.

Réglementation et application de la loi : Mettre en œuvre des lois et des réglementations pour limiter les émissions de polluants et tenir les pollueurs responsables.

Éducation et sensibilisation : Informer le public sur les enjeux de la pollution et promouvoir des comportements respectueux de l'environnement.

Finance verte : Utiliser des instruments financiers pour soutenir des projets et des initiatives qui réduisent la pollution et favorisent le développement durable.

Enfin, la lutte contre la pollution de l'environnement nécessite un effort mondial concerté impliquant les gouvernements, les entreprises et les citoyens. En adoptant des pratiques durables, en réduisant les émissions de polluants et en protégeant nos ressources naturelles, nous pouvons contribuer à créer un environnement plus propre et plus sain pour les générations futures ([Zhang et al., 2024](#)).

I.2. La pollution de l'eau

La pollution de l'eau constitue un défi mondial croissant qui met en péril les écosystèmes ainsi que la santé des êtres humains. Ce phénomène survient lorsque des substances nocives, telles que des produits chimiques, des déchets matériels ou des agents biologiques, sont introduites dans les eaux, que ce soit directement ou indirectement, sans un traitement approprié. Pour bien appréhender cette problématique, il est crucial d'examiner ses sources, ses impacts, ainsi que les stratégies de gestion qui sont mises en place ([Yadav., 2024](#)).

I.2.1 Sources de pollution de l'eau

Les sources de pollution de l'eau peuvent être classées en deux catégories principales : ponctuelles et non ponctuelles ([Bochynska et al., 2024](#)).

Sources ponctuelles : Ces sources proviennent d'emplacements discrets et identifiables, tels que les usines de traitement des eaux usées ou les déversements industriels.

Sources non ponctuelles : Ces sources sont diffuses et émanent de plusieurs endroits simultanément, comme le ruissellement agricole contenant des pesticides et des engrais, ou le ruissellement urbain.

Plusieurs secteurs contribuent de manière significative à la pollution de l'eau (*Vo et al., 2024 ; Jackson, 1994*) :

Industrie pharmaceutique : Elle rejette des déchets chimiques, des médicaments non utilisés et d'autres résidus pharmaceutiques dans les réseaux hydrographiques.

Industrie agroalimentaire : Les déchets générés par la production, la transformation et l'emballage des aliments, ainsi que le ruissellement des champs agricoles contenant des pesticides et des engrais, peuvent contaminer l'eau.

Industrie textile : Connue pour sa forte consommation d'eau, cette industrie pollue significativement, car les processus de teinture et de finition libèrent des produits chimiques nocifs, des métaux lourds et des colorants dans les masses d'eau.

Activités domestiques : Une élimination inadéquate des produits de nettoyage, des articles de soins personnels et des eaux usées peut également contribuer à la pollution de l'eau.

Déforestation : L'érosion des sols causée par la déforestation peut entraîner une sédimentation des voies navigables.

Marinas non gérées : Ces installations peuvent être une source de pollution, avec des carburants pour bateaux, des produits chimiques de nettoyage et des déchets qui pénètrent dans l'eau.

Exploitation minière : Le drainage minier acide peut libérer des métaux lourds dans les masses d'eau.

I.2.2 Aperçu sur les métaux lourds et du cuivre

Les métaux lourds sont des éléments métalliques naturels définis par leur densité élevée et leur toxicité potentielle, même à des faibles concentrations. Parmi eux, le **cuivre (Cu)** est un oligo-élément essentiel, mais il peut devenir toxique à fortes doses.

I.2.2.1 Généralités sur les métaux lourds

a. Définition et classification

Les métaux lourds sont généralement caractérisés par leur masse volumique élevée (supérieure à 5 g/cm³). Ils comprennent :

- ✓ **Éléments essentiels** : Cuivre (Cu), Fer (Fe), Zinc (Zn) nécessaires en faibles quantités.
- ✓ **Éléments toxiques** : Cadmium (Cd), Mercure (Hg), Plomb (Pb) nocifs même à faibles doses.

b. Sources d'exposition

- ✓ **Naturelles** : éruptions volcaniques, Érosion des roches.
- ✓ **Anthropiques** : batteries, Industries minières, pesticides, eaux contaminées.

c. Impacts sur la santé

- ✓ **Cancérogénicité** (Cd, As)
- ✓ **Perturbation endocrinienne**
- ✓ **Neurotoxicité** (Pb, Hg) (*Tchounwou., 2012*).

I.2.2.2 Le cuivre (Cu) : Entre essentialité et toxicité

d. Fonction biologique

- Cofacteur d'enzymes (superoxyde dismutase), cytochrome c oxydase,).
- Essentiel à la synthèse de l'hémoglobine et au bon fonctionnement du système immunitaire.

e. Sources d'exposition

- **Alimentation** : Fruits de mer, noix, céréales.
- **Eau potable** (canalisations en cuivre).
- **Activités industrielles** (mines, électronique).

f. Toxicité du cuivre

- **Excès** (dose toxique > 10 mg/jour), maladie de Wilson (accumulation hépatique).
- **Symptômes** : Nausées, diarrhées, lésions rénales et hépatiques (*Barceloux., 1999, European Food Safety Authority., 2015*)

I.2.2.3 Réglementation et limites d'exposition

- **Organisation mondiale de la santé (OMS)** : Limite de 2 mg/L dans l'eau potable.
- **Union Européenne (UE)** : Dose journalière tolérable (DJT) de 0,07 mg/kg de poids corporel ([World Health Organisation., 2004](#))

I.2.3 Conséquences de la pollution de l'eau

a. Risques pour la santé humaine : L'exposition à l'eau polluée peut provoquer de nombreuses maladies, notamment la diarrhée, la typhoïde, la dysenterie, la gastro-entérite et l'hépatite. Les personnes âgées sont particulièrement sensibles aux effets néfastes de cette pollution, qui peut causer des changements hormonaux, accélérer le vieillissement et favoriser l'apparition prématurée de problèmes de santé liés à l'âge. De plus, certains polluants chimiques ont la capacité de perturber l'équilibre hormonal en bloquant, imitant ou altérant les fonctions homéostatiques du corps humain ([Bochynska et al., 2024](#)).

b. Impacts environnementaux : La pollution de l'eau peut engendrer l'eutrophisation, diminuer la clarté de l'eau et détruire les habitats aquatiques. Les métaux lourds et autres contaminants peuvent s'accumuler dans les organismes aquatiques, entraînant ainsi une bioaccumulation et perturbant la biodiversité dans les écosystèmes aquatiques ([Sharma et al., 2024](#)).

I.2.4 Gestion et contrôle de la pollution de l'eau

La gestion de la pollution de l'eau nécessite une approche multidimensionnelle comprenant :

a. Traitement des eaux usées : Il est crucial d'implémenter des technologies de traitement des eaux usées efficaces pour éliminer les contaminants avant de rejeter ces eaux dans l'environnement ([Wang et al., 2023](#))

b. Gestion des déchets solides : Une gestion adéquate des déchets solides est essentielle pour empêcher l'infiltration des polluants dans les cours d'eau.

c. Atténuation des sources non ponctuelles : L'adoption de pratiques agricoles durables, la réduction du ruissellement urbain et une gestion appropriée des déchets

d'élevage peuvent contribuer à réduire la pollution provenant de sources non ponctuelles.

d. Surveillance de la qualité de l'eau : Une surveillance régulière de la qualité de l'eau est nécessaire pour identifier les sources de pollution et évaluer l'efficacité des mesures de contrôle.

e. Cadre juridique : L'application efficace des lois et règlements environnementaux est essentielle pour dissuader les pollueurs et protéger nos ressources en eau.

f. Sensibilisation du public : Accroître la sensibilisation du public sur l'importance de la conservation de l'eau et les impacts de la pollution peut encourager des comportements responsables et soutenir les efforts de protection de l'environnement.

La pollution de l'eau est un problème complexe et multifacette qui requiert des efforts concertés des gouvernements, des industries et des citoyens. En comprenant les sources, les conséquences et les stratégies de gestion de la pollution de l'eau, nous pouvons travailler à la protection de nos précieuses ressources en eau et garantir un avenir durable pour tous (*Zhu et al., 2020*).

I.3. Les techniques de traitement des eaux polluées

Les techniques de traitement des eaux polluées ont pour but d'éliminer les contaminants présents dans les eaux usées afin de les rendre propres et sûres pour l'environnement ainsi que pour la santé humaine (*Joseph et al., 2023*). Ces méthodes sont d'une importance capitale, surtout face à la croissance démographique mondiale, à l'urbanisation rapide et aux activités industrielles, qui exercent une pression accrue sur les ressources en eau (*Mutegoa., 2024 ; Abdelwahed., 2020; Das et al., 2022*).

Voici un aperçu des techniques de traitement des eaux polluées, englobant à la fois les méthodes traditionnelles et les approches innovantes :

I.3.1 Méthodes de traitement physiques

a. Sédimentation : Cette méthode repose sur la force de la gravité pour séparer les particules solides présentes dans l'eau. Les particules plus lourdes se déposent au fond du réservoir, ce qui permet de recueillir un liquide clarifié (*Mutegoa, 2024*).

b.Filtration : Ce processus consiste à faire passer l'eau à travers un milieu poreux tel que du sable, du gravier ou des membranes. Cela permet d'éliminer les particules solides en suspension, les débris ainsi que certains micro-organismes (*Mutegoa, 2024*).

I.3.2 Méthodes de traitement chimiques

a.Floculation et Coagulation : Des produits chimiques sont ajoutés à l'eau pour agglomérer les petites particules en floccs plus grands, facilitant ainsi leur séparation par sédimentation ou filtration.

b.Désinfection : Cette étape a pour but d'inactiver ou de tuer les micro-organismes pathogènes présents dans l'eau. Les désinfectants couramment utilisés incluent le chlore, l'ozone et le rayonnement ultraviolet.

c.Précipitation chimique : Des produits chimiques sont ajoutés pour former des solides insolubles qui peuvent ensuite être éliminés par sédimentation ou filtration (*Mutegoa., 2024*). Par exemple, la chaux peut précipiter le calcium et le magnésium afin de réduire la dureté de l'eau.

d.Adsorption : Des molécules ou des ions se fixent à la surface d'un matériau adsorbant solide. Le charbon actif est fréquemment utilisé pour éliminer les composés organiques, les odeurs et certains métaux lourds.

e.Échange d'ions : Dans cette méthode, les ions présents dans l'eau sont échangés contre d'autres ions fixés sur une résine échangeuse d'ions. Cela permet d'adoucir l'eau en remplaçant les ions calcium et magnésium par des ions sodium (*Song et al., 2024*).

I.3.3 Méthodes de traitement biologiques

a.Traitement aérobie : Des micro-organismes consommateurs d'oxygène décomposent la matière organique en dioxyde de carbone, en eau et en nouvelle biomasse cellulaire

b.Traitement anaérobie : En l'absence d'oxygène, des micro-organismes décomposent la matière organique en biogaz, comprenant le méthane et le dioxyde de carbone

c.Procédé à boues activées : Une suspension de micro-organismes est utilisée pour traiter les eaux usées. Ces micro-organismes consomment la matière organique, et l'eau traitée est ensuite séparée des boues par sédimentation (*Mutegoa., 2024*).

I.3.4 Technologies membranaires

Microfiltration, Ultrafiltration, Nanofiltration et Osmose Inverse : Ces technologies exploitent des membranes pour séparer les contaminants selon leur taille, leur charge ou d'autres propriétés physiques (Joseph et al., 2023 ; Song et al., 2024). L'osmose inverse se distingue par son efficacité à éliminer les sels dissous ainsi que divers composés organiques.

I.3.5 Procédés d'oxydation avancés (POA)

Ozonation, Photocatalyse, et Procédés Fenton : Ces méthodes exploitent des oxydants puissants pour dégrader les polluants organiques réfractaires (Song et al., 2024). Par exemple, la photocatalyse utilise des catalyseurs activés par la lumière pour oxyder les contaminants.

I.3.6 Biofiltration

La biofiltration : C'est une technique qui intègre des méthodes physiques (filtration), chimiques (adsorption) et biologiques (micro-organismes). Ce procédé de traitement des eaux repose sur l'utilisation de micro-organismes pour dégrader et éliminer les polluants présents dans l'eau (Dwivedi & Dwivedi, 2022). Il s'agit d'une méthode de traitement biologique où les polluants sont éliminés par une séparation physique, une adsorption sur le milieu filtrant, ainsi qu'une biodégradation ou biotransformation réalisée par les microbes qui forment un biofilm sur ce milieu (Sinha & Mukherji, 2022).

I.3.7 Critères de choix des méthodes de traitement

Comme démontré par (Tripathi & Pal, 2017). Le choix d'une méthode de traitement des eaux polluées dépend de plusieurs critères essentiels qui permettent de garantir une solution adaptée et durable. Parmi ces critères, on distingue :

1. **L'efficacité** : Capacité à éliminer les polluants cibles (métaux lourds, colorants, composés organiques, colorants, etc.), mesurée par des indicateurs comme le taux d'adsorption ou la réduction de la DCO (demande chimique en oxygène) conformément aux protocoles OMS (2021).
2. **Le coût** : est souvent un facteur décisif, inclut les dépenses d'investissement (matériaux, installation) et opérationnelles (énergie, maintenance). Par titre

d'exemple, le charbon activé, bien qu'efficace, est coûteux, contrairement le biochar issu de déchets offre une alternative économique (charbon activé à 3-5€/kg vs biochar à 0.5-1.5€/kg selon *(Jagadeesh & Sundaram., 2023)*).

3. **La durabilité** : Impact environnemental de la méthode (émissions de CO₂, gestion des déchets). Les procédés biologiques comme la biofiltration sont souvent préférés pour leur faible empreinte écologique *(Yogalakshmi et al., 2022)*.
4. **La facilité de mise en œuvre** : Adaptabilité aux contextes ruraux ou industriels, et simplicité technologique (ex : filtres à sable vs membranes d'osmose inverse). *(Mutegoa., 2024)*.
5. **La polyvalence** : Capacité à traiter plusieurs types de polluants simultanément. Le biochar, par sa structure poreuse et ses groupes fonctionnels, permet par exemple d'adsorber à la fois des métaux et des molécules organiques *(Kumari et al., 2023)*.

D'autres critères comme la disponibilité locale des ressources et des compétences, peuvent aussi influencer le choix. Face à la diversité des polluants et des techniques de traitement, les technologies innovantes comme la biofiltration associée à des adsorbants durables tels que (biochar, charbon activé) émergent comme des solutions prometteuses.

Chapitre II :

Intégration du Biochar dans les Systèmes de Biofiltration (Filtres à charbon)

Le charbon activé est un adsorbant efficace, mais son coût élevé limite son utilisation. Ce chapitre explore comment le biochar, issu de la valorisation de déchets, peut compléter ou remplacer le charbon active dans les systèmes de biofiltration.

II.1. La Biofiltration

La Biofiltration est une technologie de traitement de l'eau qui se distingue par sa polyvalence, sa durabilité et son coût économique (*Dey & Das, 2022*). Elle représente une alternative intéressante aux méthodes de traitement conventionnelles, en particulier dans les zones rurales et les pays en développement. Ce processus biologique utilise de la biomasse fixée sur un support pour épurer divers contaminants, tels que la matière organique, les solides en suspension, la matière organique naturelle et les micropolluants organiques. La biofiltration gagne en popularité dans le traitement des eaux usées en raison de sa simplicité opérationnelle, de sa robustesse et de sa faible consommation d'énergie (*Yogalakshmi et al., 2022*).

II.1.1 Principes fondamentaux de la biofiltration

Elle repose sur une combinaison d'actions physiques, chimiques et microbiennes. Les polluants sont d'abord séparés physiquement, puis adsorbés sur le matériau filtrant avant d'être dégradés par des micro-organismes (*Sinha & Mukherji, 2022*). Ces micro-organismes forment un biofilm sur le support filtrant et transforment les polluants en produits moins nocifs (*Shareefdeen et al., 2003*).

- **Support filtrant** : Un matériau granulaire est utilisé comme support pour la croissance des micro-organismes. Ce support peut être constitué de sable, de gravier, de billes de céramique ou d'autres matériaux inertes.
- **Biofilm** : Les micro-organismes, incluant des bactéries, champignons, algues et protozoaires, forment un biofilm à la surface du support filtrant. Ce biofilm constitue une communauté complexe agissant en synergie pour décomposer les polluants.
- **Élimination des polluants** : L'eau à traiter traverse le filtre. Les polluants organiques et inorganiques sont adsorbés sur le biofilm et dégradés par les micro-organismes. Ces micro-organismes utilisent les polluants comme source

de nourriture, les transformant en produits moins nocifs tels que le dioxyde de carbone et l'eau. (Dwivedi & Dwivedi, 2022)

- **Facteurs influençant la biofiltration:** Plusieurs facteurs influencent l'efficacité de la biofiltration, notamment (Zhang et al., 2019):
 - La nature du support filtrant : taille des particules, porosité, surface spécifique ;
 - La composition et l'activité du biofilm ;
 - Les conditions environnementales : pH, température et oxygène dissous ;
 - La concentration et la nature des polluants ;
 - Le temps de contact entre l'eau et le biofilm.

II.1.2 Types de biofiltration:

Il existe plusieurs types de biofiltres, chacun étant conçu pour traiter différents types d'eaux et de polluants (Zhang et al., 2019):

a. Filtres à sable lents : Destinés au traitement de l'eau potable, ces filtres permettent d'éliminer les particules, les matières organiques et les pathogènes.

b. Filtres à sable rapides : Utilisés principalement pour le traitement des eaux usées, ils nécessitent un prétraitement afin d'éliminer les solides en suspension.

c. Biofiltres aérés : L'aération de ces filtres favorise la croissance des micro-organismes aérobies, ce qui améliore l'élimination des matières organiques.

d. Biofiltres anaérobies : Conçus pour la dénitrification, ces filtres favorisent la croissance des micro-organismes anaérobies qui transforment les nitrates en azote gazeux.

II.1.3 Applications de la biofiltration

a. Traitement de l'eau potable : La biofiltration est une méthode efficace pour éliminer les composés organiques dissous, contribuant ainsi à améliorer la qualité de l'eau potable. Cette technique réduit également le besoin en produits chimiques tout en améliorant le goût et l'odeur de l'eau (Bai et al., 2022; Basu et al., 2015).

b. Traitement des eaux usées : La biofiltration est utilisée pour décomposer les eaux usées, qu'elles soient domestiques ou industrielles (*Sinha & Mukherji, 2022; Dwivedi & Dwivedi, 2022*). Ce processus inclut l'élimination des matières organiques, des nutriments et des micropolluants (*Yogalakshmi et al., 2022*).

c. Traitement de l'air : La biofiltration joue un rôle clé dans l'élimination des composés organiques volatils (COV), des odeurs et d'autres polluants de l'air issus de sources industrielles et municipales. Par exemple, elle est utilisée pour traiter les émissions de méthane (*Shareefdeen et al., 2003*).

d. Traitement des eaux de ruissellement urbain : Les toits verts, qui constituent une forme de biofiltration, permettent d'atténuer le ruissellement des eaux pluviales et de réduire les risques d'inondations en milieu urbain (*Shareefdeen et al., 2003*).

e. Agriculture : Des biofiltres à l'échelle pilote sont développés pour traiter les eaux usées résiduelles de pesticides dans les vergers (*Shareefdeen et al., 2003*).

II.1.4 Limites de la biofiltration

1. Sensibilité aux conditions environnementales : La performance des biofiltres est influencée par divers facteurs de conception et de fonctionnement. Il est crucial de contrôler des paramètres clés tels que la température, l'humidité et le pH afin d'optimiser l'efficacité du biofiltre (*Wu et al., 2023*).

2. Accumulation de biomasse : Une prolifération excessive de biomasse peut provoquer le colmatage du filtre, ce qui diminue son efficacité (*Wu et al., 2023*).

3. Limitations liées aux polluants : Le traitement de certains polluants hydrophobes présente des défis. En outre, la biofiltration peut se montrer moins efficace pour les émissions diffuses de méthane à faible concentration par rapport aux traitements physico-chimiques (*Wu et al., 2023*).

4. Nécessité d'optimisation : Bien que la biofiltration ait prouvé son efficacité, elle nécessite des améliorations continues pour maximiser sa performance et élargir ses applications (*Wu et al., 2023*).

II.1.5 La Biofiltration à base du charbon (Les filtres à charbon)

L'utilisation du charbon comme matériau de support dans les filtres biologiques représente une stratégie qui tire parti des propriétés uniques du charbon pour améliorer l'efficacité du traitement des eaux usées et de la purification de l'air. Le charbon, en particulier sous forme de matériaux dérivés, fournit une surface étendue favorable à la croissance microbienne, ce qui contribue à la biodégradation des polluants (*Liang et al., 2007 ; Lu et al., 2022*).

II.1.5.1 Avantages des filtres à charbon

Surface Spécifique Élevée et Adsorption : Le charbon présente une structure poreuse, offrant une surface spécifique élevée qui favorise l'adsorption des polluants organiques et la colonisation microbienne (*Zheng et al., 2010*).

1. Rentabilité : Le charbon, notamment les sous-produits comme les cendres de charbon, constitue une alternative économique aux supports filtrants conventionnels. L'utilisation de matériaux peu coûteux permet de réduire les coûts globaux de traitement, un avantage considérable pour les applications en milieu rural ou dans les pays en développement (*Zheng et al., 2010*).

2. Élimination Efficace des Polluants : Les filtres à charbon ont prouvé leur efficacité dans l'élimination de divers polluants, tels que la demande chimique en oxygène (DCO), la demande biochimique en oxygène (DBO), les solides en suspension (MES) et la couleur des eaux usées. Ils sont également capables d'éliminer les composés organiques volatils (COV) des flux de gaz (*Zheng et al., 2010*).

3. Polyvalence : Les matériaux à base de charbon peuvent être adaptés à diverses applications de filtration biologique, incluant le traitement de l'eau potable, le traitement des eaux usées et la biofiltration des gaz. Cette polyvalence fait du charbon un support intéressant pour différents scénarios de traitement (*Wu et al., 2023*).

II.1.5.2 Challenges et considérations

1. Colmatage : L'accumulation de biomasse et de particules sur le support filtrant peut conduire au colmatage, ce qui réduit l'efficacité hydraulique du filtre (*Noh et al., 2020*). Pour atténuer ce problème, un rétrolavage et un entretien régulier sont essentiels.

2.Régénération du charbon : Le charbon granulaire (CAG) et le charbon actif en poudre (BAC) perdent progressivement leur capacité d'adsorption, nécessitant ainsi une régénération ou un remplacement (*Fundneider et al., 2021*). Les méthodes de régénération, telles que la régénération thermique, peuvent s'avérer coûteuses et énergivores.

3.Conditions environnementales : L'efficacité de la biofiltration peut être affectée par des facteurs comme le pH, la température et la disponibilité des nutriments (*Noh et al., 2020*). L'optimisation de ces conditions peut considérablement améliorer les performances du filtre.

4.Communité microbienne : La composition et l'activité de la communauté microbienne sur le support filtrant sont cruciales pour l'élimination des polluants (*Lu et al., 2022*). Une meilleure compréhension et gestion de cette communauté microbienne peuvent renforcer l'efficacité des filtres.

En conclusion, l'intégration du charbon comme matériau de support dans les filtres biologiques présente plusieurs avantages, notamment une large surface, une rentabilité accrue, et une efficacité dans l'élimination des polluants. Ces filtres biologiques sont de plus en plus reconnus comme des technologies durables et écologiques pour le traitement de l'eau et des eaux usées, ainsi que pour la biofiltration des gaz (*Sinha & Mukherji, 2022*). L'innovation continue et l'optimisation des matériaux et des procédés amélioreront encore leurs performances et élargiront leurs applications.

II.2. Le biochar dans le domaine du traitement des eaux usées

Le biochar représente une méthode à la fois économique et respectueuse de l'environnement pour le traitement des eaux usées. Ce matériau est un sous-produit résultant de la décomposition de la biomasse, et ses caractéristiques physico-chimiques varient selon son origine et la technique de combustion employée. Grâce à sa surface élevée, à sa structure comportant des macro et micropores, ainsi qu'à ses groupes fonctionnels, le biochar possède une capacité d'adsorption remarquable pour les composés toxiques présents dans les eaux usées contaminées (*Présiga-López et al., 2024*).

II.2.1 L'origine de Biochar

Il peut être produit à partir de divers matériaux carbonés, provenant de différentes origines, compositions et méthodes de transformation. Cela en fait un matériau prometteur et économique pour le traitement de l'eau et des eaux usées. Plusieurs types de biomasses peuvent servir de matières premières, y compris les déchets agricoles, les boues d'épuration et les déchets industriels ([Barquilha & Braga, 2021](#)), parmi eux, les déchets agro-alimentaire précisément les résidus ou Marcs de café (déchets solides résultant de l'infusion du café) sont particulièrement remarquables en raison de leur composition et de leurs diverses potentialités de valorisation.

II.2.1.1 Origine et volumes de production du résidu de café

a. Production mondiale : Environ 6 millions de tons par an de résidus de café (source : Organisation internationale du café).

b. Principales sources :

Appareils ménagers (cafetières, machines à expresso).

Industrie du café (torréfacteurs, cafés-restaurants).

c. Composition Chimique des Résidus de Café :

Les résidus de café contiennent une abondance de :

- Fibres (50-60%) (cellulose, hémicellulose, lignine).
- Protéines (10-15%) (acides aminés).
- Lipids (10-15%) (residual oils).
- Composés phénoliques (agents antioxydants).
- Minerals (potassium, magnesium, nitrogen ([Mussatto et al., 2011](#))).

d. Environnemental Impacts :

- **Enfouissement :** Risque de génération de méthane (gaz à effet de serre).
- **Rejet dans les eaux :** Élévation de la charge organique → pollution.

e. Valorisation des Marcs de Café :

- **Agriculture et Compostage**

- Engrais organique (abondant en azote et potassium).
- Substrat pour les champignons (par exemple, les pleurotes) (*Leifa et al., 2001*)

- **Extraction de Composés Bioactifs**

- Antioxydants (chlorogenic acids) → cosmetics, dietary supplements.
- Huiles essentielles → biocarburants, fragrances (*Bravo et al., 2013*)

- **Biofuels and Biogas**

- Biodiesel (oil extraction).
- Biogas (methanization) (*Kondamudi et al., 2008*)

- **Innovative Materials**

- Charbon actif (adsorption des contaminants).
- Biomaterials (biodegradable packaging) (*Ballesteros et al., 2014*)

II.2.2 Techniques d'élimination des polluants

Le mécanisme d'interaction au niveau moléculaire offre des informations cruciales à la communauté scientifique concernant le développement de nouveaux matériaux à base de biochar. L'efficacité de l'élimination des métaux toxiques et des polluants est influencée par divers facteurs, notamment la surface, la taille des pores, les groupes fonctionnels de surface, la taille des molécules à éliminer et les propriétés d'adsorption (*Kumari et al., 2023*).

II.2.3 Applications du biochar

Le biochar a gagné en popularité ces dernières années en tant qu'adsorbant alternatif et durable pour le traitement de l'eau, ce qui lui permet d'adsorber divers polluants. Il s'est révélé efficace pour éliminer les métaux lourds, les polluants organiques, les nutriments et les microplastiques des eaux usées (*Jagadeesh & Sundaram, 2023*).

II.2.4 Types de biochar utilisés pour le traitement de l'eau

Plusieurs types de biochar sont couramment appliqués dans le traitement de l'eau, notamment :

- a. **Biochar Activé** : Ce type de biochar présente une surface spécifique élevée et une capacité d'adsorption améliorée par rapport au biochar non modifié ([Zhang et al., 2023](#)).
- b. **Biochar Magnétique** : Modifié avec des particules magnétiques, le biochar magnétique facilite sa séparation de l'eau après utilisation ([Zhang et al., 2023](#)).
- c. **Biochar Modifié Chimiquement** : Le biochar peut subir des modifications chimiques pour renforcer sa capacité d'adsorption de contaminants spécifiques ([Zhang et al., 2023](#)).

II.2.5 Avantages de l'utilisation du biochar dans le traitement de l'eau

L'utilisation du biochar pour le traitement de l'eau offre plusieurs avantages, comme le soulignent :

- 1- **Coût abordable** : Le biochar est un matériau peu coûteux et facilement accessible. Source de production variée : Il peut être fabriqué à partir de divers déchets biomasse ([Jagadeesh & Sundaram., 2023](#)).
- 2- **Efficacité** : Il est performant pour éliminer une large gamme de contaminants. Amélioration possible : Sa performance peut être optimisée par des modifications ([Kumari et al., 2023](#)).
- 3- **Économie circulaire** : Il favorise la conversion des déchets en ressources, renforçant ainsi une économie circulaire ([Gupta & Gupta., 2022](#)).
- 4- **Durabilité environnementale** : Le biochar est respectueux de l'environnement ([Yogalakshmi et al., 2022](#)).

II.2.6 Défis et perspectives d'avenir

Malgré ses avantages potentiels, le Biocar (BC) présente certains défis à surmonter pour une utilisation plus large dans le traitement de l'eau :

- a. **Hétérogénéité** : Les propriétés du BC peuvent varier considérablement selon la matière première, les conditions de pyrolyse et les méthodes de modification. Cette variabilité complique l'optimisation de ses performances d'adsorption.

- b. Désintégration :** Dans les conditions hydrauliques du traitement de l'eau en lit fixe, le BC peut se désintégrer. Cela peut entraîner le co-transport de contaminants dangereux avec les fines particules érodées.
- c. Régénération :** La régénération du BC usé est cruciale pour réduire les coûts et les impacts environnementaux. Il est nécessaire de développer des méthodes de régénération efficaces.

II.3. L'Adsorption des métaux lourds

L'adsorption est un procédé largement étudié en Algérie, adressant divers enjeux environnementaux, notamment la qualité de l'eau et la dépollution des sols. Plusieurs recherches mettent en lumière l'utilisation de matériaux locaux, souvent modifiés, afin d'améliorer leur capacité d'adsorption ([Soudani et al., 2024](#)).

Cette méthode se révèle efficace et polyvalente pour l'élimination des métaux lourds dans les environnements contaminés. La sélection d'un adsorbant approprié, ainsi que l'optimisation des paramètres d'adsorption, sont cruciales pour atteindre des performances d'élimination élevées. Les efforts de recherche continuent de se concentrer sur l'amélioration des adsorbants et des procédés d'adsorption, visant une remédiation durable et rentable des métaux lourds ([Soudani et al., 2022](#)).

Les métaux lourds, issus de diverses activités industrielles, agricoles et domestiques, représentent une menace sérieuse pour la santé humaine et l'environnement. En tant que technique de remédiation, l'adsorption offre une approche polyvalente, rentable et efficace pour réduire les concentrations de métaux à des niveaux acceptables. Ce processus implique le transfert d'une molécule d'une phase fluide vers une surface solide ([Iyer et al., 2024](#)).

II.3.1. Mécanismes d'Adsorption des Métaux Lourds

L'adsorption des métaux lourds fait référence à divers mécanismes physico-chimiques par lesquels les ions métalliques se fixent à la surface d'un adsorbant. Ces mécanismes incluent ([Soudani, 2024](#)) :

- **Adsorption physique** : Ce mécanisme repose sur de faibles forces de Van der Waals entre les ions métalliques et la surface de l'adsorbant. Il est réversible et n'entraîne pas de modifications chimiques.
- **Adsorption chimique** : Ce processus implique la formation de liaisons chimiques entre les ions métalliques et la surface de l'adsorbant, entraînant des interactions plus fortes et spécifiques. En général, ce mécanisme est irréversible.
- **Échange d'ions** : Ce mécanisme concerne l'échange d'ions métalliques avec des ions non toxiques présents sur la surface de l'adsorbant. Il est particulièrement significatif pour les adsorbants tels que les zéolites et les argiles.
- **Précipitation chimique** : Ce processus conduit à la formation de composés métalliques insolubles à la surface de l'adsorbant, ce qui diminue leur mobilité et leur toxicité.
- **Interactions électrostatiques** : Les ions métalliques chargés sont attirés par les surfaces adsorbantes ayant une charge opposée.

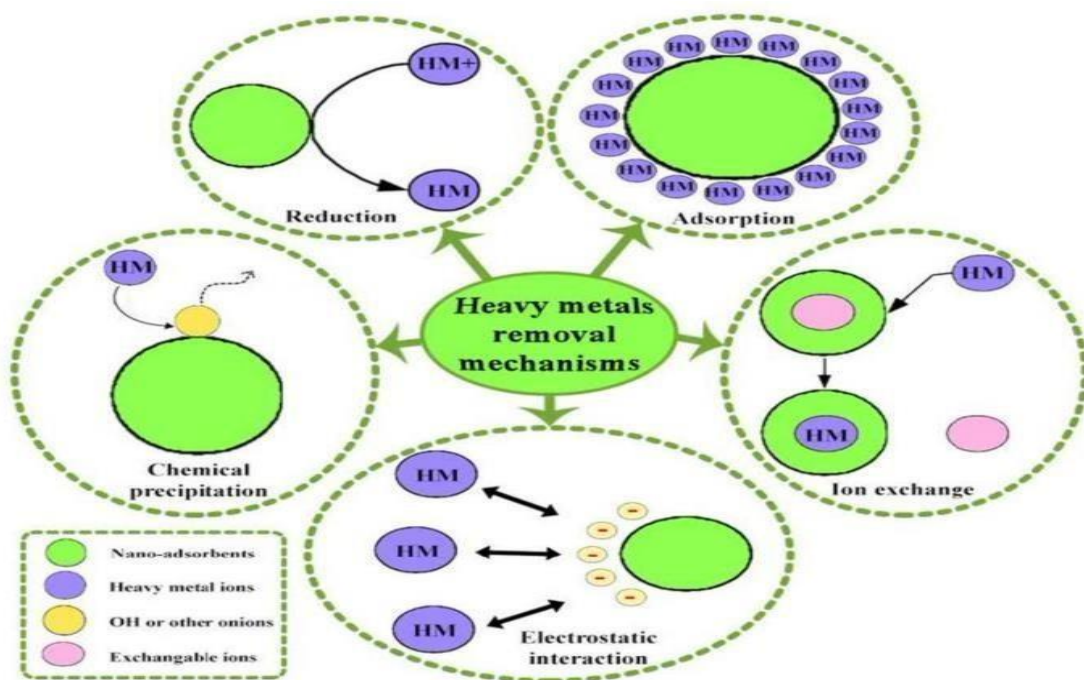


Figure 1: Mécanismes d'élimination des métaux (Bakhtiari et al., 2024).

II.3.2. Adsorbants pour l'Élimination des Métaux Lourds

De nombreux matériaux ont été examinés pour leur capacité à adsorber les métaux lourds présents dans les solutions aqueuses. Ces adsorbants peuvent être classés en plusieurs catégories :

- **Matériaux à base de carbone** : Le charbon actif, un adsorbant couramment utilisé, se distingue par sa grande surface et sa microporosité élevée, ce qui le rend particulièrement efficace pour éliminer divers métaux lourds. Le biochar, un autre matériau carboné dérivé de la biomasse, a également montré un potentiel d'adsorption prometteur ([Chen et al., 2022](#)).
- **Zéolites** : Les zéolites sont des minéraux aluminosilicates poreux dotés d'une structure cristalline bien définie. Grâce à leur capacité d'échange d'ions élevée et à leur taille de pores uniforme, elles sont efficaces pour l'élimination des métaux lourds. La modification des zéolites naturelles peut améliorer leurs performances d'adsorption ([Kuldeyev et al., 2023](#)).
- **Argiles** : Les minéraux argileux, tels que la montmorillonite, possèdent une grande surface et une capacité d'échange cationique, ce qui leur permet d'adsorber les ions de métaux lourds des solutions aqueuses ([Cidade et al., 2022](#)).
- **Biosorbants** : Les biosorbants sont des matériaux issus de la biomasse, tels que les algues, les champignons et les déchets agricoles. Ces matériaux contiennent divers groupes fonctionnels capables de se lier aux ions de métaux lourds ([Navarro et al., 2016](#)).

II.3.3. Facteurs influençant l'adsorption des métaux lourds

Plusieurs facteurs influencent l'efficacité de l'adsorption des métaux lourds, notamment ([Chebbi et al., 2024](#) ; [Wei et al., 2023](#) ; [Zaghloul et al., 2021](#)):

- **pH**: L'acidité ou l'alcalinité de la solution peut influencer la charge de surface de l'adsorbant et l'ionisation de l'adsorbat, affectant ainsi.

- **Température:** L'augmentation de la température peut augmenter ou diminuer l'adsorption selon le type d'adsorption (endothermique ou exothermique).
- **Concentration de l'adsorbat:** Des concentrations plus élevées peuvent conduire à une plus grande adsorption jusqu'à ce que les sites de liaison de l'adsorbant soient saturés.
- **Temps de contact:** Un temps de contact plus long permet d'atteindre l'équilibre, maximisant ainsi l'adsorption.

II.3.4. Applications et orientations futures

L'adsorption joue un rôle crucial dans l'élimination des métaux lourds présents dans les eaux usées industrielles, les eaux potables et les sols contaminés. Les recherches actuelles se concentrent sur le développement de nouveaux adsorbants dotés d'une capacité d'adsorption élevée, d'une grande sélectivité et d'une rentabilité accrue. Cela inclut des nano-adsorbants, des matériaux composites et des biosorbants modifiés. Parallèlement, l'intégration de l'intelligence artificielle et des algorithmes d'apprentissage automatique progresse, visant à optimiser la détection et l'adsorption des métaux lourds ([Iyer et al., 2024](#)).

Partie

Expérimental

et

Application

Chapitre III :

*Matériel, Méthodes
et interprétation des résultats*

1. Introduction :

Ce chapitre est consacré à la présentation de l'ensemble des techniques de travail utilisées au laboratoire pour préparer le biochar à partir des résidus de café. Il vise également à étudier l'effet de différents paramètres physiques et chimiques (la cinétique, La concentration initiale de polluant (les ions du cuivre), masse d'adsorbants, pH, ...) sur l'adsorption d'un polluant toxique inorganique. Une étude des propriétés cinétiques et isothermes d'adsorption est également réalisée, enfin une application directe sur deux biofiltre à base d'un biochar dérivé des résidus de café et à base de charbon actif commercial pour les eaux usées de la station d'épuration (BATNA-Timghad) ont été fait pour tester la fiabilité de notre biochar.

2. Matériels, produits et méthodes avec interprétation des résultats :

2.1 Matériels

Verreries et Papier filtre, Montage de Soxhlet, Un pH mètre, Un conductimètre, Une électrode spécifique de cuivre+ Un potentiomètre, Etuve, Une balance analytique Plaque chauffante Agitateur mécanique-Thermomètre, Pompe à vide, Tamiseur et Four a moufle.

2.2 Réactifs utilisés :

- Sulfate de cuivre $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
- Hexane C_6H_{14}
- La soude caustique NaOH (0.1M).
- Acide chlorhydrique HCl (0.1M).
- Eau distillée.
- Charbon actif commercial.
- Biochare dérivé du résidu de café

2.3 Méthodes avec interprétations des résultats

2.3.1 Préparation de l'adsorbant (biochar) :

L'adsorbant est préparé à partir de marcs de café récolté de cafeteria au niveau de la wilaya de BISKRA qui est utilisé comme matière première pour la production de biochar.

2.3.1.1 Définition du café :

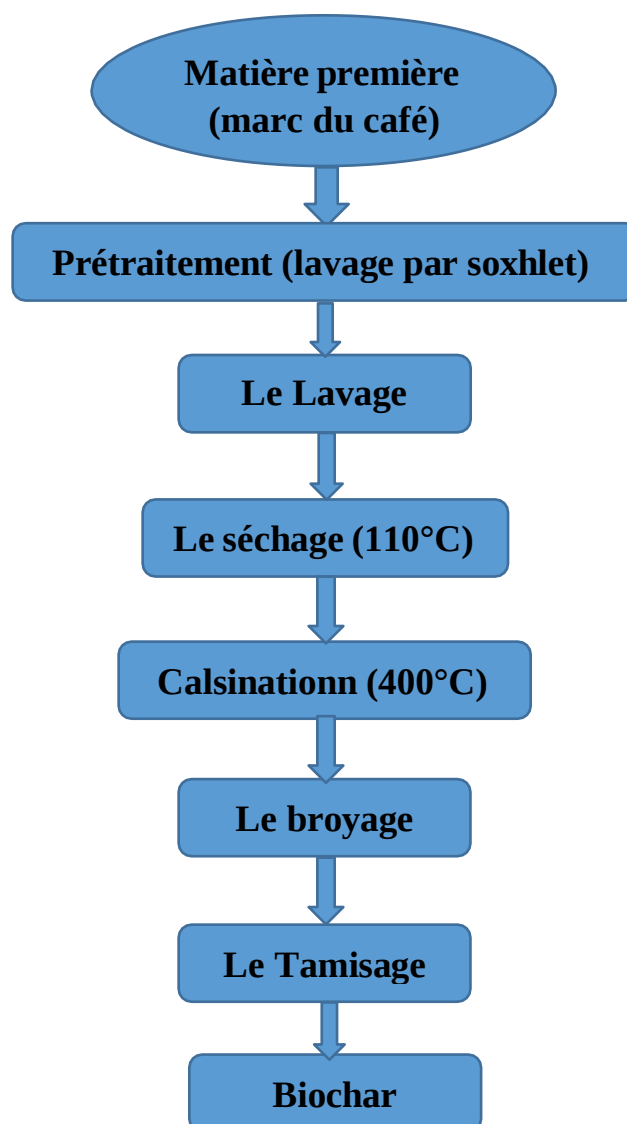
Le café est une boisson préparée à partir des grains torréfiés du caféine (**Figure III.1**), riche en caféine, il est reconnu pour ses effets stimulants. Les résidus de café peuvent également être valorisés dans des application environnementales telles que la production de biochar et le

compostage et l'amélioration des sols. Cette matière contient de la caféine, un alcaloïde aux propriétés psychostimulantes, et d'autres composés bioactifs (comme les acides chlorogéniques) aux effets potentiels sur la santé (*Pendergrast., 2010 ; Butt & Sultan., 2011 et Farah., 2012*)



Fig III.1: les grains du café et la poudre du café

2.3.1.2 Les étapes de préparation de biochar :



2.3.1.2.a Le Lavage (prétraitement) :

On commence par rincer plusieurs fois le marc de café à l'eau distillée pour retirer la poussière et les impuretés qui y sont collées. Le lavage continue jusqu'à ce que l'eau de rinçage soit totalement limpide. Par la suite, un processus d'extraction s'effectue grâce à une configuration de Soxhlet et du solvant n-hexane (**Figure III. 2**) afin de retirer les huiles et les substances organiques non polaires contenues dans le résidu de café. Suite à l'extraction, le marc de café est une fois de plus rincé à l'eau distillée pour supprimer les traces de n-hexane.

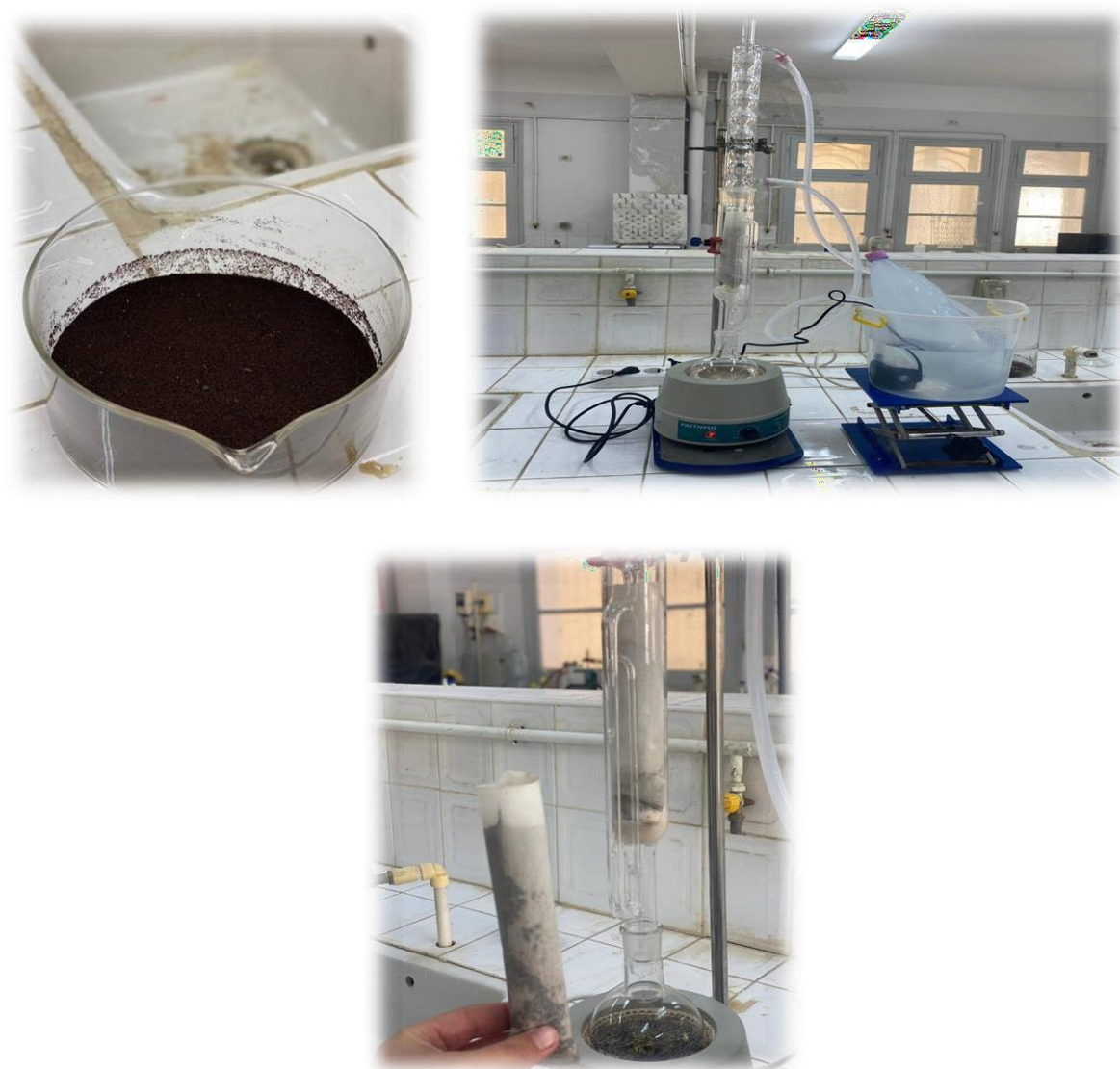


Figure III.2 : le prétraitement de marc du café par soxhlet

2.3.1.2.b Le séchage :

Le séchage des marcs du café a été réalisé dans une étuve, pendant 24 heures à 110°C. En vue de prévenir une éventuelle altération des propriétés physicochimiques des matériaux (**Figure III.3**).



Fig III.3 : Séchage de l'échantillon dans une étuve

2.3.1.2.c Carbonisation :

La fraction de la matière récupérée après le séchage a été introduite dans un four à moufle réglée à 400°C, et maintenu à cette température pendant un heure (1h). Après la carbonisation l'échantillon a été lavé plusieurs fois par l'eau distillée jusqu'à la stabilisation de pH entre (6 et 7) et séché dans une étuve, pendant 24 heures à 110°C (**Figure III.4**).



Fig III.4 : la carbonisation et le lavage de l'adsorbant

2.3.1.2.d Le Tamisage :

Les particules utilisées pour les essais d'adsorption ont été isolées mécaniquement au moyen d'un tamiseur (**Figure III.5**), pour des grains de même taille. ($d > 360\mu\text{m}$)



Fig III.5 : Tamisage de l'adsorbant

2.3.2 Caractérisation du Biochar

2.3.2.1 La Calorimétrie Différentielle à Balayage (DSC)

La Calorimétrie Différentielle à Balayage (DSC) (**Figure III.6**) est une méthode d'analyse thermique qui évalue les fluctuations de flux de chaleur entre un échantillon et une référence inerte sous un protocole de température régulé. Elle permet de définir :

- Les changes de phase (fusion, cristallisation)
- Les réactions chimiques (oxydation, décomposition) (*Prime & Bair 2009*).



Fig III.6 : Calorimètre Différentielle à Balayage (DSC) (CRAPC)

La **Figure III.7** présente l'évolution de flux de chaleur en fonction de la croissance de température.

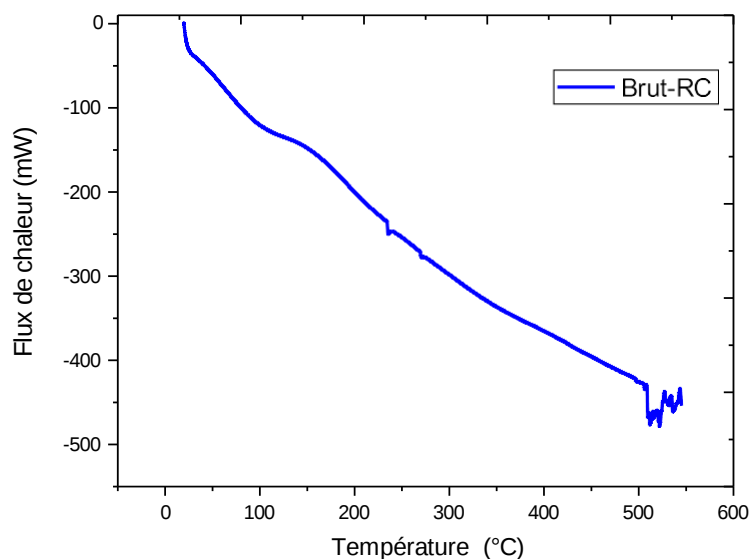


Fig III. 7 : Courbe de flux de chaleur en fonction de température (DSC)

L'analyse DSC met en évidence un pic endothermique marqué entre 50 et 150°C, caractéristique de la désorption de l'eau physiquement adsorbée à la surface du biochar. Au-delà, une transition exothermique apparaît vers 350°C à 400°C, reflétant vraisemblablement la dégradation thermique des composés cellulose résiduels (Chen et al, 2021). La stabilisation du flux de chaleur observée au-dessus de 400°C atteste d'une structure carbonée hautement stable, signature d'un biochar bien matérialisé. Cette robustesse thermique suggère une aptitude prometteuse pour des applications de séquestration durable du carbone.

2.3.2.2 pH de point de charge zéro :

Le pH_{PZC} est défini comme le pH auquel il n'y a pas de charge positive ou négative à la surface du biochar, 50 ml d'une solution de chlorure de sodium NaCl (0,1 M) sont placés dans des flacons, le pH est ajusté de 2 jusqu'à 12 par addition d'Hydroxyde de sodium NaOH (0.1M) ou d'acide chlorhydrique HCl (0.1M) ; Ensuite, nous ajoutons 0.5g du biochar aux solutions de NaCl. Après 24 heures d'agitation le pH final est mesuré. Et on trace la courbe en donnant le $(\Delta pH) = f(pH_i)$ (Figure III.8).



Fig III.8 : Essais de détermination de pH point de zéro charge

La différence entre le pH initial et final (ΔpH) a été tracée en fonction du pH initial (Figure III.9), et le pH_{PZC} a été obtenu lorsque la courbe coupe l'axe des x. Le pH_{PZC} des BRC était de 5.86 ce qui signifie que sa charge nette de surface devient positive à un pH inférieur à 5,86 et négative au-dessus de cette valeur.

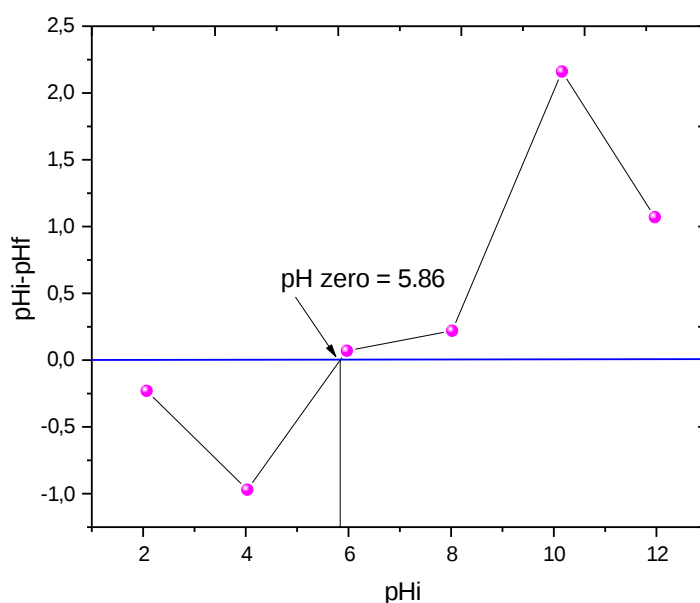


Fig III.9 : La courbe de pH_{zero} charge

2.3.2.3 La spectrométrie infrarouge :

La spectrométrie infrarouge est une méthode analytique basée sur l'absorption de rayonnements électromagnétiques dans le domaine spectral de 1 à 1000 μm (ondes de 10 000 à 10 cm^{-1}). La région la plus utile pour l'analyse chimique est le moyen infrarouge (2,5-25 μm ; 4000-400 cm^{-1}), où les bandes d'absorption correspondent aux vibrations moléculaires caractéristiques des liaisons chimiques (*Silverstein et al., 2014*). Contrairement à une idée reçue, la méthode est généralement non-destructive pour les échantillons solides ou liquides analysés par transmission ou réflexion (*Griffiths & de Haseth, 2007*). Pour mener l'étude par spectroscopie infrarouge, le mélange a été comprimé pour combiner les deux composants, de Biochar et de Bromure de Potassium (KBr), afin d'obtenir la forme souhaitée à placer dans un spectromètre (Figure III.10).



Fig III. 10 : Spectromètre Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR/ATR-DRIFT)

(MODELE Cary 630) – CRAPC Biskra

La **Figure III.11** représente le spectre d'analyse FTIR du BCR avant et après adsorption et les groupes fonctionnels sont illustré dans le tableau III.2.

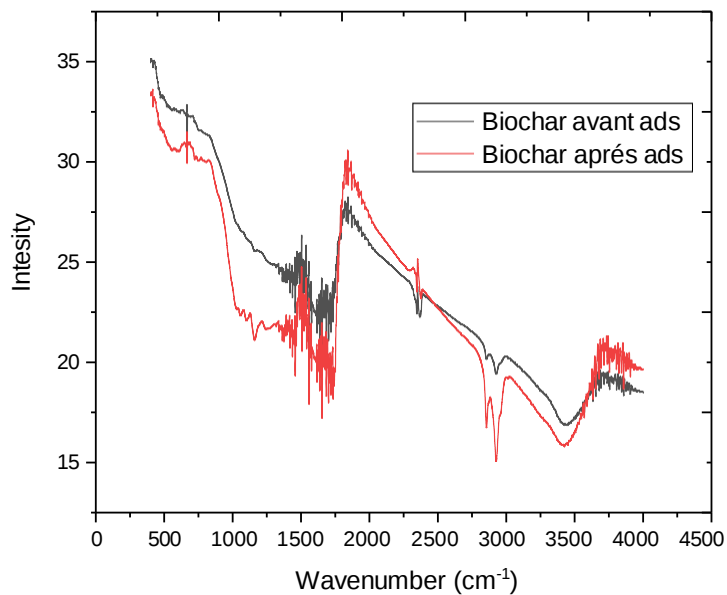


Fig III.11 : Le spectre FTIR du Biochar avant et après adsorption du Cu (II)

Tableau III.1 : les principaux groupes fonctionnels caractérisant le biochar avant et après adsorption.

La bande (cm ⁻¹)	Fonction probable Avant adsorption	Références
1450	C-H déformation des méthyles/ méthylènes	(Nguyen et al, 2023)
1600	C-C Cycles aromatiques (lignine résiduelle)	(Yang et al, 2020)
1700	C=O groupes carbonyle (acides carboxyliques, cétones)	(Li et al, 2022)
2920, 2850	C-H vibrations des chaines aliphatiques	(Wang et al. 2021)
3400-3300	O-H groupes hydroxyle(phenol, alcools)	(Li et al, 2022)
Après adsorption		
Réduction d'intensité à 3400 cm ⁻¹	Complexation des -OH avec Cu(II), due au formation de liaison Cu-O	(Chen et al, 2021)
Déplacement de 1700 → 1650 cm ⁻¹	Interaction Cu(II) avec C=O, due au Coordination du Cu avec les carboxylates	(Yang et al, 2020)
Pic élargi à 1050 cm ⁻¹	Modification des liaisons C-O, due au interaction avec les groupes éther et phénols	(Liu et al, 2023)
Apparition à 500-400 cm ⁻¹	Vibrations Cu-O est une preuve directe de l'adsorption	(Spokas, 2014).

2.3.2.4 La Microscopie Électronique à Balayage (MEB)

La microscopie électronique à balayage (**Figure III. 12**) est une technique d'analyse avancée qui utilise un faisceau d'électrons pour analyser la surface d'un échantillon. Cette méthode permet d'obtenir des images haute résolution. Contrairement à la microscopie optique traditionnels, le MEB offre (*Goldstein et al., 2018*) :

- Une grande profondeur de champ,
- Une résolution spatiale élevée (capacité à visualiser des détails jusqu'à l'échelle nanométrique),
- Une analyse élémentaire (EDS) et cristallographique (EBSD) (*Egerton., 2016*).



Fig III.12 : Un microscope électronique à balayage (CRAPC)

L'analyse morphologique a été faite et les résultats sont donnés dans la figure III. 13.

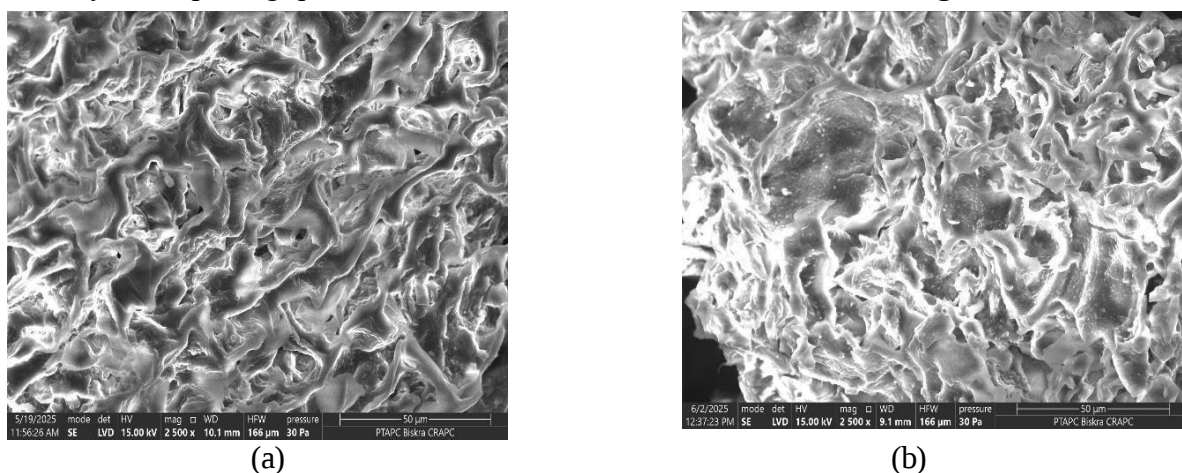


Fig III. 13 : L'analyse MEB du biochar BCR : (a) avant adsorption et (b) après adsorption

La comparaison des résultats de l'analyse MEB avec interprétations sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau IV. 2 : Résultats d'analyse morphologique du BCR avant et après adsorption

Analyse morphologique du BCR avant adsorption	Analyse morphologique du BCR après adsorption
1- Structure poreuse irrégulière avec des canaux et des cavités de taille variable. 2- Présence de particules fines et de résidus organiques. 3- Porosité large et interconnectée, favorable à l'adsorption.	1- Réduction de la porosité : Colmatage partiel des pores par les espèces adsorbées (ex : métaux lourds). 2- Présence de dépôts : Agglomérats de particules à la surface, suggérant une adsorption chimique ou physique. 3- Modification de la texture : Surface plus lisse dans certaines zones,

4- Taille des pores estimés entre 1 et 10 μm .	indiquant une interaction avec les polluants.
---	---

On note que [Li et al., 2022](#) démontre que les métaux lourds colmatent les pores du biochar ainsi que [Nguyen et al., 2023](#) Corrèle les modifications morphologiques avec les capacités d'adsorption.

2.3.2.5 La diffraction des rayons X (DRX)

La diffraction des rayons X (DRX) est une technique d'analyse structurale basée sur la diffraction d'un faisceau de rayons X par un matériau cristallin. Elle permet d'étudier la structure cristalline, la phase, l'orientation et les paramètres de maille des matériaux (**Figure III.14**). Cette technique est basée sur Loi de Bragg : La condition de diffraction est donnée par :

$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

où : n = ordre de diffraction,
 λ = longueur d'onde des rayons X,
 d = distance interréticulaire,
 θ = angle de diffraction.

- **Familles de plans cristallins** : Chaque pic de diffraction correspond à une famille de plans (hkl).
- **Applications**
 - Identification des phases cristallines (analyse qualitative).
 - Détermination des paramètres de maille.
 - Analyse quantitative (proportion des phases).
 - Étude des contraintes et de la texture. ([Als-Nielsen & McMorrow., 2011](#)).



Figure III.14: Diffractometer à rayon X (CRAPC)

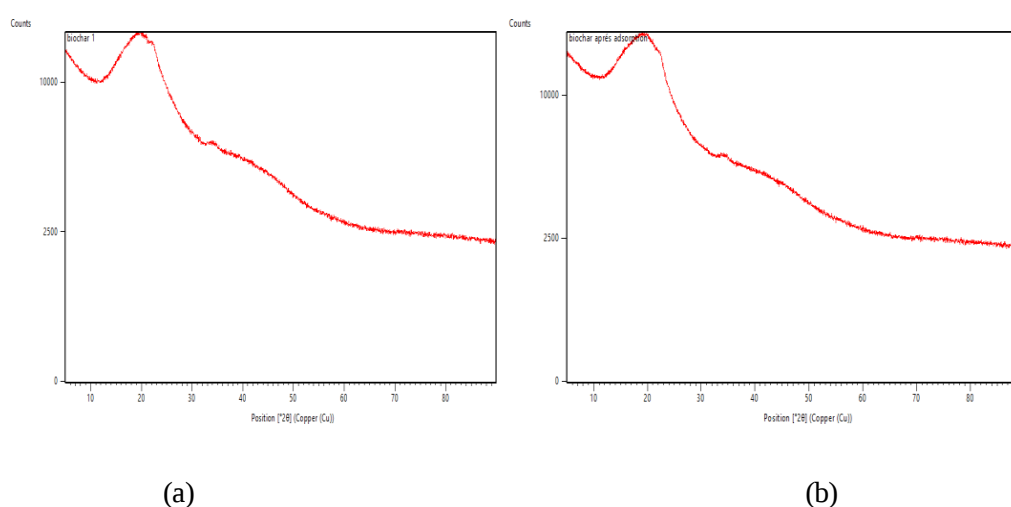


Fig III. 15: Les spectre DRX de BRC: (a) avant et (b) après adsorption du Cu(II)

L'analyse par diffraction des rayons X (DRX) a permis d'évaluer les modifications structurales du biochar avant et après adsorption du cuivre (Cu^{2+}). **Avant adsorption**, le biochar présente un profil amorphe avec quelques signaux diffus, indiquant une structure désordonnée typique des matériaux carbonés. **Après exposition au Cu^{2+}** , on observe une augmentation de l'intensité globale et l'apparition de pics faibles dans certaines zones du spectre (autour de $2\theta = 28\text{--}32^\circ$ et $40\text{--}45^\circ$), traduisant une interaction entre les ions cuivre et les sites fonctionnels du biochar. Ces changements confirment la capacité du biochar fonctionnalisé à fixer efficacement le Cu^{2+} sans formation de phases cristallines nouvelles, ce qui soutient son usage comme adsorbant actif dans les systèmes de biofiltration (*Ahmed et al., 2014 et Liu et al., 2012*).

2.3.3 Elimination des ion du cuivre par adsorption sur le biochar

Dans cette partie, l'adsorption du cuivre (II) sur le biochar élaboré comme adsorbant a été étudiée en condition de température ambiante. Dans une première étape, l'influence de

quelques paramètres opérationnels tels que l'effet de temps, la masse du charbon et la concentration de la solution sur la cinétique d'adsorption a été étudiée. Dans la deuxième étape, il convient d'établir les isothermes d'adsorption et d'évaluer leur convenance via les modèles généralisés de Langmuir et Freundlich.

2.3.3.1 Adsorption en mode batch (La cinétique d'adsorption)

Concernant l'adsorption, toutes les expériences ont été réalisées en régime statique suivant un même protocole expérimental. À une température ambiante de $25 \pm 2^\circ\text{C}$, une quantité définie de matériau adsorbant (BRC) préalablement séché de 0.5g, est mise en contact avec 50 mL d'une solution aqueuse du cuivre (II) de concentration donnée de 10 ppm, le pH de solution est de 6.54 et la vitesse d'agitation est maintenir 300 tr/min. le mélange est agité pendant un intervalle de temps fixé. Les échantillons prélevés à des temps réguliers allant de (5, 10, 15,20,30, 60,120, 180 et 300min).

Les concentrations du Cu^{2+} dans les échantillons ont été déterminées à l'aide d'une électrode spécifique, La teneur des ions cuivre a été mesurés à l'aide d'une électrode combinée spécifique reliée à un multi paramètre (CONSORT P800). On a utilisé une électrode combinée spécifique (CONSORT, ISE 25B) pour le dosage des ions Cu^{2+} . Une solution d'ajustement spécifique de la force ionique (ISA25) a été ajoutée à toutes les solutions et les étalons pour maintenir une force ionique constante. Pour mesurer la teneur de cuivre dans un échantillon, on doit procéder à l'étalonnage de l'électrode spécifique, en mesurant le potentiel pour différentes solutions étalons. Ensuite une courbe d'étalonnage (**Figure III. 16**) sera tracée en utilisant une échelle semi logarithmique représentant le potentiel mesuré (mV) en fonction de la concentration de l'élément.

Le rendement d'élimination (%R) pour le cuivre (II) et la quantité adsorbée par gramme d'adsorbant à un instant t (q_t), sont calculés à l'aide des équations suivant :

$$R\% = \frac{C_i - C_e}{C_i} \cdot 100$$

$$q_e = \frac{C_i - C_e}{m} \cdot V$$

q_e : Quantité de polluant par unité de masse (mg/g)

C_i : Concentration initiale de polluant en (mg/l)

C_e : Concentration de polluant à d'équilibre en (mg/l)

V : Volume de la phase aqueuse en Litre

m : La masse d'adsorbant en gramme

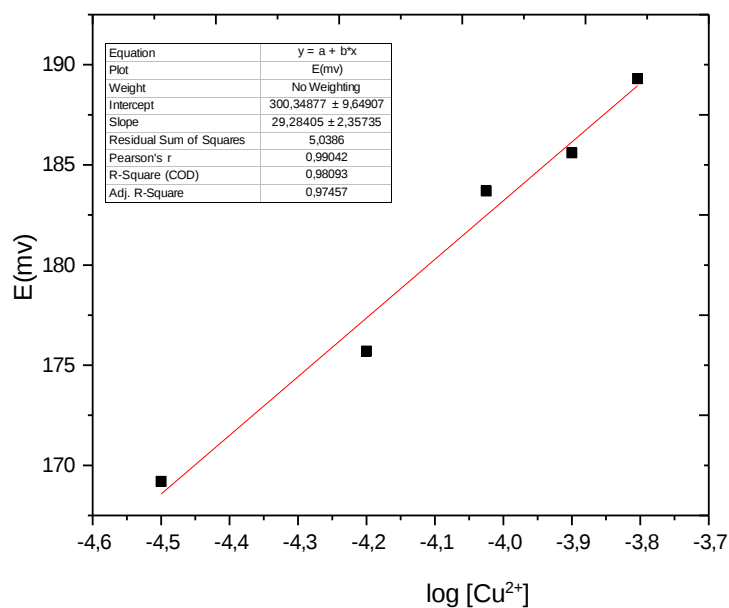


Fig III. 16 : La courbe d'étalonnage

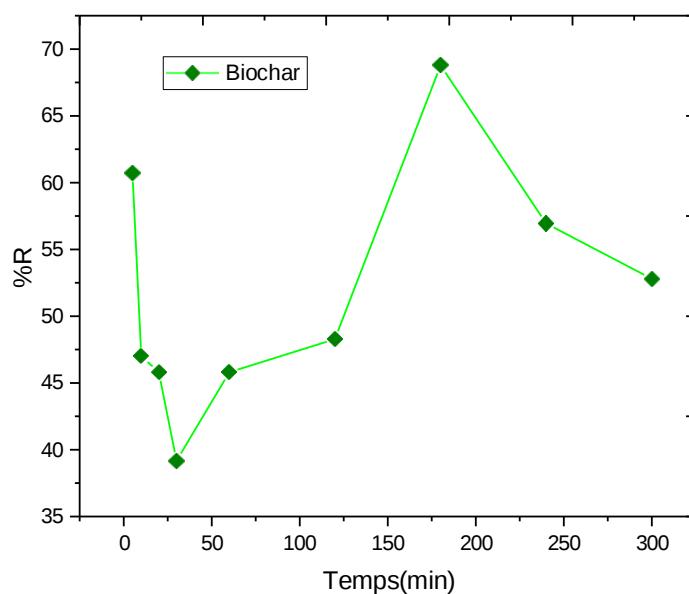


Fig III. 17 : Effet de temps de contact sur le Rendement d'élimination du cuivre (II) par le Biochar (BRC)

Selon la Figure si dessus, on remarque que le temps de contact optimal est de 180min (3h), ([Abbas et al., 2016](#)).

2.3.3.1.1 Influence des paramètres opératoires

a. Influence de la concentration initiale du cuivre (II)

L'influence de la concentration initiale a été étudiée en faisant varier les concentrations initiales entre 1, 5, 10, 15, 20 mg / L, le temps de contact a été pris 180 min, et les autres paramètres sont maintenus constants. L'évolution du rendement d'élimination par le biochar et en fonction de la concentration initiale du cuivre (II) est représentée sur **la Figure III.18**.

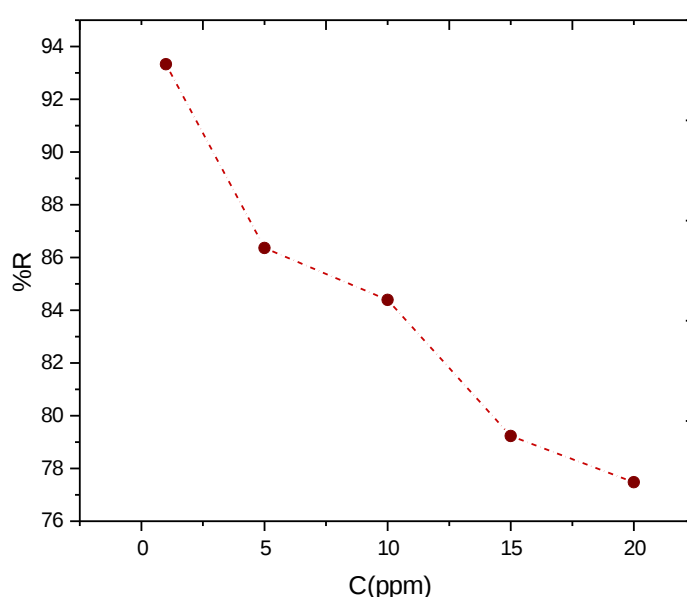


Fig III. 18 : Influence de la concentration du cuivre (II) par le Biochar (BRC)

Le biochar montre une adsorption dépendante de la concentration et prend une valeur maximale à 1ppm. Cela suggère que le biochar pourrait être plus adapté à des applications ciblées (faibles concentrations) (*Kyzas, & Kostoglo., 2014*).

b. Influence de la dose d'adsorbant

Nous avons fait varier la masse d'adsorbant de 0,05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.1g. Les autres paramètres sont maintenus constants. Les résultats sont résumés sur **Figure III. 19**.

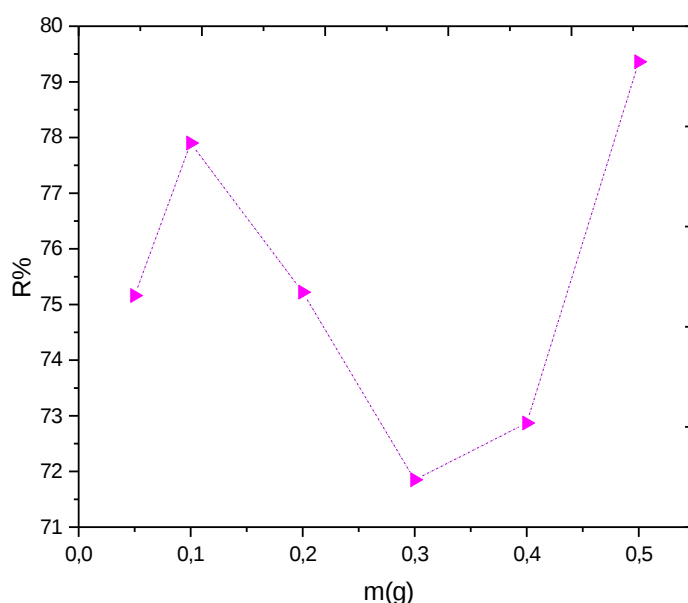


Fig III. 19 : Influence de dose du biochar sur le rendement d'élimination du Cu(II)

L'analyse de **Figure III. 19** montre que l'augmentation de dose du biochar dans le domaine choisi prend une valeur maximale de rendement pour une dose de 0.5g. Cette observation s'aligne sur le principe établi selon lequel l'augmentation de la dose d'adsorbant conduit à une plus grande surface disponible, fournissant par conséquent plus de sites de liaison (groupes fonctionnels) pour l'adsorption des ions métalliques (*Dai et al., 2017 ; Slimani et al., 2017*). Cela se traduit par une concentration plus élevée d'ions métalliques adsorbés sur la surface de l'adsorbant avec l'augmentation du dosage d'adsorbant dans la solution.

2.3.3.1.2 Modélisation de la cinétique d'adsorption

Pour expliquer le mécanisme du processus d'adsorption et pour déterminer la vitesse de la réaction, nous avons modélisé les cinétiques d'adsorption à différentes concentrations de cuivre (II) du milieu par deux modèles pseudo premier ordre et pseudo deuxième ordre.

1. Modèle de Pseudo-Premier Ordre (Lagergren, 1898)

Équation :

$$dq/dt = k_1(q_e - q_t)$$

Forme intégrée (linéarisée) :

$$\log(q_e - q_t) = \log(q_e) - 2.303k_1t$$

avec : q_t : Quantité adsorbée au temps t (mg/g).

q_e : Quantité à l'équilibre.

k_1 : Constante de vitesse (min^{-1}).

Applications :

- Adsorption physique (physisorption).
- Processus contrôlés par la diffusion dans la solution (*Lagergren, 1898*).

La Figure suivante détermine la variation de $\ln(q_e - q_t)$ en fonction du temps (t) de l'élimination du Cu(II) par le biochar de résidus de café, et donne une droite linéaire de pente ($-k_1$) et d'ordonnée à l'origine $\ln q_e$.

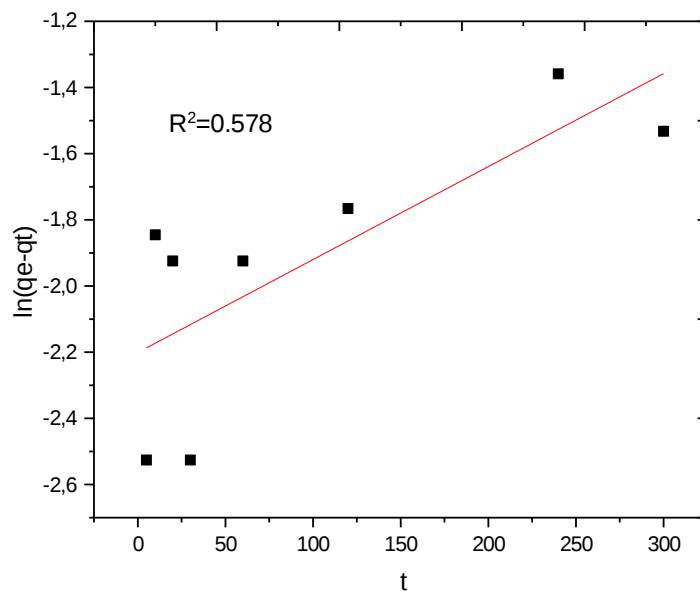


Fig III. 20 : Le Model Cinétique de pseudo premier ordre

2. Modèle de Pseudo-Deuxième Ordre (Ho & McKay, 1999)

Équation :

$$\frac{dq}{dt} = k_2 (q_e - q)^2$$

Forme intégrée (linéarisée) :

$$\frac{t}{q} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t$$

- k_2 : Constante de vitesse ($\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$).

Applications :

Systèmes où la capacité d'adsorption dépend des sites actifs (Ho & McKay, 1999).

Le tracé de t/q_t en fonction du temps t est représenté sur la Figure III.21 pour l'adsorption du Cu(II) par le BRC et donne une droite linéaire de pente $1/q_e$ et d'ordonnée à l'origine $1/k_2 q_e^2$.

La connaissance de ces valeurs permet de déduire les valeurs de la constante k_2 et la capacité d'adsorption à l'équilibre q_e

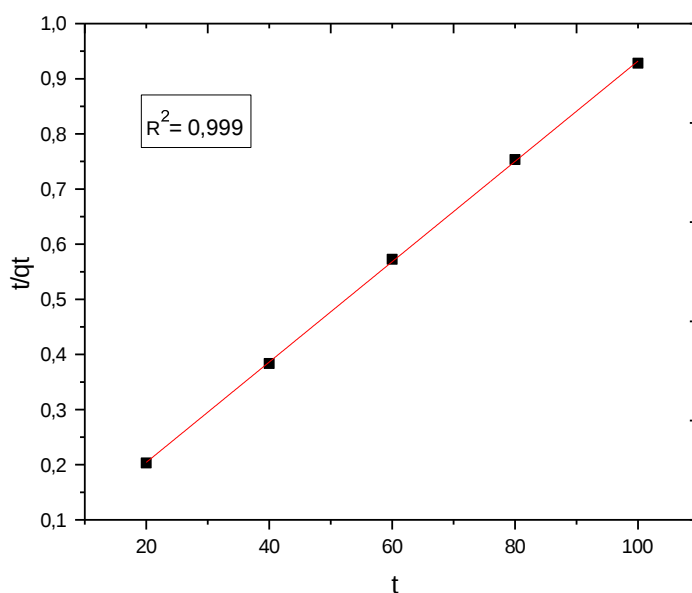


Fig III. 21 : Le Model Cinétique de pseudo deuxième ordre

Comme le montrent les Figures III.20-21, la cinétique d'élimination du Cu(II) par BRC s'accorde avec le modèle de second ordre et présente parfaitement les résultats expérimentaux par rapport au modèle de Lagergren (pseudo-premier ordre). La valeur du coefficient de corrélation R^2 pour le modèle de McKay et Ho est de l'ordre de **0.999** et $q_{e,cal}$ est **109.8** et $q_{e,exp} = 107.73 \text{ mg/g}$ (valeurs proche) cependant la valeur de $q_{e,cal}$ du pseudo premier ordre est **0.1** tandis que $k_2 = 0.0037 \text{ g/(mg.min)}$ (Feng et al, 2020).

2.3.3.1.3 Modélisation des isothermes d'adsorption :

Deux modèles d'isotherme d'adsorption de Langmuir et Freundlich ont été proposés pour l'adsorption liquide-solide.

1. Isotherme de Langmuir : Théorie, Équation et Applications

L'isotherme de Langmuir est un modèle fondamental en adsorption, décrivant la fixation **monocouche** de molécules sur une surface homogène. Il suppose que :

- L'adsorption se produit sur des **sites spécifiques identiques**.
- Chaque site ne peut adsorber **qu'une seule molécule** (pas d'interactions entre molécules adsorbées).
- L'énergie d'adsorption est **constante** (pas d'hétérogénéité de surface)

Équation de Langmuir (forme linéaire)

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{K_L q_m C_e}$$

- q_e : Quantité adsorbée à l'équilibre (mg/g).
- C_e : Concentration en solution à l'équilibre (mg/L).
- q_m : Capacité maximale d'adsorption (monocouche complète).
- K_L : Constante de Langmuir (L/mg), liée à l'affinité des sites.

Validation du Modèle : Le facteur de séparation (R_L) doit être compris entre 0 et 1 :

$$R_L = 1/(1 + K_L C_0)$$

- C_0 = concentration initiale.
- $0 < R_L < 1$: Adsorption favorable.
- $R_L = 0$: Irréversible.

Applications

- Traitement des eaux (adsorption de métaux lourds sur charbon actif).
- Catalyse hétérogène (fixation de réactifs sur des catalyseurs).
- Séparation gazeuse (O_2/N_2 sur zéolites).

D'un autre côté le modèle de Freundlich se présente sous la forme :

$$q_e = K_F \cdot C_e^{1/n}$$

Avec : K_F : est appelé constante de Freundlich.

Elle donne une indication grossière sur la capacité d'adsorption de l'adsorbant. Lorsque K_F augmente, la capacité d'adsorption augmente aussi.

- n : intensité d'adsorption.
- q_e : quantité de soluté adsorbée par unité de masse d'adsorbant à l'équilibre (mg/g).
- C_e : concentration du soluté dans la solution à l'équilibre (mg/L).

L'utilisation des logarithmes décimaux permettent d'obtenir une forme linéarisée de l'équation, comme suit :

$$\ln q_0 = \ln K + (1/n) \ln C_0$$

Les figure III. 22-23 représentent les isotherms de Langmuir et de freundlish

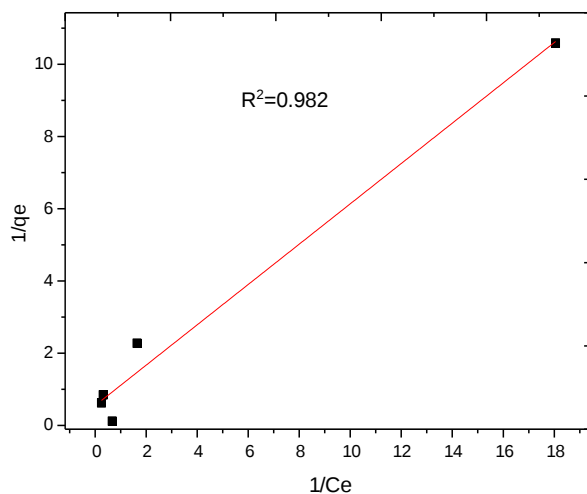


Fig III. 22 : Linéarisation du modèle de Langmuir d'élimination du Cu(II) par BRC

A partir de la Figure III. 22 le coefficient de corrélation $R^2 = 0.982$ et après les calculs des différent parameters, on constate que : $K_L = 0.99$, $q_m = 46 \text{ mg/g}$, donc on conclure que le model d'isotherme de Langmuir est favorable dans ce cas.

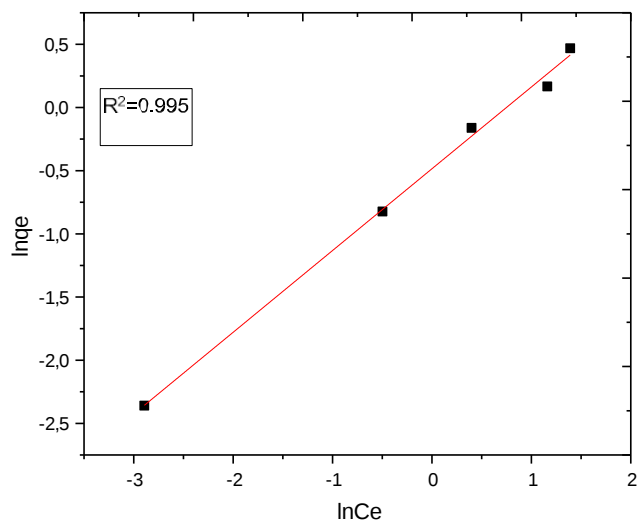


Fig III. 23 : Linéarisation du modèle de freundlish d'élimination du Cu(II) par BRC

Les observations faites révèlent que les résultats expérimentaux (**Figure III. 23**) sont bien décrits par le modèle de freundlich avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0.995$, $k_f = 0.616$ et $n = 1.54$, (*Feng et al, 2020*).

Conclusion

Le biochar issu des résidus de café a démontré son efficacité en tant qu'adsorbant pour l'élimination du Cu^{2+} dans les eaux pollues, affichant une capacité d'adsorption maximale de 46 mg/g (selon le modèle de Langmuir) et un temps d'équilibre s'établissant à 180 minutes. Les études (FTIR, MEB, DRX) ont attesté que l'adsorption est due à des processus chimiques (complexation avec les groupes -OH et C=O) et physiques (porosité). Le processus est mieux décrit par le modèle cinétique pseudo-second ordre et l'isotherme de Freundlich ($R^2 = 0.995$), ce qui suggère une adsorption hétérogène et multicouche. **En résumé**, ce biochar éco-responsable offre une alternative prometteuse aux adsorbants commerciaux, combinant performance et valorisation des déchets agricoles.

Chapitre IV :

*Application d'un biochar
fonctionnalisé dans un
système de biofiltration*

1 Introduction

Cette étude vise à développer des solutions de biofiltration innovantes en utilisant du biochar fonctionnalisé issu de résidus recyclables (Résidus du café). Le biochar, est un matériau poreux obtenu par des traitements chimiques et/ou physiques pour améliorer ses propriétés d'adsorption et sa réactivité. Dans les systèmes de biofiltration, ce biochar fonctionnalisé agit comme un support filtrant optimisé pour capturer et dégrader divers polluants organiques et inorganiques, notamment les métaux lourds, les composés organiques volatils (COV) et les contaminants microbiologiques. (*Zhao et al 2021*). L'utilisation de résidus recyclables comme matière première permet non seulement de valoriser des déchets organiques, mais aussi de réduire l'empreinte environnementale du processus de production. Les applications incluent : (*Wang et al 2020*)

- ✓ Le traitement des eaux usées industrielles et domestiques.
- ✓ La purification de l'air dans les environnements urbains et industriels.
- ✓ La dépollution des sols contaminés.
- ✓ L'amélioration de la qualité de l'eau pour l'agriculture

Les défis du projet :

1. Optimisation des performances du biochar fonctionnalisé
2. Sélection et variabilité des résidus recyclables
3. Intégration dans les systèmes de biofiltration
4. Réglementation et validation environnementale
5. Rentabilité et viabilité économique
6. Sensibilisation et adoption du marché.

2. Matériaux et équipements utilisés

- Biochar brut (issu de biomasse locale, résidus de café)
- Réactifs de fonctionnalisation (aspect physique calcination à 400°C)
- Charbon actif commercial
- Gravier ou sable filtrant (couche de support)
- Géotextile (pour la séparation des couches)
- Tuyaux PVC ou verre pour la structure du biofiltre

- Colles, robinets, joints
- Cylindres ou colonnes de filtration
- Testeurs de qualité d'eau (pH, conductivité, DCO, NO_3^- , NH_4^+)

3. Innovation et Technologie (conception des deux biofiltre)

3.1. Biofiltre à Biochar Fonctionnalisé (Prototype 1)

- **Matériau clé** : Biochar produit à partir de **résidus de café**, modifié physiquement à 400°C pour améliorer sa capacité d'adsorption et la colonisation microbienne.
- **Matériaux auxiliaires** : gravier et sable. Le

gravier a une Fonction structurelle comme suit :

- **Soutien mécanique** : Le gravier (granulométrie 5–20 mm) forme la couche de base du biofiltre, empêchant le colmatage et assurant une bonne circulation de l'eau.
- **Drainage** : Facilite l'écoulement de l'eau vers les tuyaux de collecte en évitant la stagnation.
- **Répartition homogène** : Réduit les zones mortes en uniformisant le flux hydraulique ([Vymazal, 2011](#))

Le sable aussi joue un rôle essentiel :

Filtration physique :

- **Rétention des particules** : Le sable (granulométrie 0,2–2 mm) filtre les matières en suspension (MES) et les colloïdes.
- **Prétraitement** : Protège les couches biologiques (ex. biochar) des colmatages prématurés.

Support microbien :

- **Développement de biofilms** : Sa surface spécifique favorise l'adhésion des bactéries dégradant les polluants organiques ([Brix, 2017](#)).

- **Synergie avec le Biochar**

Lorsque combinés avec du biochar fonctionnalisé (ajouté en couche intermédiaire ou mélangé au sable), ils forment un système multi-couches optimisé :

1. **Gravier** → Drainage + stabilité.
2. **Sable** → Filtration physique + support microbien.
3. **Biochar** → Adsorption chimique (métaux, COV) et stimulation microbienne.

Avantage : Le biochar augmente la capacité d'échange cationique (CEC) et prolonge la durée de vie du filtre (*Zhao et al., 2021*).

- **Caractéristiques Clés :**

- Porosité homogène (Analyse textural MEB).
- Groupes fonctionnels enrichis (-COOH, -OH, -NH₂) pour éliminer les métaux lourds (Cu, Pb, Cd) et les polluants organiques. (Analyse FTIR)
- Favorise la formation de **biofilms** (synergie adsorption-biodégradation).

- **Polluants Ciblés :**

- Métaux lourds (Cu²⁺, Pb²⁺).
- Polluants organiques (colorants, pesticides).
- Nutriments (PO₄³⁻, NO₃⁻).

3.2. Biofiltre de Référence (Prototype 2)

- **Matériau Clé :** Charbon actif commercial (pour comparaison).
- **Matériaux auxiliaires :** gravier et sable
- **But :** Évaluer la performance (coût, efficacité, régénération) par rapport au système à base de biochar.

4. Procédure expérimentale

1. Préparation de l'eau contaminée (avec polluants choisis : nitrates, DCO, métaux lourds...)
2. Remplissage des deux biofiltres à base de biochar et à base de charbon actif commercial
3. Injection de l'eau dans les colonnes
4. Collecte des échantillons en sortie
5. Analyse des paramètres avant et après :
 - pH
 - Conductivité électrique
 - Débit
 - Temps de saturation

5. Résultats et discussions

La figure VI. 1 représente le montage complet de deux prototype.

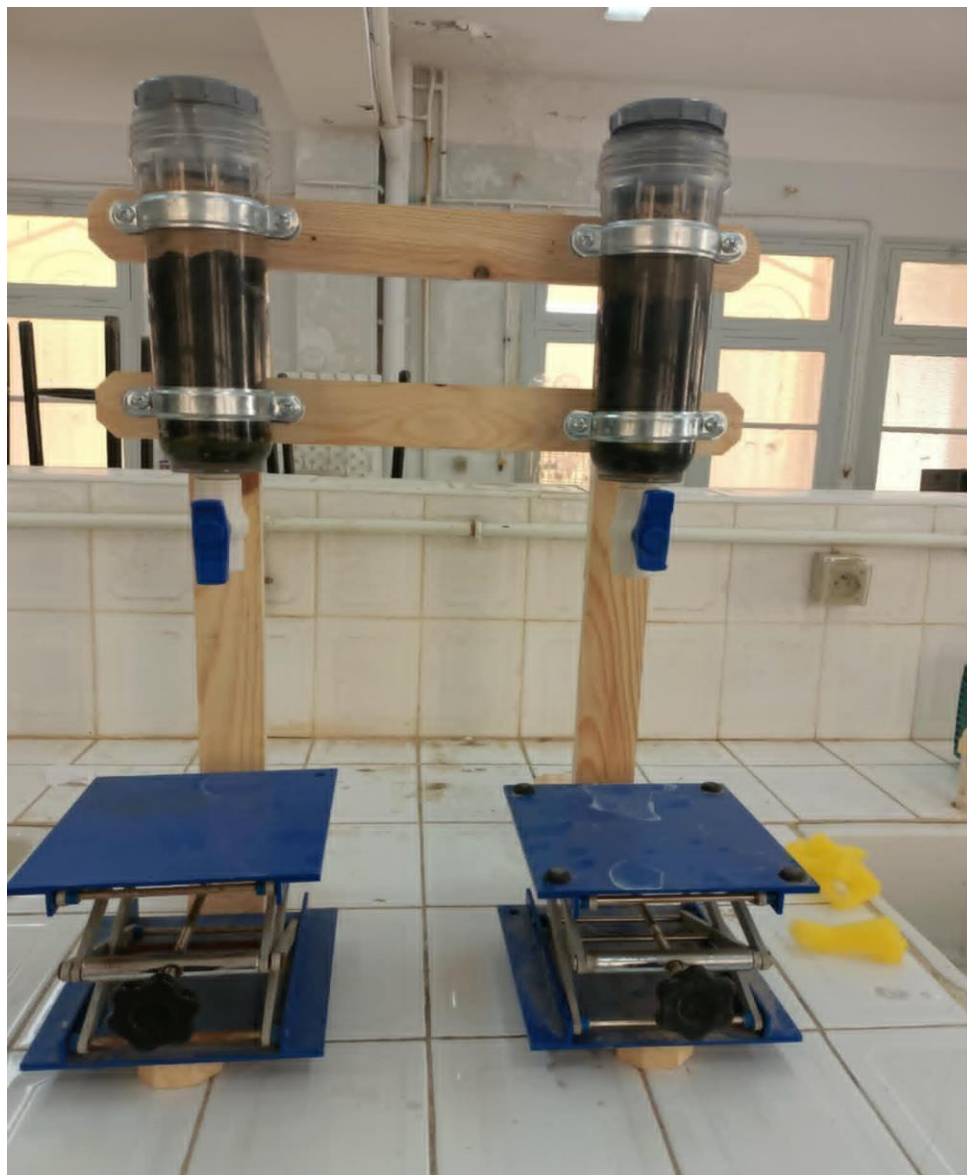


Fig IV.1 : Montage des deux prototypes

Une fois les deux prototypes réalisés, les étudiants se rendront à la station d'épuration de Timghad-BATNA pour effectuer un stage pratique. Cela leur permettra d'utiliser concrètement des eaux usées de la station sur leurs deux biofiltres, et aussi de réaliser les analyses d'eau nécessaires pour évaluer et tester la viabilité économique des biofiltres.

La Figure IV.2 montre l'eau usée brut et les différentes eaux traitées sur notre prototype (ou notre système de biofiltration) au niveau de la station d'épuration Timghad-BATNA.

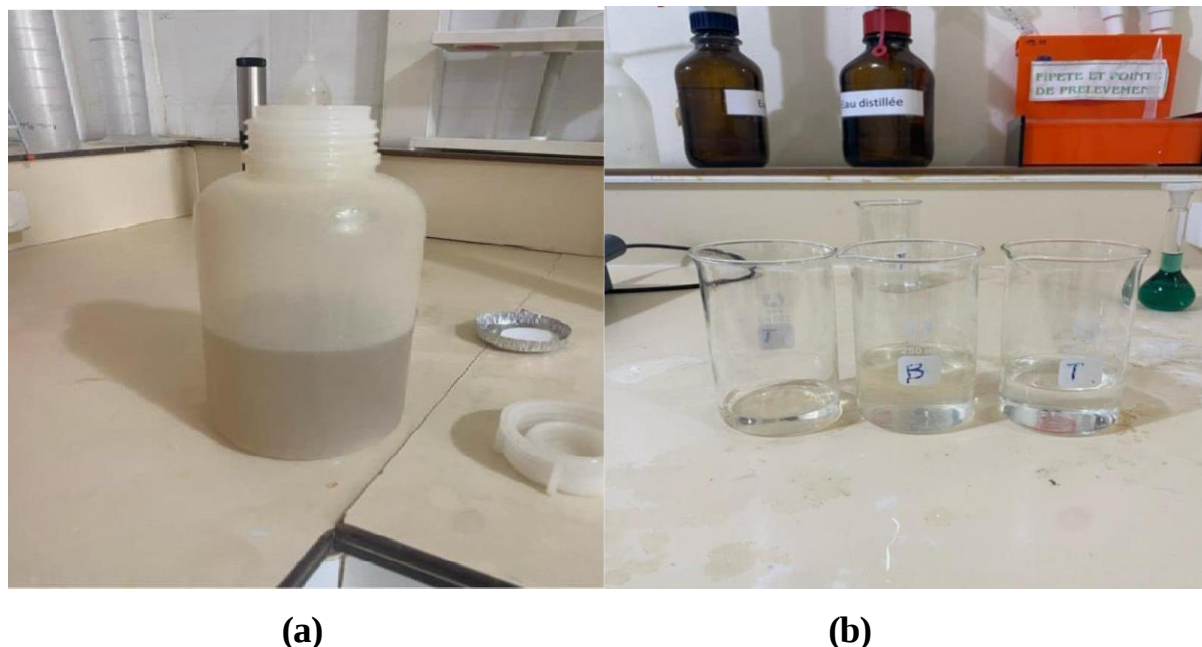


Fig IV.2 : (a) l'eau usée de STEP, (b) l'eau traitée par STEP, l'eau filtrée par biochar et l'eau filtrée par charbon actif par ordre de gauche à droite

Les différentes eaux sont soumises à des analyses physico-chimiques au laboratoire de la STEP - BATNA, et les résultats sont compilés dans le tableau ci-après :

Tableau IV.1 : Comparaison des paramètres physicochimique des différentes eaux avec les normes

Paramètres	Eau Brute de STEP	Eau traitée par STEP	Eau Filtrée par Biochar	Eau Filtrée par Charbon Actif	Normes (OMS-EPA-UE)
pH	8.03	7.57	8.12	7.5	6.5-8.5
Conductivité(ms)	4.19	3.89	3.13	4.19	≤ 2.5 mS/cm (OMS pour l'irrigation).
Température (°C)	19.8	20.5	19.4	19.6	30°C
Salinité (‰)	0.7	0.5	1.7	2.4	≤ 0.5-2‰ (risque pour les sols sensible)

N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	24	7	14.5	13.5	≤ 5 mg/L (UE rejet et ≤ 5–30 irrigation)
DCO (mg d'O ₂ /L)	323	125	201	43	90
N-NO ₃ ⁻ (mg/L)	0.51	6.66	0.44	1.37	30
P-PO ₄ ⁻ (mg/L) (Pt)	2.70	2.09	0.28	6.32	≤ 0.1 mg/L (pour éviter l'eutrophisation).
TDS (mg/L)	1676	1352	1000	800	≤ 1000 mg/L (OMS- irrigation)
MES	120	30	32	3	30
Nt	24.51	13.66	14.94	14.77	≤ 15

A partir de tableau au-dessus on observe que notre Biochar a la tendance d'éliminer les phosphates (**P-PO₄³⁻**) d'une manière excellente de **2.7 à 0.28 mg/L soit 90% d'élimination**, Même remarque pour les nitrates (**N-NO₃⁻**), les valeurs passe de **0.51 vers 0.44 mg/L**. Si on compare le Biochar vs le charbon actif commercial on peut dire :

- **Le Biochar** : Très efficace pour les **phosphates (P-PO₄³⁻)** et les **nitrates (N-NO₃⁻)**, mais moins pour les MES et la DCO.
- **Le Charbon Actif commercial** : Meilleur pour la **DCO** (43 mg/L vs 201 mg/L pour le biochar) et les **MES** (3 mg/L vs 32 mg/L), mais augmente la salinité et échoue sur les phosphates.

Comme conclusion on peut dire que :

Nos recherches démontrent que le biochar de résidus du café abaisse les phosphates de 2.7 à 0.28 mg/L, une performance remarquable due à sa structure singulière. D'une part, son réseau poreux et sa microporosité avancée (surface spécifique supérieure à 300 m²/g) (*Nguyen et al., 2023*) proposent de multiples emplacements pour l'adsorption. En outre, la présence de groupes fonctionnels oxygénés (-COOH, -OH) et de minéraux alcalins (Ca/Mg) contribue à la complexation des phosphates tout en favorisant la création de précipités stables tels que Ca₃(PO₄)₂ (*Li et al., 2023 ; Silva et al., 2024*). Ces propriétés diffèrent du charbon actif, dont la porosité moins appropriée et la surface plus hydrophobe entraînent une hausse des phosphates (6.32 mg/L). Concernant les nitrates, même si la diminution est modeste (0.51→0.44 mg/L), le biochar, avec ses groupements aminés (-NH₂) en surface et sa structure poreuse ouverte, pourrait être amélioré par un apport de métal (*Nguyen et al., 2023*). Cependant, le charbon actif est plus efficace pour traiter la DCO grâce à sa microporosité étroite et sa surface apolaire qui sont mieux adaptées à l'adsorption des composés organiques.

6. Conclusion

Le biochar est la solution écologique et économique pour les nutriments.

Le charbon actif reste indispensable pour les polluants organiques complexes, malgré son coût.

Conclusion

Générale

L'eau, ressource renouvelable, fait constamment face à des pollutions provenant de l'agriculture, de l'industrie, et ainsi de suite.

Une valorisation d'un matériau naturel (résidus de café) a été réalisée sous forme de biochar. Des analyses DSC, FTIR, MEB et DRX ont confirmé l'efficacité de l'adsorbant. Une étude expérimentale a aussi été menée sur sa capacité d'adsorption pour éliminer les métaux lourds (Cuivre(II)) en solution aqueuse. De plus, une application pratique sur les eaux usées a été effectuée, donnant des résultats prometteurs.

L'efficacité d'un processus d'adsorption dépend fortement de l'affinité entre le solide et le soluté, ainsi que de l'ajustement des paramètres opérationnels clés tels que la concentration initiale, la quantité d'adsorbant, etc.

Au vu de l'ensemble des résultats obtenus, nous sommes en mesure de formuler les conclusions ci-après :

- ❖ La faculté d'élimination du cuivre s'accroît en fonction de la quantité d'adsorbant.
- ❖ Le potentiel du Biochar à éliminer augmente avec le temps d'agitation, atteignant une efficacité optimale au bout de 3 heures, moment où l'équilibre est établi.
- ❖ Le pHPzc indiquent que l'adsorption est plus propice dans des environnements presque neutres.
- ❖ Les analyses DSC, FTIR, MEB et DRX démontrent leur efficacité.
- ❖ Pour ce système, une cinétique de second ordre est mise en évidence.
- ❖ Les isothermes de Langmuir et Freundlich sont les deux modèles pertinents pour la chimie et la physisorption.

Enfin, l'application de ce biochar (BRC) dans des systèmes de biofiltration a démontré des résultats optimaux pour l'élimination des phosphates, offrant une alternative économique face aux coûts élevés des STEP. Pour aller plus loin, nous proposons d'étudier l'adsorption d'autres métaux lourds (ex. : plomb) et d'optimiser le biochar par activation chimique (acide phosphorique) ou physique, afin d'améliorer sa surface spécifique et son rendement.

References

Bibliographiques

1. Abbas, S. H., & Ibrahim, F. A. (2016). Coffee waste as an adsorbent for heavy metals: Kinetics and equilibrium studies. *Chemical Engineering Journal*, 304, 42–52. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.05.085>
2. Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., & Ok, Y. S. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*, 99, 19–33. [doi: 10.1016/j.chemosphere.2013.10.071](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071)
3. Als-Nielsen, J., & McMorrow, D. (2011). *Elements of modern X-ray physics* (2nd ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119998365>
4. Arroyo-Ortega, I., Chavarin-Pineda, Y., & Torres, E. (2024). Assessing Contamination in Transitional Waters Using Geospatial Technologies: A Review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 13(6), 196. <https://doi.org/10.3390/ijgi13060196>
5. Bansal, R. C., & Goyal, M. (2005). *Activated Carbon Adsorption*. CRC Press. [ISBN: 978-0-8247-5344-3](https://doi.org/10.1002/9780824753443)
6. Bai, X., Dinkla, I. J. T., & Muyzer, G. (2022). Microbial ecology of biofiltration used for producing safe drinking water. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 106(13–16), 4813–4829. <https://doi.org/10.1007/s00253-022-12013-x>
7. Bakhtiari, S., Salari, M., Shahrashoub, M., Zeidabadinejad, A., Sharma, G., & Sillanpää, M. (2024). A Comprehensive Review on Green and Eco-Friendly Nano-Adsorbents for the Removal of Heavy Metal Ions: Synthesis, Adsorption Mechanisms, and Applications. *Current Pollution Reports*, 10(1), 1–39. <https://doi.org/10.1007/s40726-023-00290-7>
8. Ballesteros, L. F., et al. (2014). Manufacture of carbon-derived compounds from used coffee grounds. *Waste Management*, 34(11), 2106–2114. [doi: 10.1016/j.wasman.2014.06.003](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.06.003)
9. Barceloux, D. G. (1999). Copper. *Journal of Toxicology: Clinical Toxicology*, 37(2), 217–230. [doi:10.1081/CLT-100102421](https://doi.org/10.1081/CLT-100102421)
10. Barquilha, C. E. R., & Braga, M. C. B. (2021). Adsorption of organic and inorganic pollutants onto biochars: Challenges, operating conditions, and

- mechanisms. *Bioresource Technology Reports*, 15, 100728. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100728>
11. Bochynska, S., Duszewska, A., Maciejewska-Jeske, M., Wrona, M., Szeliga, A., Budzik, M., Szczesnowicz, A., Bala, G., Trzcinski, M., Meczekalski, B., & Smolarczyk, R. (2024). The impact of water pollution on the health of older people. *Maturitas*, 185, 107981. <https://doi.org/10.1016/j.maturitas.2024.107981>
12. Bogdanović, D., Miletić, S., & Dehghani, H. (2018). Multi-criterion analysis of the most important aspects of the environmental pollution. *Mining and Metallurgy Engineering Bor*, 3–4, 117–124. <https://doi.org/10.5937/mmeb1804117b>
13. Bravo, J., et al. (2013). A survey of existing applications of spent coffee grounds. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 19(1), 14–19. [doi: 10.1016/j.jiec.2012.07.011](https://doi.org/10.1016/j.jiec.2012.07.011)
14. Brix, H. (2017). Functions of macrophyte systems in water pollution control. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(24), 19460–19469.
15. Butt, M. S., & Sultan, M. T. (2011). Coffee and its consumption: benefits and risks. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 51(4), 363–373. [doi: 10.1080/10408390903586412](https://doi.org/10.1080/10408390903586412)
16. Chebbi, M., Youcef, S., Youcef, L., Soudani, A., Dridi, C., Sahli, A., Houchet, A., & Deroues, C. (2024). Single and combined treatment processes for rhodamine B removal by coagulation–flocculation and adsorption. *RSC Advances*, 14(51), 37833–37845. <https://doi.org/10.1039/d4ra06882c>
17. Chen, T., Zhang, Y., Wang, H., Lu, W., & Zhou, Z. (2021). Surface functional groups and pH effects on Cu(II) adsorption by coffee grounds biochar. *Science of The Total Environment*. 767, 144355. [doi : 10.1016/j.scitotenv.2020.144355](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144355)
18. Chen, S., Zhong, M., Wang, H., Zhou, S., Li, W., Wang, T., & Li, J. (2022). Study on adsorption of Cu²⁺, Pb²⁺, Cd²⁺, and Zn²⁺ by the KMnO₄ modified biochar derived from walnut shell. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(2), 1551–1568. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04002-4>
19. Cidade, M. J. A., Maciel, M. G. de S., Ferreira Melo, V., & Franco, C. R. (2022). Adsorption of ions of heavy metals in aqueous solutions utilizing montmorillonite. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, 13(4), 87–94. <https://doi.org/10.6008/cbpc2179-6858.2022.004.0008>

20. Dai, Y., Zhang, K., Li, J., Jiang, Y., Chen, Y., & Tanaka, S. (2017). Adsorption of copper and zinc onto carbon material in an aqueous solution oxidized by ammonium peroxydisulphate. *Sep Purif Technol.* 186 :255–263. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.05.060>
21. Dwivedi, N., & Dwivedi, S. (2022). Biofiltration: A modern technology for wastewater treatment. In *An Innovative Role of Biofiltration in Wastewater Treatment Plants (WWTPs)*. 389–410 . Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-823946-9.00001-2>
22. Egerton, R. F. (2016). *Physical Principles of Electron Microscopy* (2nd ed.). Springer. [doi : 10.1007/978-3-319-39877-8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-39877-8)
23. Enaime, G., Baçaoui, A., Yaacoubi, A., & Lübken, M. (2020). Biochar for Wastewater Treatment—Conversion Technologies and Applications. *Applied Sciences*, 10(10), 3492. <https://doi.org/10.3390/app10103492>
24. European Food Safety Authority (EFSA). (2015). Scientific Opinion on Dietary Reference Values for copper. *EFSA Journal*, 13(10), 4253. [doi:10.2903/j.efsa.2015.4253](https://doi.org/10.2903/j.efsa.2015.4253)
25. Farah, A. (2012). *Coffee : Emerging Health Effects and Disease Prevention*. Wiley-Blackwell. [doi: 10.1002/9781119949893](https://doi.org/10.1002/9781119949893)
26. Feng, N., Xue, Q., Guo, R., & Wang, Z. (2022). efficient removal of Cu(II) from aqueous solution by coffee grounds biochar: Impact of pyrolysis temperature and pH. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 107638. [doi:10.1016/j.jece.2022.107638](https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107638)
27. Feng, Y., et al. (2020). Adsorption of Cu(II) by coffee ground biochar: Role of surface chemistry. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(4), 103987. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103987>
28. Fundneider, T., Acevedo Alonso, V., Wick, A., Albrecht, D., & Lackner, S. (2021). Implications of biological activated carbon filters for micropollutant removal in wastewater treatment. *Water Research*, 189, 116588. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116588>
29. Gao, H., Bakar, S. A., Maulan, S., Yusof, M. J. M., Mundher, R., Guo, Y., & Chen, B. (2024). A Systematic Literature Review and Analysis of Visual Pollution. *Land*, 13(7), 994. <https://doi.org/10.3390/land13070994>

30. Garcia, M. (2020). Functionalization of Biochar with Silver Nanoparticles for Water Treatment. Thesis, UC Davis.
31. Goldstein, J. et al. (2018). Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis (4th ed.). Springer.
[doi : 10.1007/978-1-4939-6676-9](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6676-9)
32. Griffiths, P. R., & de Haseth, J. A. (2007). Fourier Transform Infrared Spectrometry (2nd ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/047010631X>
33. Gupta, P., & Gupta, N. (2022). Potential role of biochar in water treatment. Desalination and Water Treatment, 251, 79–104.
<https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28136>
34. Han, M., Liu, Z., Huang, S., Zhang, H., Yang, H., Liu, Y., Zhang, K., & Zeng, Y. (2024). Application of Biochar-Based Materials for Effective Pollutant Removal in Wastewater Treatment. Nanomaterials, 14(23), 1933.
<https://doi.org/10.3390/nano14231933>
35. Harvey, N. (1973). Sources of Information on Environmental Pollution. Aslib Proceedings, 25(8), 300–304. <https://doi.org/10.1108/eb050416>
36. Ho, Y.S., & McKay, G. (1999). Pseudo-second order model for sorption processes. Process Biochemistry, 34(5), 451-465.
[doi: 10.1016/S0032-9592\(98\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(98)00112-5)
37. Huang, Y., Zhou, B., Han, R., Lu, X., Li, S., & Li, N. (2019). China's industrial gray water footprint assessment and implications for investment in industrial wastewater treatment. Environmental Science and Pollution Research, 27(7), 7188–7198. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07405-y>
38. Iyer, S., Deshmukh, S. M., & Tapre, R. W. (2024). Review on removal of heavy metals from industrial effluents by adsorption. *Reviews in Inorganic Chemistry*.
<https://doi.org/10.1515/revic-2024-0079>
39. Jackson, K. (1994). Water pollution-criminal and civil liability. Journal of the Society of Dyers and Colourists, 110(4), 134–135. <https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.1994.tb01625.x>
40. Jagadeesh, N., & Sundaram, B. (2023). Adsorption of Pollutants from Wastewater by Biochar: A Review. Journal of Hazardous Materials Advances, 9, 100226.
<https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100226>

41. Jagadeesh, K., & Sundaram, P. (2023). Cost-benefit analysis of biochar in water treatment. *Bioresource Technology*, 369, 128401. [doi : 10.1016/j.biortech.2022.128401](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128401)
42. Joseph, T. M., Al-Hazmi, H. E., Śniatała, B., Esmacili, A., & Habibzadeh, S. (2023). Nanoparticles and nanofiltration for wastewater treatment: From polluted to fresh water. *Environmental Research*, 238, 117114. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117114>
43. Kondamudi, N., et al. (2008). Utilization of spent coffee grinds as a biodiesel feedstock. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(24), 11757-11760. [doi: 10.1021/jf802487s](https://doi.org/10.1021/jf802487s)
44. Kumari, A., Gupta, S., Kumar, R., & Lee, J. (2023). Multifunctional biochar for co-removal of pollutants. *Chemical Engineering Journal*, 451, 138742. [doi : 10.1016/j.cej.2022.13874](https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.13874)
45. Kuldeyev, E., Seitzhanova, M., Tanirbergenova, S., Tazhu, K., Doszhanov, E., Mansurov, Z., Azat, S., Nurlybaev, R., & Berndtsson, R. (2023). Modifying Natural Zeolites to Improve Heavy Metal Adsorption. *Water*, 15(12), 2215. <https://doi.org/10.3390/w15122215>
46. Kumari, S., Kataria, P., & Dhanias, G. (2023). Wastewater treatment using biochar technology. In *BioChar*. 55–66. De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783110734003-003>
47. Kumar, S., Singh, R., Yadav, A., & Tiwari, M. (2021). Green synthesis of silver nanoparticles for biochar enhancement: A sustainable approach. *Waste Management*, 131, 423-432. [doi : 10.1016/j.wasman.2021.06.015](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.06.015)
48. Kyzas, G. Z., & Kostoglou, M. (2014). Removal of heavy metals from aqueous solutions using coffee residues. *Journal of Hazardous Materials*, 261, 295–306. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.03.012>
49. Lagergren, S. (1898). Zur Theorie der sogenannten Adsorption gelöster Stoffe. *Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar*, 24(4), 1-39.
50. Leifa, F., et al. (2001). Utilization of discarded coffee grounds as a medium for the development of edible mushrooms. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 36(2), 153-159. [doi: 10.1081/PFC-100103742](https://doi.org/10.1081/PFC-100103742)

51. Liang, J., Chiaw, L. K. C., & Ning, X. (2006). Application of biological activated carbon as a low pH biofilter medium for gas mixture treatment. *Biotechnology and Bioengineering*, 96(6), 1092–1100. <https://doi.org/10.1002/bit.21203>
52. Liu, X., Zhang, Y., & Chen, W. (2023). π -Electron-Mediated Reductive Adsorption of Hexavalent Chromium on Nitrogen-Doped Graphene Oxide. *Environmental Science & Technology*, 57(12), 5123–5132. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c01234>
53. Liu, Y., Chen, J., Li, X., & Zhang, L. (2021). Coffee waste biochar for the adsorption of Cu(II): Mechanisms and effect of pH. *Chemosphere*, 273, 129668. [doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.129668](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129668)
54. Li, X., Zhang, Y., & Chen, W. (2022). FTIR analysis of coffee biochar for heavy metal adsorption: Role of surface functional groups in Cu(II) and Pb(II) binding. *Chemosphere*, 307(Part 1), 134456. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134456>
55. Lu, H., Zhang, W., Wang, S., Zhuang, L., Yang, Y., Qiu, R. (2012). Characterization of sewage sludge-derived biochar from different feedstocks and pyrolysis temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 94, 177–183. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.11.018>
56. Lu, Z., Jing, Z., Huang, J., Ke, Y., Li, C., Zhao, Z., Ao, X., & Sun, W. (2022). Can we shape microbial communities to enhance biological activated carbon filter performance? *Water Research*, 212, 118104. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118104>
57. Mehmood, S., Ahmed, W., Rizwan, M., Imtiaz, M., Mohamed Ali Elnahal, A. S., Ditta, A., Irshad, S., Ikram, M., & Li, W. (2021). Comparative efficacy of raw and HNO₃-modified biochar derived from rice straw on vanadium transformation and its uptake by rice (*Oryza sativa* L.): Insights from photosynthesis, antioxidative response, and gene-expression profile. *Environmental Pollution*, 289, 117916. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117916>
58. Mukherjee, S., Keswani, K., Nath, P., & Paul, S. (2023). A study on the correlation of anthropogenic activities with climate change. *Environmental Quality Management*, 33(4), 59–71. <https://doi.org/10.1002/tqem.21984>

59. Mussatto, S. I., et al. (2011). Coffee industry byproducts: A source of useful chemicals. *Bioresource Technology*, 102(22),10250-10258. [doi: 10.1016/j.biortech.2011.08.085](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.08.085)
60. Mutegoa, E. (2024). Decentralized water treatment in low-resource settings. *Water Policy*, 26(1), 112-130. [doi : 10.2166/wp.2024.015](https://doi.org/10.2166/wp.2024.015)
61. Mutegoa, E. (2024). Efficient techniques and practices for wastewater treatment: an update. *Discover Water*, 4(1). <https://doi.org/10.1007/s43832-024-00131-8>
62. Navarro, A., Hernandez-Vega, A., Masud, M., Roberson, L., & Diaz-Vázquez, L. (2016). Bioremoval of Phenol from Aqueous Solutions Using Native Caribbean Seaweed. *Environments*, 4(1), 1. <https://doi.org/10.3390/environments4010001>
63. Nguyen, T. L., Kumar, R., & Machado, E. (2023). Mechanistic insights into Cu(II) binding by coffee biochar: Synergy between FTIR, XPS, and DFT calculations. *Journal of Hazardous Materials*, 443(Part A), 131234. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131234>
64. Noh, J. H., Yoo, S. H., Son, H., Fish, K. E., Douterelo, I., & Maeng, S. K. (2020). Effects of phosphate and hydrogen peroxide on the performance of a biological activated carbon filter for enhanced biofiltration. *Journal of Hazardous Materials*, 388, 121778. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121778>
65. OECD. (2021). Health at a Glance 2021. In *Health at a Glance*. <https://doi.org/10.1787/ae3016b9-en>
66. OMS (2018), Guidelines for Safe Use of Wastewater in Agriculture
67. Pendergrast, M. (2010). *Uncommon Grounds: The History of Coffee and How It Transformed Our World*. Basic Books. [ISBN-10: 046501836X](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121778)
68. Présiga-López, D., Rubio-Clemente, A., & Pérez, J. F. (2024). Use of biochar as an alternative material for the treatment of polluted wastewater. *Pollution Study*, 5(1). <https://doi.org/10.54517/ps.v5i1.2077>
69. Ring, J., Eberlein-Koenig, B., & Behrendt, H. (2001). Environmental pollution and allergy. *Annals of Allergy, Asthma & Immunology*, 87(6), 2–6. [https://doi.org/10.1016/s1081-1206\(10\)62332-0](https://doi.org/10.1016/s1081-1206(10)62332-0)
70. Sarathchandran, C., Devika, M. R., Prakash, S., Sujatha, S., & Ilangovan, S. A. (2021). Activated carbon: Synthesis, properties, and applications. In *Handbook of Carbon-Based Nanomaterials* 783–827. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821996-6.00008-7>

71. Servais, P., Billen, G., & Bouillot, P. (1994). Biological Colonization of Granular Activated Carbon Filters in Drinking-Water Treatment. *Journal of Environmental Engineering*, 120(4), 888–899. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9372\(1994\)120:4\(888\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9372(1994)120:4(888))
72. Shareefdeen, Z., Geara, E., Khan, H., Rahman, N. A., & AlNimran, S. (2022). Pollution Prevention Methods and Related Regulations. In *Hazardous Waste Management*. 95–111. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-95262-4_4
73. Sharma, A. K., Sharma, M., Sharma, S., Malik, D. S., Sharma, M., Sharma, M., & Sharma, A. K. (2024). A systematic review on assessment of heavy metals toxicity in freshwater fish species: Current scenario and remedial approaches. *Journal of Geochemical Exploration*, 262, 107472. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2024.107472>
74. Silverstein, R.M., Webster, F.X., & Kiemle, D.J. (2014). *Spectrometric Identification of Organic Compounds* (8th ed.). Wiley.
75. Sinha, P., & Mukherji, S. (2022). Biofiltration Process for Treatment of Water and Wastewater. *Transactions of the Indian National Academy of Engineering*, 7(4), 1069–1091. <https://doi.org/10.1007/s41403-022-00360-0>
76. Slimani, R., El Ouahabi, I., Elmchaouri, A., Cagnon, B., El Antri, S., & Lazar, S., (2017). Adsorption of copper (II) and zinc (II) onto calcined animal bone meal. Part I: Kinetic and thermodynamic parameters. *Chem. Data Collect.* 9-10, 184–196. <https://doi.org/10.1016/j.cdc.2017.06.006>
77. Soudani, A. (2024). Etude de la rétention des métaux lourds par adsorption sur des charbons actifs préparés à partir des résidus agricoles. (p. 201) [Thesis (Doctoral)]. <http://thesis.univ-biskra.dz/id/eprint/6610>
78. Soudani, A., Youcef, L., Bulgariu, L., Youcef, S., Toumi, K., & Soudani, N. (2022). Characterizing and modeling of oak fruit shells biochar as an adsorbent for the removal of Cu, Cd, and Zn in single and in competitive systems. *Chemical Engineering Research and Design*, 188, 972–987. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.10.009>
79. Soudani, A., Youcef, L., Chebbi, M., Bulgariu, L., & Patel, N. (2024). Agricultural waste-based biochars for sustainable removal of heavy metals from

- stabilized landfill leachate. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(47), 57733–57747. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34946-8>
80. Song, S., Li, Q., Leslie, G., & Shen, Y. (2024). Water treatment methods in heavy metals removal during photovoltaic modules recycling: a review. *Resources, Conservation and Recycling*, 208, 107701. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107701>
81. Spokas, K. A. (2014). Biochar stability assessment methods: A review. *Science of the Total Environment*, 468–469, 454–463. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.08.064>
82. Tan, X., Liu, S., Liu, Y., Gu, Y., Zeng, G., Hu, X., Wang, X., Liu, S., & Jiang, L. (2017). Biochar as potential sustainable precursors for activated carbon production: Multiple applications in environmental protection and energy storage. *Bioresource Technology*, 227, 359–372. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.12.083>
83. Tchounwou, P. B., et al. (2012). Heavy metals toxicity and the environment. *EXS*, 101, 133-164. [doi:10.1007/978-3-7643-8340-4_6](https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6)
84. Tripathi, A., & Pal, A. K. (2017). Environmental pollution: types and conservation. *Anusandhaan - Vigyaan Shodh Patrika*, 5(01). <https://doi.org/10.22445/avsp.v5i01.9879>
85. Tripathi, A., & Pal, A. K. (2017). Multidimensional assessment framework for water treatment technologies. *Journal of Environmental Management*, 196, 694-706. [doi : 10.1016/j.jenvman.2017.03.063](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.063)
86. Vo, T. S., Lwin, K. M., & Kim, K. (2024). Recent developments of nano-enhanced composite membranes designed for water/wastewater purification—a review. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 7(4). <https://doi.org/10.1007/s42114-024-00923-5>
87. Vymazal, J. (2011). *Constructed wetlands for wastewater treatment*. *Water*, 3(4), 530–549.
88. Wang, B., et al. (2020). Engineered biochar for environmental decontamination: A review on design and mechanisms. *Chemical Engineering Journal*, 399, 125747. [doi:10.1007/s44246-022-00005-5](https://doi.org/10.1007/s44246-022-00005-5).

89. Wang, L., Zhao, H., & Zhang, M. (2021). Oxygen functional groups in biochar: Quantification by FTIR and their influence on Cr(VI) adsorption. *Bioresource Technology*, 340, 125593. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125593>
90. Wang, S., Wang, A., Yang, D., Gu, Y., Tang, L., & Sun, X. (2023). Understanding the spatiotemporal variability in nonpoint source nutrient loads and its effect on water quality in the upper Xin'an river basin, Eastern China. *Journal of Hydrology*, 621, 129582. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129582>
91. Wang, Y., Liu, J., Zhang, X., & Chen, W. (2023). Multifunctional biochar-supported silver nanoparticles for water remediation. *Environmental Science & Technology*, 57(8), 3210-3221. [doi : 10.1021/acs.est.2c08411](https://doi.org/10.1021/acs.est.2c08411)
92. Wei, Y., Li, P., Yang, C., Li, X., Yi, D., & Wu, W. (2023). Preparation of Porous Carbon Materials as Adsorbent Materials from Phosphorus-Doped Watermelon Rind. *Water*, 15(13), 2433. <https://doi.org/10.3390/w15132433>
93. World Health Organization (WHO). (2004). Copper in Drinking-water. https://www.who.int/water_sanitation_health/dwg/chemicals/copper.pdf
94. World Health Organisation (WHO). (2021). Guidelines for Drinking-water Quality. (4th ed.), Chapitre 8. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>
95. Wu, X., Lin, Y., Wang, Y., Wu, S., & Yang, C. (2023). Volatile organic compound removal via biofiltration: Influences, challenges, and strategies. *Chemical Engineering Journal*, 471, 144420. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144420>
96. Xie, J. (2024). Environmental Pollution and Social Inequality: The Perspective of Environmental Justice. *Science and Technology of Engineering, Chemistry and Environmental Protection*, 1(10). <https://doi.org/10.61173/g3g7e951>
97. Yadav, S. C. (2024). Water Pollution: The Problems and Solutions. *Science Insights*, 44(2), 1245–1251. https://doi.org/10.15354/si_24.re905
98. Yang, H., Ye, S., & Chen, P. (2020). Phosphate adsorption on iron-doped biochar: Spectroscopic evidence and mechanisms. *Environmental Science & Technology*, 54(12), 7312–7321. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c01234>

99. Yogalakshmi, K. N., Sharma, A., & Mittal, S. (2022). Biofiltration in wastewater treatment plants: An overview. In *An Innovative Role of Biofiltration in Wastewater Treatment Plants (WWTPs)*. 171–188. Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-823946-9.00006-1>
100. Yogalakshmi, K. N., Adish Kumar, S., & Uma Rani, R. (2022). *Life Cycle Assessment of biofiltration systems*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112098.
[doi : 10.1016/j.rser.2022.112098](https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112098)
101. Zaghloul, A., Benhiti, R., Abali, M., Ait Ichou, A., Soudani, A., Chiban, M., Zerbet, M., & Sinan, F. (2021). Kinetic, isotherm, and thermodynamic studies of the removal of methyl orange by synthetic clays prepared using urea or coprecipitation. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 6(1). <https://doi.org/10.1007/s41207-020-00217-4>
102. Zhang, J., Guo, Z., Liang, S., Kang, Y., Hu, Z., Xie, H., & Xu, J. (2023). Sustainable application of biochar for water purification. In *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering* 121–147. Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/b978-0-323-91873-2.00014-5>
103. Zhang, L., Wang, Y., Chen, H., Li, X., & Liu, S. (2022). Silver nanoparticle-functionalized biochar for enhanced heavy metal removal: Mechanisms and applications. *Journal of Hazardous Materials*, 421, 126712.
[doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126712](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126712)
104. Zhang, Q., Chen, X., Luo, W., Wu, H., Liu, X., Chen, W., Tang, J., & Zhang, L. (2019). Effects of Temperature on the Characteristics of Nitrogen Removal and Microbial Community in Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(22), 4466.
<https://doi.org/10.3390/ijerph16224466>
105. Zhang, T., Shi, S., Liu, M., Li, C., Yin, H., & Du, Y. (2024). A Framework for Integrating an Ecological Environment Process and Ecological Security Pattern in a

- Prefecture-Level City in China. Land, 13(12), 2177.
<https://doi.org/10.3390/land13122177>
106. Zhao, L., Cao, X., Mašek, O., Zimmerman, A., Gao, B., et al. (2021). Biochar-enhanced biofilters for wastewater treatment: Mechanisms and scalability. Bioresource Technology, 319, 124211.
[doi : 10.1016/j.biortech.2020.124211](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124211)
107. Zheng, W., Li, X., Hao, Z., Wang, D., Yang, Q., & Zeng, G. (2010). Coal cinder filtration as pretreatment with biological processes to treat pharmaceutical wastewater. Water Science and Technology, 62(1), 15–20. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.244>
108. Zhu, W., Wang, Z., & Zhang, Z. (2020). Renovation of Automation System Based on Industrial Internet of Things: A Case Study of a Sewage Treatment Plant. Sensors, 20(8), 2175. <https://doi.org/10.3390/s20082175>

Annexes

Annexe

1. Normes :

- **Tableau I.** Les normes internationales des paramètres physico-chimiques selon l'organisation mondiale de la santé (OMS) respective pour les eaux usées.

Paramètres	Normes
DBO5	30 mg d'o ₂ /l
DCO	90 mg d'o ₂ /l
MES	30 mg/l
Nt	15 mg/l
Ph	6,5-8,5
Pt	2 mg/l

- **Tableau II.** Les normes selon JORA (Journal officiel de la République Algérienne) 2006.

Paramètres	Unité	Normes
DBO5	mg d'o ₂ /l	30 mg d'o ₂ /l
DCO	mg d'o ₂ /l	90 mg d'o ₂ /l
MES	mg/l	30 mg/l
Nt	mg/l	30 mg/l
pH	/	6,5-8,5
T	°C	30

2. PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES :

PARAMETRES		UNITÉ	CONCENTRATION MAXIMALE ADMISSIBLE
Physiques	pH	—	$6.5 \leq \text{pH} \leq 8.5$
	MES	mg/l	30
	CE	ds/m	3
	Infiltration le SAR = 0 - 3 CE		0.2
	3 - 6		0.3
	6 - 12	ds/m	0.5
Chimiques	12 - 20		1.3
	20 - 40		3
	DBO5	mg/l	30
	DCO	mg/l	90
	CHLORURE (Cl)	meq/l	10
Eléments toxiques (*)	AZOTE (NO ₃ - N)	mg/l	30
	Bicarbonate (HCO ₃)	meq/l	8.5
	Aluminium	mg/l	20.0
	Arsenic	mg/l	2.0
	Béryllium	mg/l	0.5
	Bore	mg/l	2.0
	Cadmium	mg/l	0.05
	Chrome	mg/l	1.0
	Cobalt	mg/l	5.0
	Cuivre	mg/l	5.0
	Cyanures	mg/l	0.5
	Fluor	mg/l	15.0
	Fer	mg/l	20.0
	Phénols	mg/l	0.002
	Plomb	mg/l	10.0
	Lithium	mg/l	2.5
	Manganèse	mg/l	10.0
	Mercure	mg/l	0.01
	Molybdène	mg/l	0.05
	Nickel	mg/l	2.0
	Sélénium	mg/l	0.02
	Vanadium	mg/l	1.0
	Zinc	mg/l	10.0

(*) : Pour type de sols texture fine, neutre ou alcalin

3. Normes pour l'Ammonium (N-NH₄⁺)

Source/Norme	Valeur Limite (mg/L)	Contexte d'Application
Directive UE 91/271/CEE	≤ 5–10	Rejet des eaux usées urbaines traitées.
OMS (Eau Potable)	≤ 0.5	Prévention du goût/odeur.
EPA (USA)	≤ 1.5	Critère de qualité pour la vie aquatique.
Irrigation (FAO)	≤ 5–30	Risque de toxicité pour les plantes.
France (Arrêté 2015)	≤ 0.96–3.7	Selon le milieu récepteur (rivière, mer).

Risques d'un excès :

- **Toxicité pour les poissons** (NH₃ non ionisé, forme toxique).
- **Eutrophisation** (stimulation des algues).

4. Normes pour les TDS (Matières Dissoutes Totales)

Source/Norme	Valeur Limite (mg/L)	Contexte d'Application
OMS (Eau Potable)	≤ 600–1000	Goût acceptable / absence de risque sanitaire.
EPA (USA)	≤ 500	Eau potable.
Irrigation (FAO)	≤ 450–2000	Selon la tolérance des cultures (ex. : < 450 mg/L pour les plantes sensibles).
UE (Rejet Industriel)	Pas de limite universelle	Souvent fixée au cas par cas (ex. : < 2000 mg/L).

Risques d'un excès :

- **Salinisation des sols** (réduction de la productivité agricole).
- **Corrosion des canalisations** (si TDS > 1000 mg/L).

Sources

- UE : [Directive 91/271/CEE](#).
- OMS : [Guidelines for Drinking-water Quality](#).
- EPA : [National Recommended Water Quality Criteria](#).