

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

بكرة في: 28 06 2025

جامعة محمد خيضر - بكرة

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم الكيمياء الصناعية

إذن بإيداع مذكرة الماستر بعد التصحيحات

أنا الممضي أسفله الأستاذ: حمدي إنياس

الرتبة: أستاذ

أستاذ مشرف على مذكرة ماستر - للطلاب (ة): البار نور - سكر ياسمين لبيز

الشعبة: هندسة الطرائق

التخصص: هندسة مرافق البيئة

ب عنوان: Elimination de Nikate sur un biochan

أرخص بإيداع المذكرة المذكورة.

الأستاذ المشرف

رئيس لجنة المناقشة



ملحق القرار رقم: 933 المؤرخ في: 20 جمادى الأولى 1438هـ

الذي يحدد القواعد المتعلقة بالوقاية من السرقة العلمية ومكافحتها

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

مؤسسة التعليم العالي:

نموذج التصريح الشرفي

خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد: مستور يا سعيد الصفة: طالب، أستاذ باحث، باحث دائم: طالب.....

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم: 1100100380... والصادرة بتاريخ 25.06.19

المسجل بكلية العلوم والتكنولوجيا قسم الهندسة الكهربائية

و المكلف بإنجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج ، مذكرة ماستر ، مذكرة ماجستير ، أطروحة

دكتوراه)، عنوانها: Elimination de nitrate sur un biotchan.....

أصرح بشرفي أنني التزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية ومعايير الأخلاقيات المهنية والنزاهة الأكاديمية المطلوبة في إنجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ 2025. 6. 28

إمضاء المعنى





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 d'environnement

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :
Elbarr Nour Elhouda
Soukeur Yasmine Loubna

Le : 03/6 /2025

Elimination de nitrate sur un bio char

Jury :

Dr.	ADJEL Fatima	MCA	Université de Biskra
Dr.	DJEBABRA Siham	MCA	Université de Biskra
Pr.	HAMDI Ines	Pr	Université de Biskra
Dr.	ZIAD Sabrina	Docto rat	Université de Biskra

Année universitaire : 2024- 2025

Dédicace

*À ma chère maman, battement de mon cœur et source de ma force,
À mon cher père, fierté de ma vie et source de mon inspiration,
À mes frères et sœurs, compagnons de l'âme et du chemin,
À ma famille, qui a toujours été mon soutien et ma motivation,
Je dédie ce travail en signe de gratitude et de reconnaissance,
Car c'est grâce à votre amour et à votre encouragement que j'en suis arrivée là.*

*Et à mes chers amis,
Ceux qui ont partagé avec moi les joies et les épreuves du chemin,
Vous avez été la lumière dans mes jours sombres et le soutien dans les moments difficiles,
Merci du fond du cœur, vous êtes une partie inoubliable de cet accomplissement.*

Yasmine

Dédicace

Par la grâce de dieu, aujourd'hui je vais terminer ma mémoire.

À cette occasion je dédie mon diplôme à :

** Maman : tous les mots de gratitude ne te suffisent pas tu m'as soutenu, son toi je ne serai pas là.*

** Mon père : j'aimerais que tu sois présent avec moi aujourd'hui, mais je sais bien tu es fier de moi "Lieu de repos paradisiaque".*

** Mon mari Mohamed Amine pour tes encouragements, tu étais mon soutien et jouais le rôle de père et de frère.*

** Mes sœurs " Zoulikha+Tinhinene " d'avoir créé l'atmosphère appropriée.*

** Ma familles Mes amis , je vous souhaite plus de succès.*

Nour el houda

REMERCIEMENTS

*Le Prophète Muhammad (que la paix soit sur lui) a dit
« Celui qui ne remercie pas les gens ne remercie pas Dieu, et quiconque vous fait une
faveur, récompensez-le. Si vous ne pouvez pas, alors priez pour lui. »*

Conformément à ce hadith et en reconnaissance de notre gratitude, nous louons Dieu Tout-Puissant et Le remercions de nous avoir permis d'accomplir ce travail modeste.

Nous adressons nos sincères remerciements à Pr Hamdi Ines, professeure encadrant, pour son accompagnement tout au long de cette recherche, pour ses conseils précieux et ses orientations bienveillantes. Nous prions Dieu Tout-Puissant de guider ses pas et d'exaucer ses souhaits, qu'il la récompense pour sa bonté , Nos remerciements vont également la présidente jury Dr Adjel fatima , et l'examineur Dr Djebabra siham .

Nos remerciements vont également à Dr Kalthoum Adaika, ainsi qu'à tout le personnel administratif du Collège des Sciences et de la Technologie, pour leur aide et les facilités qui nous ont été accordées tout au long de ce parcours.

Enfin, nous adressons nos salutations les plus sincères à toutes les personnes qui nous ont soutenus, de près ou de loin, dans la réalisation de cette recherche modeste. Que Dieu les récompense pour leur générosité et leur soutien.

المخلص

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم فعالية الفحم الحيوي (البيوشار) المنتج من قشور الموز كمادة ماصة لإزالة النترات من المياه العادمة، خاصة تلك الناتجة عن محطات غسيل المركبات. تم تحضير البيوشار عن طريق التحلل الحراري لقشور الموز عند درجة حرارة 044 درجة مئوية، وهو إجراء حراري يتم فيه تفحيم الكتلة الحيوية بغياب الأكسجين.

تم إجراء تجارب مخبرية لدراسة قدرة هذا البيوشار على امتصاص النترات من المياه الملوثة، حيث تم تحليل تأثير عدة عوامل، **وكمية الفحم الحيوي المستخدمة، ومدة التلامس بين الفحم والماء (pH)** على كفاءة الإزالة، بما في ذلك **درجة الحموضة** الملوثة. أظهرت النتائج فعالية ملحوظة للبيوشار في امتصاص النترات، مع تحقيق أفضل أداء ضمن ظروف تشغيل مثلى، مما يدل على تأثير العوامل المذكورة.

يمتاز الفحم الحيوي المستخلص من قشور الموز بخصائص عدة، من أهمها انخفاض التكلفة، وتوافر المادة الأولية، وصداقته للبيئة، مما يجعله خياراً واعداً ومستداماً لمعالجة المياه الملوثة بالنترات، خصوصاً في الدول النامية التي تعاني من محدودية الموارد.

الكلمات المفتاحية: الفحم الحيوي، قشور الموز، النترات، الامتزاز، المياه العادمة، محطات الغسيل، المعالجة المستدامة، البيئة

Résumé

Cette étude explore l'utilisation du biochar dérivé de pelures de banane comme matériau adsorbant pour l'élimination des nitrates présents dans les eaux usées, notamment celles issues des stations de lavage. Le biochar a été produit par pyrolyse à une température de 400 °C, un procédé thermique qui permet la carbonisation contrôlée de la biomasse en l'absence d'oxygène.

Des essais en laboratoire ont été menés pour évaluer l'efficacité de ce biochar dans l'adsorption des nitrates, en étudiant l'influence de plusieurs paramètres : le pH de la solution, la dose de biochar utilisée, ainsi que le temps de contact entre le biochar et l'eau contaminée. Les résultats expérimentaux indiquent une capacité d'adsorption notable du biochar, traduisant un fort potentiel pour le traitement des nitrates. L'efficacité maximale a été observée dans des conditions optimales, mettant en évidence la sensibilité du processus aux paramètres étudiés.

Le biochar à base de pelures de banane présente plusieurs avantages : il est bon marché, issu de déchets organiques abondants, et respectueux de l'environnement. Ces caractéristiques en font une alternative prometteuse et durable aux méthodes conventionnelles de traitement des eaux usées, en particulier dans les contextes à faibles ressources, comme ceux des pays en développement.

Mots-clés : biochar, pelures de banane, nitrates, adsorption, eaux usées, stations de lavage, traitement durable, environnement.

Liste des Figures

Figure	Titres	Pages
Figure I.1	Traitement des eaux usées	11
Figure I.2	Bassin dégraisseur – dessaleur	12
Figure I.3	Schéma de principe d’une filière type par lit bactérien	13
Figure II.1	Représentation de la microstructure d’un charbon	20
Figure II.2	Groupements oxygénés à caractère basique	24
Figure II.3	Mécanisme d’adsorption en phase aqueuse sur charbon	27
Figure III. 1	Multimètre qualité de l’eau	33
Figure III.2	Conductimètre HI 2550 de Hanna Instruments	34
Figure III.3	PH-mètre modèle AD8000 de la marque	34
Figure III.4	Schéma montrant le processus de préparation du biochar à partir de peaux de banane	35
Figure III.5	Montage pour Analyse initiale des eaux usées	38
Figure III.6	Expérience de traitement au biochar	42
Figure III.7	Effet de temps d’adsorbant sur la quantité d’adsorption	44
Figure III.8	Effet de temps d’adsorbant sur le rendement sur un biochar	45
Figure III.9	Effet de la masse d’adsorbant sur le rendement	46
Figure III.10	Effet de pH sur la quantité d’adsorption	47

Liste des tableaux

Tableau	Titres	Pages
Tableau II.1	Caractéristiques de la porosité d'un biochar	22
Tableau II.2	Les différences entre l'Adsorption physique et chimique	28
Tableau III.1	Évolution des paramètres physico-chimiques des eaux usées avant et après traitement par bio char, et taux d'élimination associé	43

Liste des symboles

q	Quantité adsorbée à l'équilibre
q_m	Capacité maximale d'adsorption
C_e	Concentration à l'équilibre
C₀	Concentration initiale de nitrate
V	Volume de la solution
m	Masse de bio char utilisé
pH	Potentiel hydrogen
t	Temps de contact
T	Température de pyrolyse
NO₃⁻	Ion nitrate
DBO₅	Demande Biologique en Oxygène sur 5 jours
DCO	Demande Chimique en Oxygène

Table des matières

Titres	Pages
Dédicace	I
Dédicace	II
Remerciements	III
ملخص	IV
Résumé	V
Liste des figures	VI
Liste des tableaux	VII
Liste des symboles	VIII

Introduction générale	2
Introduction	4
Chapitre I : Généralité sur les eaux usées	
I1 Introduction	4
I2 Définition des eaux	4
I3 Les déférences type des eaux usées	4
I3.1 les eaux usées urbaine (domestique)	4
I3.2 l'eau usée agricole	5
I3.3 Les eaux usées pluviales ou de ruissellement urbain	6
I3.4 Les eaux usées industriel	6
I4 Evaluation de la pollution	6
I4.1 Principaux polluants	7
I5 Caractéristiques des eaux usées	7
I5.1 Les Caractéristiques physiques	7
I5.1.1 Couleur	7
I5.1.2 Odeur	7
I5.1.3 Température	8
I5.1.4 La turbidité	8
I5.1.5 Les Matières en Suspension (MES)	8
I5.1.6 Les Matières Volatiles en Suspension (MVS)	8
I5.1.7 Les Matières Minérales Sèches (MMS)	8
I5.2 Les caractéristiques chimiques	8
I5.2.1 Potentiel d'hydrogène PH	8

I5.2.2	Demande Chimique en Oxygène(DCO)	9
I5.2.3	Demande Biochimique en Oxygène (DBO5)	9
I5.2.4	Rapport DCO/DBO5	9
I5.2.5	La Biodégradabilité	9
I5.2.6	Carbone Total Organique (COT)	10
I5.2.7	Oxygène dissous	10
I5.2.8	L'azote	10
I5.2.9	Le phosphore total	10
I5.3	Paramètre microbiologique	11
I6	Traitement des eaux usées	11
I6.1	Les prétraitements	11
I6.1.1	Le dégrillage	12
I6.1.2	Le dessablage	12
I6.1.3	Le dégraissage –Déshuilage	12
I6.2	Traitement primaire	12
I6.3	Traitements secondaires	13
I6.3.1	Traitements biologiques	13
I6.3.2	Cultures libres (Boues Activées)	13
I6.3.3	Epuration biologique `à biomasse fixée (Cultures fixées)	13
I6.4	Traitements tertiaires	14
	Conclusion	14

Chapitre II: Généralité sur le charbon et l'adsorption

II.1	Introduction	16
II.2	Définition	16
II.3	Différentes formes de charbon	16
II.3.1	Le Charbon en Poudre	16
II.3.2	Charbon en Granulés	17
II.4	Les matières premières de préparation des charbon	17
II.4.1	Matières premières	17
II.4.1.1	Origine végétale	17
II.4.1.2	Origine animale	17
II.5	Méthode de production du charbon	18
II.5.1	La pyrolyse (décomposition thermique)	18
II.5.2	Influence des conditions de pyrolyse	18
II.6	Propriétés physico-chimiques des charbons	20
II.6.1	Propriétés physique	20
II.6.1.1	Microstructure des charbons	20
II.6.1.2	Porosité et surface spécifique du charbon	21
II.6.2	Propriétés chimiques de la surface des charbons	22
II.6.2.1	Composition globale du charbon	22
II.6.2.2	Propriétés superficielles du charbon	23
II.7	Les fonctions de surfaces du charbon	23
II.7.1	Caractère acide d'un charbon	24
II.7.2	Caractère basique d'un charbon	24

II.8 Applications du charbon dans le traitement des eaux	25
II.8.1 Élimination des nitrates (NO_3^-)	25
II.8.2 Élimination Autres polluants	25
II.9 L'adsorption	26
II.10 Types d'adsorption	26
II.10.1 Adsorption physique	26
II.10.2 Adsorption chimique	26
II.11 Description du mécanisme d'adsorption	27
II.12 Cinétique d'adsorption	28
II.13 Facture influençant l'adsorption	28
II.14 Domaines d'applications d'adsorption	29
Conclusion	30
Chapitre III Matériels , Méthodes , résultats et discussions	
III. 1 Introduction	32
III.2 L'objectif du travail	32
III.3 Matériels et méthodes	32
III.3.1 Matériaux utilisés	32
III.3.2 Préparation du biochar	35
III.3.3 Collecte des eaux usées	35
III.4 Méthodologie de travail	37
III.4.1 Analyse initiale des eaux usées	37
III.4.2 Expérience de traitement au biochar	38
III.5. Résultats de l'analyse des eaux usées avant et après traitement par le biochar	39
III.5.1 Méthode de calcul du taux d'élimination	40

III.6. Etude de l'effet des paramètres gouvernants l'adsorption	41
III.6.1. L'effet des temps	41
III.6.2. L'effet de la masse	42
III.6.3. l'effet du pH	44
Conclusion générale	47
Référence	

Introduction générale

Introduction générale

L'eau est une ressource naturelle vitale, indispensable à la vie, au développement économique et à la préservation des écosystèmes. Cependant, l'intensification des activités humaines qu'elles soient domestiques, industrielles ou agricoles a entraîné une augmentation considérable des rejets polluants, mettant en péril la qualité des ressources hydriques. Face à cette problématique, le traitement des eaux usées s'impose comme une priorité environnementale et sanitaire.

Malgré l'évolution des technologies de traitement, certaines substances notamment les micropolluants et les composés non biodégradables échappent encore aux procédés classiques. C'est dans ce contexte que l'adsorption, notamment par charbon actif ou bio char, se présente comme une solution complémentaire efficace, grâce à ses propriétés de porosité élevée et de grande surface spécifique [1].

Ce mémoire porte sur l'étude de l'efficacité d'un bio char préparé à partir de pelures de banane, utilisé pour l'élimination des nitrates présents dans les eaux usées issues d'une station de lavage automobile.

en plus introduction générale , conclusion générale , et des références , Ce travail est structuré en deux parties :

- **Une partie théorique** : ce compose en
- **Chapitre I** : consacrée à la présentation des connaissances générales sur les eaux usées
- **Chapitre II** : consacrée à la présentation des connaissances générales sur le charbon, ainsi que les principes de l'adsorption.
- **Une partie expérimentale** : ce compose en
- **Chapitre III** : décrivant les matériaux, la méthodologie adoptée, les résultats obtenus et leur interprétation.

L'objectif principal de cette étude est d'explorer une alternative durable, économique et locale pour le traitement des eaux usées, en valorisant des déchets organiques disponibles en abondance (biochar à base les pelures de banane)

Chapitre I

Généralité sur les eaux usées

I.1 Introduction

Les eaux usées sont une mixture diluée provenant de différents rejets à savoir : résidences, commerces, industries et autres places publiques.

Avant le choix d'une filière de traitement, il est essentiel de connaître sa composition, qualité et caractéristiques de ces eaux usées.

A travers ce chapitre, nous essayerons d'offrir un aperçu général sur la provenance, les caractéristiquement ainsi que le traitement des eaux usées [2].

I.2 Définition des eaux usées

Les eaux résiduaires urbaines (ERU), ou eaux usées, sont des eaux chargées de polluants, solubles ou non, provenant essentiellement de l'activité humaine.

Une eau usée est généralement un mélange de matières polluantes répondant à ces catégories, dispersées ou dissoutes dans l'eau qui a servi aux besoins domestiques ou industriels.

Donc sous la terminologie d'eau résiduaire, on groupe des eaux d'origines très diverses qui ont perdu leurs puretés ; c'est-à-dire leurs propriétés naturelles par l'effet des polluants après avoir été utilisées dans des activités humaines (domestiques, industrielles ou agricoles) [3].

I.3 Les déférences type des eaux usées

I.3.1 les eaux usées urbaine (domestique)

Les eaux usées domestiques sont des rejets liquides issus des activités ménagères telles que la cuisine, la lessive, la toilette et l'évacuation des excréta humains. Elles sont généralement classées en deux catégories :

- Les eaux grises : proviennent des lavabos, douches, bains, éviers et machines à laver.
- Les eaux vannes (ou eaux noires) : proviennent des toilettes et contiennent des matières fécales et de l'urine.

Ces eaux contiennent une charge polluante importante en matières organiques, éléments nutritifs (notamment l'azote et le phosphore), micro-organismes pathogènes, résidus de détergents et parfois des composés pharmaceutiques ou cosmétiques [4] .

-L'homme utilise pour sa consommation domestique entre 100 et 200 L/jour et par habitant. Cette consommation est répartie de la façon suivante :

- Boisson 1 %
- Toilette et cuisine 49 %
- Chasse d'eau 35 %
- Lavage 10 %
- Arrosage 5 %

- La pollution journalière produite par une personne utilisant de 150 à 200 litres d'eau est évaluée à : • de 70 à 90 grammes de matières en suspension

- de 60 à 70 grammes de matières organiques
- de 15 à 17 grammes de matières azotées
- 4 grammes de phosphore
- plusieurs milliards de germes pour 100 ml.

. Elles proviennent essentiellement :

- Des eaux de cuisine qui contiennent des matières minérales en suspension provenant du lavage des légumes, des substances alimentaires à base de matières organiques (glucides, lipides, protides) et du produit détergent utilisé pour le lavage de la vaisselle et ayant pour effet la solubilisation des graisses ;
- Des eaux de buanderie contenant principalement des détergents ;
- Des eaux de salle de bain chargées en produits utilisés pour l'hygiène corporelle, généralement des matières grasses hydrocarbonées ;
- Des eaux de vannes qui proviennent des sanitaires (w.c), très chargées en matières organiques hydrocarbonées, en composés azotés, phosphatés et microorganisme [5]

I.3.2 l'eau usée agricole

- L'eau usée agricole désigne les eaux de ruissellement ou de drainage issues des activités agricoles telles que l'irrigation, l'élevage ou l'épandage d'engrais. Elle contient souvent des concentrations élevées de polluants tels que les nitrates, phosphates, pesticides, matières organiques, ainsi que des pathogènes microbiens.

Ces eaux, si elles ne sont pas traitées, peuvent infiltrer les nappes phréatiques ou se déverser dans les cours d'eau, provoquant ainsi une pollution diffuse et contribuant à des phénomènes d'eutrophisation des milieux aquatiques [6] .

- De plus, la présence excessive de nitrates dans l'eau potable peut avoir des effets néfastes sur la santé humaine, notamment le syndrome du « bébé bleu » chez les nourrissons [7]

La gestion des eaux usées agricoles passe par la mise en place de pratiques agro-environnementales, comme l'installation de bandes enherbées, de zones humides artificielles ou l'utilisation de matériaux adsorbants naturels comme le biochar pour piéger les polluants avant qu'ils n'atteignent les milieux aquatiques [8].

I.3.3 Les eaux usées pluviales ou de ruissellement urbain

Les eaux usées pluviales, également appelées eaux de ruissellement pluvial, sont issues des précipitations atmosphériques s'écoulant sur les surfaces imperméables (routes, toitures, parkings, etc.). Lors de cet écoulement, elles peuvent se charger en divers polluants tels que des hydrocarbures, des métaux lourds, des matières en suspension, des nutriments (nitrates, phosphates) et des micro-organismes pathogènes [9].

I.3.4 Les eaux usées industriel

Les eaux usées industrielles désignent les rejets liquides provenant des processus de production des industries. Contrairement aux eaux usées domestiques, elles présentent une composition souvent complexe et variable selon le secteur industriel concerné. Elles peuvent contenir des substances organiques, des métaux lourds (plomb, cadmium, mercure), des hydrocarbures, des nutriments (azote, phosphore), ainsi que des composés toxiques ou difficilement biodégradables [10]

Leur rejet non traité dans le milieu naturel représente un risque considérable pour l'environnement, notamment la pollution des sols, des nappes phréatiques, et la dégradation de la qualité des cours d'eau. Par conséquent, le traitement de ces eaux usées est une priorité dans les politiques de gestion durable de l'eau et de protection de l'environnement [11]

I.4 Evaluation de la pollution

I.4.1 Principaux polluants

La composition des eaux usées est fonction de nombreux paramètres :

- Propriété physico-chimique de l'eau potable distribuée.
- Mode de vie des usagers
- Importance et le type des rejets industriels.

D'une manière générale la pollution des eaux se manifeste sous les formes principales suivantes [12].

- **Pollution organique** : due à la présence de matières organiques biodégradables (restes alimentaires, excréments), mesurée par la DBO₅ et la DCO.
- **Pollution azotée et phosphorée** : liée aux nutriments (nitrates, ammonium, phosphates), favorisant l'eutrophisation.
- **Pollution microbiologique** : causée par des agents pathogènes (bactéries, virus, protozoaires) issus des déjections humaines et animales.
- **Pollution par les métaux lourds** : tels que le plomb, le cadmium ou le mercure, présents surtout dans les effluents industriels.
- **Pollution par les micropolluants** : résidus de médicaments, produits cosmétiques, détergents, pesticides, etc.

I.5 Caractéristiques des eaux usées

I.5.1 Les Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques des eaux usées permettent de décrire leur aspect général et constituent un premier indicateur de leur niveau de pollution. Ces paramètres sont faciles à mesurer et ont une influence directe sur le fonctionnement des systèmes de traitement et sur les écosystèmes aquatiques récepteurs.

Les principales caractéristiques physiques sont les suivantes :

I.5.1.1 Couleur :

La couleur des eaux usées récentes est généralement grisâtre. Une coloration foncée ou noire peut indiquer un vieillissement ou une activité anaérobie. Les colorations spécifiques peuvent aussi provenir de rejets industriels (ex. : teintureries, papeteries) [12].

I.5.1.2 Odeur :

L'odeur des eaux usées est un indicateur important de la dégradation de la matière organique. Une odeur nauséabonde (souvent due au sulfure d'hydrogène - H₂S) peut signaler une digestion anaérobie ou une stagnation prolongée des eaux [13].

I.5.1.3 Température :

La température des eaux usées est généralement comprise entre **10 °C et 25 °C**, mais elle peut varier selon les saisons et les activités humaines ou industrielles. Elle influence la solubilité de l'oxygène, la vitesse des réactions biochimiques et l'efficacité des traitements biologiques [14].

I.5.1.4 La turbidité :

La turbidité reflète la capacité d'un échantillon à diffuser la lumière. Elle est corrélée à la concentration de MES. Une eau très turbide perturbe la photosynthèse et nuit à la biodiversité aquatique [13].

I.5.1.5 Les Matières en Suspension (MES) :

Les MES sont des particules solides non dissoutes, provenant des déchets alimentaires, des graisses, des sables ou des effluents industriels. Elles sont responsables de la turbidité et peuvent favoriser le colmatage des équipements de traitement [15].

I.5.1.6 Les Matières Volatiles en Suspension (MVS)

Elle représente la fraction organique des MES et sont obtenues par calcination de ces MES à 525°C pendant 2h. La différence de poids entre MES à 105°C et MES à 525°C donne la « perte au feu » et correspond à la teneur en MVS (en mg /l) d'une eau [16]

I.5.1.7 Les Matières Minérales Sèches (MMS)

Elles représentent la différence entre les matières en suspension (MES) et les matières volatiles en suspension (MVS) et correspondent à la présence de sel, et de silice [16].

I.5.2 Les caractéristiques chimiques

I.5.2.1 Potentiel d'hydrogène PH

Ce paramètre, qui se mesure sur le terrain avec des bandelettes test ou un appareil (pH-mètre), donne le degré d'acidité ou d'alcalinité d'une eau. Le pH est le reflet de la concentration d'une eau en ions H^+ : $pH = -\log [H^+]$

. L'eau des cours d'eaux avoisine en général la neutralité représentée par un pH de 7. Le pH doit être compris entre 6 et 8 pour permettre la vie aquatique [17].

I.5.2.2 Demande Chimique en Oxygène(DCO)

La demande chimique en oxygène (DCO) est la quantité consommée par les matières oxydantes présentes dans l'eau quelles que soit leur origine organique ou minérale [17]

La mesure de la DCO est surtout utilisée pour la surveillance des eaux usées urbaines et industrielles. La DCO est mesurée en $mg\ d'O_{2/l}$.

I.5.2.3 Demande Biochimique en Oxygène (DBO5)

La DBO₅ indique la quantité d'oxygène consommée par les micro-organismes pour dégrader la matière organique biodégradable sur 5 jours. Elle est généralement utilisée pour évaluer

la pollution organique facilement dégradable. Les eaux usées domestiques ont une DBO₅ typique de 200 à 400 mg/L [18] .

I.5.2.4 Rapport DCO/DBO5

La DBO₅ d'une eau de surface non polluée varie entre 2 et 20 mg/l. les mesures qui vont au-delà indiquent alors que l'eau est polluée. Le rapport DCO / DBO₅ donne un indice sur la provenance et l'origine de la pollution organique [17].

➤ Les mesures se rapprochant de 1 du rapport DCO / DBO₅ une très bonne biodégradabilité (lait, yaourt).

➤ De 1,5 à 2 : Effluents d'industries agroalimentaires (meilleure biodégradabilité)

➤ De 2 à 3 : Effluents urbaines domestiques.

➤ >3 à 4 : Effluents plus ou moins difficilement biodégradable (industrie).

La relation empirique de la matière oxydable en fonction de la DBO₅ et la DCO est donnée par l'équation suivante : $MO = (2DBO_5 + DCO) / 3$ [17]

I.5.2.5 La Biodégradabilité

La biodégradabilité traduit l'aptitude d'un effluent à être décomposé ou oxydé par les micro-organismes qui interviennent dans les processus d'épuration biologiques des eaux. Elle est exprimée par un coefficient K avec $K = DCO / DBO_5$ [17]

➤ Si $K < 1.5$, cela signifie que les matières oxydables sont constituées en grande partie de matières fortement biodégradables

➤ Si $1.5 < K < 2.5$, cela signifie que les matières oxydables sont moyennement biodégradables.

➤ Si $2.5 < K < 3$, les matières oxydables sont peu biodégradables.

➤ Si $k > 3$, les matières oxydables sont non biodégradables.

Un coefficient K très élevé traduit la présence dans l'eau d'éléments inhibiteur de la croissance bactérienne, tels que : les sels métalliques, les détergents, les phénols, les hydrocarbures... etc.

La valeur du coefficient K détermine le choix de la filière de traitement à adopter, si l'effluent est biodégradable on applique un traitement biologique, sinon on applique un traitement physico-chimique [17].

I.5.2.6 Carbone Total Organique (COT)

Détermine des propriétés variables du carbone organique dissous et particulaire, du carbone organique provenant de substances volatiles et du carbone minéral dissous.

Sa mesure est réalisée par un analyseur de CO₂ à infrarouge après combustion catalytique à haute température de l'échantillon [17].

I.5.2.7 Oxygène dissous

La présence d'oxygène dans l'eau est indispensable à la respiration des êtres vivants aérobies aquatiques. En dessous d'un certain seuil de concentration en oxygène c'est l'asphyxie des poissons. L'oxygène de l'eau permet également le processus d'oxydation des matières organiques (autoépuration), mais cette décomposition appauvrit le milieu aquatique en oxygène [17].

I.5.2.8 L'azote

Dans les eaux usées domestiques, l'azote est sous forme organique et ammoniacale. En plus de la toxicité de la forme ammoniacale et nitrique, l'azote intervient dans le phénomène de l'eutrophisation. Donc, sa caractérisation et sa quantification sont primordiales pour les rejets liquides dans le milieu naturel [17].

I.5.2.9 Le phosphore total

Le phosphore total=Phosphore particulaire + Phosphore dissous La réglementation, en ce qui concerne le phosphore, ne tient compte que de ce seul paramètre. La quantité de phosphore total d'une eau s'exprime en mg/l (milligrammes par litre). Le rejet de matières phosphorées est d'environ 4 grammes par habitant et par jour [17].

I.6.1 Paramètre microbiologique

Les eaux usées renferment une diversité de micro-organismes issus des matières fécales (champignons, bactéries, virus, protozoaires, helminthes) dont certains sont pathogènes [19]

Les bactéries sont les microorganismes les plus communément rencontrés dans les eaux usées. Les germes témoins de contamination fécale regroupent les coliformes totaux, les coliformes fécaux et les streptocoques fécaux [19]

I.4 Traitement des eaux usées

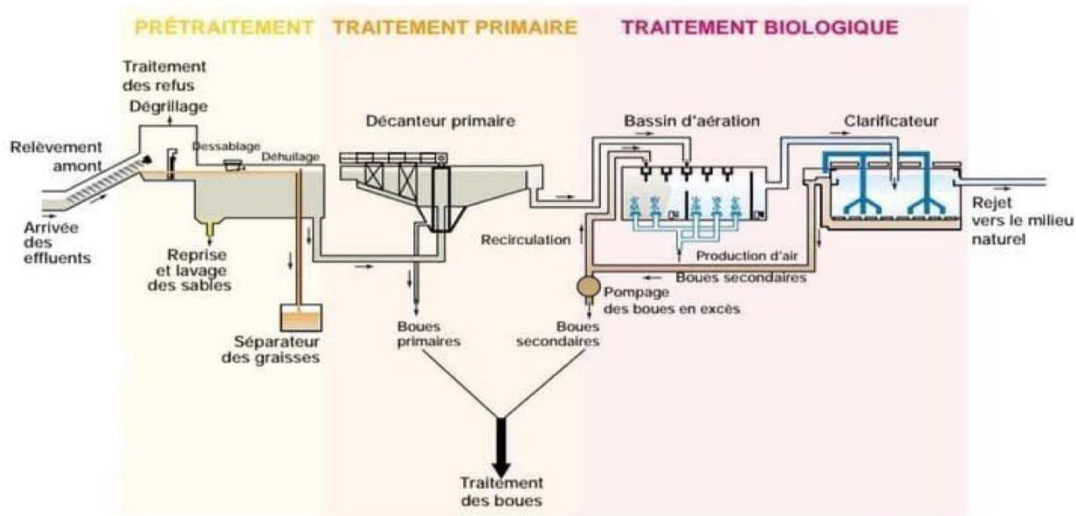


Figure I.1. Traitement des eaux usées [20]

I.4.1 Les prétraitements

Les eaux usées véhiculent des matières en suspension très hétérogènes et souvent volumineuses. On entend par « prétraitement » une série d'opérations qui a pour but d'éliminer la partie la plus visible de la pollution et la plus gênante sur le plan de l'exploitation des ouvrages. Ils ont un rôle déterminant sur le plan de l'exploitation de la station d'épuration et se compose de [20] :

I.4.1.1 Le dégrillage

Passage de l'eau à travers des barreaux plus ou moins espacés.

- Grilles grossières: espacement entre barreaux : 60-100mm.
- Grilles fines : espacement entre barreaux : 10-25mm [20].

I.5.1.2 Le dessablage

Extraction par sédimentation des graviers, sables et particules minérales, ayant une taille de 0,2 à 2 mm [20].

I.5.1.3 Le dégraissage -Déshuilage

Généralement combiné avec le dessablage, vise la séparation des produits de densité légèrement inférieure à l'eau par flottation naturelle ou accélérée par injection de fines bulles d'air. Nuisibles à la phase biologique du traitement (formation de mousses...) et représentent environ 35 % de la DCO de l'eau brute [20].

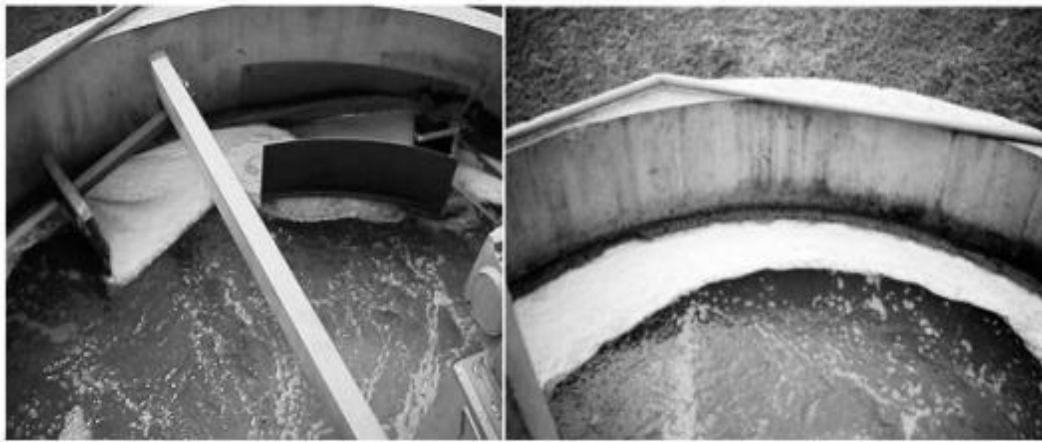


Figure I.2. – Bassin dégraisseur – dessaleur [20]

I.1.1 Traitement primaire

C'est une opération qui permet d'éliminer les matières en suspension par simple décantation dans un ouvrage de type cylindro-conique à flux vertical ascendant et les matières colloïdales par introduction d'agents chimiques (adjuvants ou réactifs coagulants).

On utilise généralement des sels cationiques tels que l'hydroxyde d'aluminium $\text{Al}(\text{OH}_3)$ ou l'hydroxyde ferrique $\text{Fe}(\text{OH}_3)$, de la chaux, des électrolytes dont l'objectif est d'accélérer et de favoriser leur précipitation. Ce traitement physico- chimique permet d'éliminer 65 % de la DBO5 et 60% de la DCO [20].

I.4.2 Traitements secondaires

I.4.2.1 Traitements biologiques

L'épuration biologique élimine la pollution biodégradable de l'eau domestique via des processus aérobies ou anaérobies. La digestion anaérobie, utilisée pour les effluents concentrés, transforme le carbone organique en CO_2 , méthane et biomasse [21].

I.4.2.2 Cultures libres (Boues Activées)

Impliquent le développement d'une culture bactérienne dispersée sous forme de flocons dans le liquide à traiter, utilisant un bassin agité pour maintenir la culture en suspension. Cela se fait soit avec une concentration d'oxygène (aérobie), soit sans oxygène (anaérobie). Le procédé des "boues activées" est le plus courant [21].

I.4.2.3 Epuration biologique `à biomasse fixée (Cultures fixées)

Les "cultures fixées" impliquent la fixation de la biomasse épuratrice sur un support solide, avec l'eau à traiter percolant à travers [21].

1. Lit bactérien : le procédé le plus ancien, utilise une biomasse fixée sur un matériau à grosse granulométrie, l'air étant transféré par diffusion à travers le film d'eau [21].

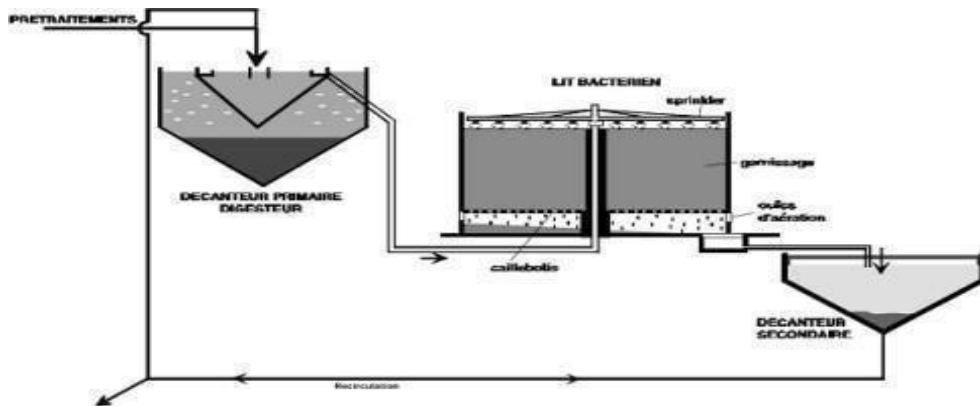


Figure I.3 Schéma de principe d'une filière type par lit bactérien [21]

2. Les bio-disques (les disques biologiques) :

a) Le procédé des bio-disques utilise des disques rotatifs dans une cuve pour traiter les eaux usées. Ces disques, recouverts de microorganismes, sont alimentés en eau usée prétraitée [21].

b) Dispositions constructives

Les bio-disques sont constitués de disques immergés à 40% dans l'eau usée, avec un espacement de 2 à 3 cm. La biomasse (bio film) a une épaisseur de 1 à 3 mm. Le fond de la cuve est en pente pour faciliter la purge. Il est préférable d'éviter les mises en service en hiver [21].

I.4.3 Traitements tertiaires

Les traitements tertiaires complètent le traitement secondaire en éliminant l'azote, le phosphore et la pollution biologique des eaux usées. Ils affinent la qualité de l'eau pour une réutilisation industrielle ou agricole, notamment par nitrification- dénitrification, déphosphoration et désinfection [22].

Conclusion

En somme, Les eaux usées sont traitées dans le but d'être rejetées en milieu naturel. Elles se doivent de respecter certaines normes de dépollution d'où l'intérêt de les faire passer par les stations d'épuration. On peut comprendre par ces quelques lignes les contraintes par lesquelles passent la dépollution des eaux usées et ses limites. Elles nous permettent également de mesurer l'enjeu que représente chaque litre d'eau souillée et que nous nous interrogeons aussi sur les conséquences environnementales que peut avoir une eau imparfaitement dépolluée [23].

C'est pourquoi nous avons décidé de trouver une méthode simple d'éliminer les polluants de l'eau, et parmi les plus importants de ces polluants figurent les nitrates.

Chapitre II :
Généralité sur le
charbon et l'adsorption

II.1 Introduction

Le charbon est un matériau carboné d'origine organique, largement utilisé dans divers domaines industriels et environnementaux. Ce matériau suscite un intérêt croissant en raison de ses propriétés physiques et chimiques intéressantes, telles que sa grande porosité, sa grande surface spécifique.

Dans un contexte de pollution croissante des milieux aquatiques et de besoin de solutions durables et économiques, le charbon apparaît comme un adsorbant prometteur pour l'élimination de divers polluants. Ses propriétés peuvent être modifiées en fonction des matières premières utilisées et des conditions de pyrolyse appliquées, ce qui en fait un matériau adapté à de nombreuses applications, notamment dans le traitement des eaux usées et l'amélioration des sols.

Ce chapitre est consacré à l'étude générale du charbon, abordant ses origines, ses formes, ses propriétés physiques et chimiques, ainsi que les mécanismes d'adsorption qui déterminent son efficacité dans les domaines environnementaux.

II.2 Définition

Le charbon est un matériau poreux riche en carbone, obtenu par pyrolyse lente de biomasse en atmosphère pauvre en oxygène. Il est principalement utilisé dans des applications agricoles et environnementales. Contrairement au charbon activé, il ne subit aucune étape d'activation supplémentaire, ce qui réduit sa complexité de production. généralement d'origine végétale (résidus agricoles, bois, coques de fruits, pailles,...) [24].

II.3 Différentes formes charbon

Le charbon est disponible sous deux formes différentes : en poudre ou en granulés

II.3.1 Le Charbon Poudre

Le charbon en poudre ou prend la forme de grains fins généralement de taille variable selon la méthode de broyage, souvent plus grossière que celle du charbon actif en poudre. Il est utilisé principalement dans des applications agricoles et environnementales, notamment pour l'amélioration des sols ou le traitement des eaux, souvent en combinaison avec d'autres amendements ou agents biologiques.

L'utilisation de charbon en poudre permet une meilleure dispersion dans les milieux aqueux et un contact accru avec les contaminants ou le sol. [25]

II.3.2 Charbon en Granulés

L'utilisation du charbon en granulés à l'échelle industrielle et agricole est fréquente, notamment pour la facilitation de la manipulation et l'application directe dans les sols ou filtres. Bien que ses propriétés d'adsorption soient généralement moindres que celles du charbon actif, le charbon granulé est apprécié pour ses bénéfices agronomiques, sa capacité à améliorer la structure du sol, et son rôle dans la rétention d'eau et de nutriments. Il est utilisé aussi pour la réduction des micropolluants dans certains systèmes de traitement naturel [25].

II.4 Les matières premières de préparation des charbons

II.4.1 Matières premières

La production de charbon commence par l'identification et le choix adéquat de la matière première. Les charbons peuvent être obtenus à partir d'un large éventail de matériaux riches en carbone, principalement d'origine végétale, mais aussi dans une moindre mesure d'origine animale ou organique résiduelle [26].

II.4.1.1 Origine végétale

Il existe une multitude de produits d'origine végétale qui peuvent intervenir dans la synthèse des charbons et sous différentes formes variées : Déchets agricoles non utilisables exemple :

- | | | |
|---------------------------|---------------------------|-------------------|
| -Bagasse de canne à sucre | - Coque de noix de coco | - Pulpe de pomme. |
| -Noyaux des dattes | -Noyaux d'olives | -Le café |
| -Noyaux d'abricot | -Les résidus de thé [26]. | |

II.4.1.2 Origine animale

Bien que moins fréquente, la production de charbon à partir de matières organiques animales est possible. Elle peut inclure certains déchets comme les os broyés, les plumes ou d'autres sous-produits de l'industrie animale.

Ces matériaux permettent d'obtenir des charbons contenant des éléments minéraux intéressants pour l'enrichissement des sols [27].

II.5. Méthode de production du charbon

II.5.1 La pyrolyse (décomposition thermique)

La pyrolyse est le processus principal utilisé pour produire le charbon. Elle consiste à chauffer la biomasse en **absence totale ou partielle d'oxygène**, ce qui empêche la combustion et favorise la carbonisation.

Les points clés du procédé:

- Température typique : entre **300°C et 600°C** pour les charbons.
- Durée : varie selon le type de biomasse, généralement de 30 minutes à 2 heures.
- Atmosphère : pauvre en oxygène ou inerte (ex. azote).

Pendant la pyrolyse, la matière organique se décompose en trois fractions :

- **Le charbon** (résidu solide carboné),
- **Le gaz de pyrolyse** (CO, CO₂, CH₄...),
- **Le bio-huile** (liquide contenant des composés organiques volatils [28]).

II.5.2 Influence des conditions de pyrolyse

Les conditions opératoires de la pyrolyse influencent fortement les caractéristiques physico-chimiques du biochar, notamment sa porosité, sa surface spécifique, sa stabilité chimique et son rendement.

- ✓ **La température de pyrolyse** joue un rôle central. Une température plus élevée tend à augmenter la surface spécifique et la stabilité du biochar, ce qui améliore sa résistance à la dégradation biologique et chimique. Toutefois, cette élévation de température se traduit aussi par une diminution du rendement en masse, car une plus grande partie de la biomasse est convertie en gaz.

- ✓ **Le temps de séjour** à température constante est également déterminant. Un temps de résidence plus long permet une carbonisation plus complète de la matière organique, favorisant la formation d'un charbon plus pur, avec une structure carbone plus développée.
- ✓ **La vitesse de chauffage** est un autre facteur à considérer. Un chauffage lent permet un dégagement progressif des composés volatils et favorise la formation d'une structure poreuse mieux organisée. En revanche, un chauffage trop rapide peut entraîner une fragmentation ou une obstruction des pores.
- ✓ **La teneur en oxygène** doit être maintenue aussi basse que possible. La pyrolyse est un procédé qui repose sur l'absence ou la très faible présence d'oxygène. Toute entrée d'oxygène dans le système peut provoquer une combustion partielle de la biomasse, ce qui compromet la formation du charbon et réduit significativement sa qualité.

Ainsi, la maîtrise précise de ces paramètres est essentielle pour produire un charbon aux propriétés optimales, adapté aux applications visées telles que l'amélioration des sols ou le traitement des eaux usées [28].

II.6 Propriétés physico-chimiques des charbons

II.6.1 Propriétés physique

II.6.1.1 Microstructure des charbons

La microstructure des charbons est généralement amorphe, car elle résulte de la pyrolyse de biomasses végétales en conditions pauvres ou sans oxygène. Cette structure dépend fortement de la nature de la matière première ainsi que des paramètres opératoires tels que la température de pyrolyse, le temps de séjour et la vitesse de chauffage.

Bien que ces charbons ne présentent pas une structure cristalline ordonnée comme le graphite, certaines zones peuvent montrer une organisation partielle sous forme de feuillets carbonés empilés de manière irrégulière, en particulier lorsque la pyrolyse est effectuée à des températures relativement élevées.

Les charbons présentent généralement une porosité modérée, composée de pores de tailles variées (micropores, mésopores et macropores), bien que moins développée que celle des charbons activés. Cette microstructure leur confère une certaine capacité d'adsorption, suffisante pour des applications environnementales telles que la rétention des nutriments dans les sols ou la réduction partielle des polluants dans les eaux usées. [29]

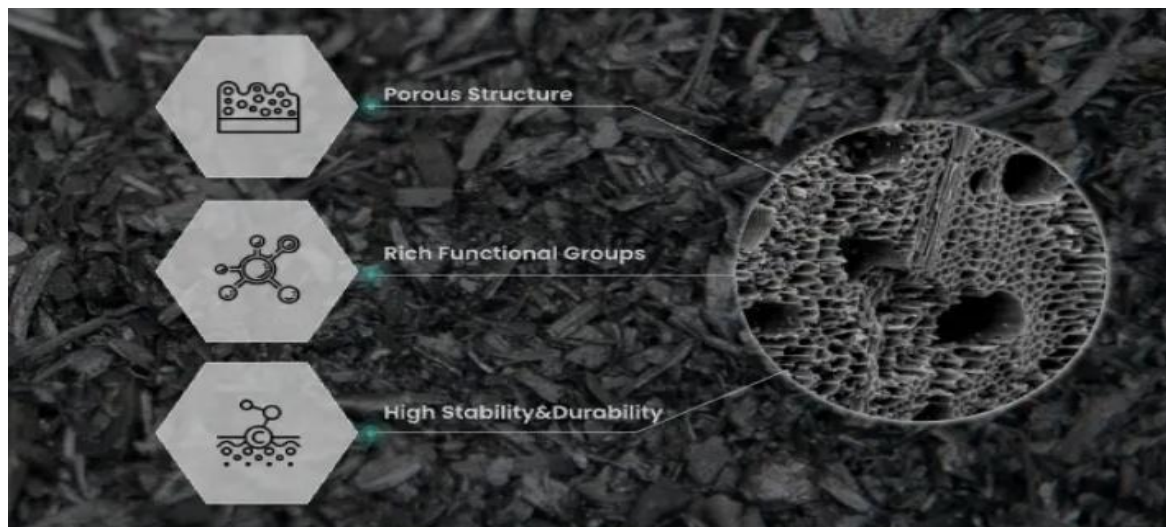


Figure II.3. Représentation de la microstructure d'un charbon [29]

II.6.1.2 Porosité et surface spécifique du charbon

- **Surface spécifique :**

La surface spécifique du charbon est généralement mesurée à l'aide d'azote moléculaire que recouvre l'espace poreux à l'intérieur de la structure du carbone lors de la mesure de sa capacité d'adsorption à une température de 77 K.

la surface spécifique du charbon peut être mesurée en mesurant la capacité d'adsorption du CO à une température de 298 K la surface spécifique est utilisée comme indicateur principal pour exprimer le niveau d'activité du matériau d'adsorption sur la base de la logique de la plus grande surface spécifique et du plus grand nombre de sites disponibles pour que l'adsorption se produise. Il existe plusieurs méthodes pour évaluer la surface spécifique du charbon, telles que la théorie BET [30].

- **Porosité :**

La porosité du biochar est fortement influencée par le type de biomasse utilisé comme matière première, ainsi que par les conditions de pyrolyse telles que la température, la durée du processus et la vitesse de chauffage. Ces facteurs déterminent la taille, la forme et la distribution des pores dans le matériau final.

Les pores sont généralement classés en trois catégories principales selon leur diamètre : Microspores, Méso pores, Macrospores. Cette classification a été adoptée par l'Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée (IUPAC) en 1972. Par ailleurs, le chercheur Dubinin (1979) a mené des études établissant une relation entre la porosité, le volume des pores et la surface spécifique des matériaux carbonés. Ses résultats ont démontré que ces propriétés structurales jouent un rôle majeur dans la capacité du charbon à adsorber différents composés présents dans les milieux gazeux ou liquides.

Tableau II.1. Caractéristiques de la porosité d'un charbon [31]

	Macrospores	Méso pores	Micropores
Diamètre des pores (Å)	>1000	100-1000	20-100
Volume poreux (cm³/g)	0,20-0,8	0,02-0,10	0,2-0,6
Aire massique (m² /g)	0,5-2	20-70	400-1500
Diamètre des pores (Å)	IUPAC >500	20-500	< 20

II.6.2 Propriétés chimiques de la surface des charbons

II.6.2.1 Composition globale du charbon

Bien que le carbone soit l'élément majoritaire du charbon, d'autres éléments tels que l'oxygène, l'hydrogène, le soufre, l'azote, ainsi que des minéraux sont également présents et influencent fortement les propriétés d'adsorption et les réactions chimiques du charbon. La fraction inorganique (les minéraux) du charbon, composée notamment de silicates, aluminosilicates, oxydes de calcium, magnésium, fer, potassium et sodium, joue un rôle important dans les procédés d'adsorption car elle modifie les interactions entre la surface du bio char et l'adsorbat.

L'hydrogène et les hétéroatomes présents (O, N, S, ...) sont à l'origine de groupes fonctionnels (acides carboxyliques, cétones, amines, ...) situés aux extrémités des unités poly aromatiques constituant le charbon. Ces groupes fonctionnels déterminent les propriétés chimiques de surface du charbon et influencent son affinité avec les solvants et les molécules en solution. [32]

II.6.2.2 Propriétés superficielles du charbon

Comme suggéré précédemment, les irrégularités et la présence d'hétéroatomes (oxygène, hydrogène, métaux ...) dans la structure du biochar permettent la formation de groupements fonctionnels à sa surface. Leur identification et leur caractérisation dépendent de la nature de la matière première et des procédés de pyrolyse ou d'activation utilisés [32, 33]. Ces groupements confèrent au charbon des propriétés acido-basiques, influençant ainsi ses interactions chimiques avec diverses substances.

II.7 Les fonctions de surfaces du charbon

À la surface des charbons, on trouve principalement des sites oxygénés, et parfois des sites contenant de l'azote, du soufre ou des halogènes. Ces groupes fonctionnels sont généralement situés en périphérie des structures graphéniques. Lorsque le charbon subit un traitement chimique, d'autres groupes fonctionnels peuvent être introduits de manière spécifique.

Les complexes oxygénés sont formés lorsque le charbon est traité avec des agents oxydants en phase gazeuse ou en solution. Ces traitements créent trois types d'oxydes à la surface : acides, basiques et neutres [34].

Il est important de noter que les complexes carbone-oxygène du charbon diffèrent de ceux rencontrés en chimie organique classique. Néanmoins, la surface poreuse présente majoritairement des groupes acides, tels que les fonctions carboxyliques, phénoliques, carbonyles, anhydrides, éthers, quinones et lactones [34].

En solution aqueuse, le charbon développe une charge électrique à sa surface qui dépend à la fois de la nature des fonctions de surface et des molécules présentes dans la solution. La connaissance de la chimie de surface du charbon est essentielle pour comprendre les mécanismes d'adsorption de certains composés inorganiques dissous [35].

Les charbons peuvent présenter un pH acide ou basique en solution. Ceux contenant des groupes acides présentent des propriétés d'échange cationique, tandis que ceux à caractère basique sont capables d'échanger des anions [36].

II.7.1 Caractère acide d'un charbon

Une charge négative en surface du charbon résulte de la présence de groupements fonctionnels oxygénés tels que les groupes carboxyliques (Ph-COOH), phénoliques (Ph-OH) et carbonyles (Ph-C=O). Ces fonctions confèrent au charbon un caractère acide ainsi que des propriétés hydrophiles. Les groupements carboxyliques et lac toniques ont tendance à polariser la surface du charbon, ce qui réduit l'adsorption des composés organiques non polaires en solution aqueuse tout en augmentant son affinité pour l'eau par la formation de liaisons hydrogène [37].

II.7.2 Caractère basique d'un charbon

Pour certain charbon, la surface peut développer une charge positive en milieu acide, bien que les mécanismes exacts ne soient pas encore totalement élucidés. Certains chercheurs attribuent ce comportement à la présence de régions enrichies en électrons π dans les cycles aromatiques du réseau graphitique, tandis que d'autres suggèrent la présence de complexes oxygénés de type hétérocyclique (tels que les pyrones ou chromènes) (voir figure 1.7). Ces sites riches en électrons agiraient comme des bases de Lewis, capables d'accepter des protons. D'après d'autres études, le caractère basique observé sur certains charbon pourrait également être dû à la chimisorption de l'oxygène moléculaire sur la surface, formant des espèces de type peroxyde (O_2^{2-}), qui agiraient alors comme des sites basiques actifs [38].

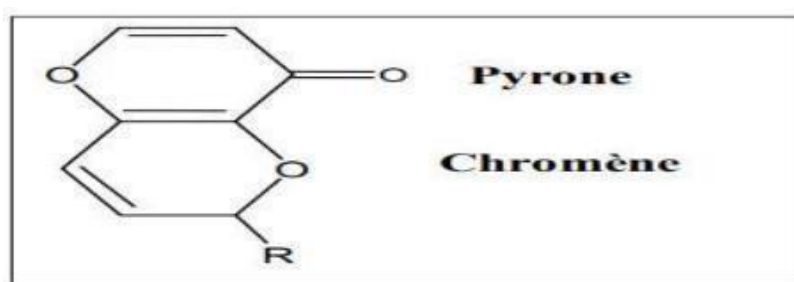


Figure II.4. : Groupements oxygénés à caractère basique [39].

II.8 Applications du charbon dans le traitement des eaux

II.8.1 Élimination des nitrates (NO_3^-)

Les nitrates, en excès, peuvent causer des problèmes environnementaux majeurs comme l'eutrophisation des milieux aquatiques et des risques pour la santé humaine (ex ,méthémoglobinémie).

Le charbon, grâce à sa charge de surface et à la présence de groupes fonctionnels (carboxyles, phénols), peut capter partiellement les nitrates présents dans la solution. L'adsorption se fait principalement par interactions électrostatiques, échange d'ions, et dans certains cas par rétention physique dans les pores. La capacité d'adsorption reste modérée, mais elle peut être optimisée par ajustement du **pH**, du **temps de contact**. [28]

II.8.2 Elimination Autres polluants

Outre les nitrates, le charbon a montré un certain potentiel dans la rétention ou la réduction d'autres types de contaminants présents dans l'eau :

- **Métaux lourds** (comme le plomb, le cadmium ou le cuivre) : certaines charges négatives à la surface du charbon permettent l'attraction et la fixation de cations métalliques.
- **Composés organiques** (comme les pesticides, les résidus pharmaceutiques ou les tensioactifs) : ils peuvent être adsorbés en fonction de leur polarité et de leur affinité avec les fonctions de surface du charbon.
- **Huiles et hydrocarbures** : grâce à la structure carbonée hydrophobe du charbon, certaines fractions d'huiles peuvent être piégées par interactions de type Van der Waals.

Ces applications restent dépendantes de plusieurs facteurs, notamment la température de pyrolyse, la nature de la biomasse, la granulométrie du charbon et les conditions physico-chimiques de la solution à traiter [28].

II.9 L'adsorption

L'adsorption est un phénomène d'interface, pouvant se manifester entre un solide et un gaz ou un liquide. Le phénomène est général pour toutes les surfaces mais on cherche à l'exploiter en employant des solides à porosité élevée.

Nous limiterons cette étude à l'adsorption solide/liquide, car elle concerne notre travail. Le support solide est l'adsorbant, tandis que le composé fixé est appelé adsorbât. L'interaction entre l'adsorbât et l'adsorbant met en jeu des forces de natures différentes de type physique et ou chimique. [40]

II.10 Types d'adsorption

La nature des liens entre l'adsorbant et la substance adsorbée, et le grandeur de l'énergie mise en jeu ont permis de distinguer deux types d'adsorption. [40]

II.10.1 Adsorption physique

Dans la physio sorption, il n'y a pas de transfert d'électrons. Elle n'est pas spécifique et peut être multicouche. L'adsorption physique est généralement réversible car l'énergie mise en cause est faible, (de l'ordre de quelques kilocalories par mole). Les forces impliquées sont des forces d'attraction de type VAN DER WALLS [40].

II.10.2 Adsorption chimique

Elle correspond à la création de véritables liaisons chimiques par le transfert électronique entre les molécules de l'interface des deux phases. Ces liaisons sont de type covalent, mais elles peuvent être légèrement polarisées.

Les énergies mises en jeu sont plus grandes que dans le cas de physio sorption. Ce type d'adsorption spécifique n'apparaît le plus souvent qu'à des températures assez élevées et ne devient réversible qu'à des températures encore plus élevées. [40]

II.11. Description du mécanisme d'adsorption

Le mécanisme d'adsorption peut être décomposé en plusieurs étapes :

- ✓ 1 étape (la diffusion externe) : le transfert des molécules de soluté de la phase liquide externe vers la phase liquide liée à la particule solide (par diffusion et par convection)
- ✓ 2ème étape (la diffusion interne) : le transfert du soluté à travers le film liquide vers la surface externe de l'adsorbant.
- ✓ 3ème étape la diffusion de l'adsorbat à l'intérieur de la particule de l'adsorbant sous l'effet du gradient de concentration.
- ✓ 4ème étape : l'adsorption dans un micropore. [41]

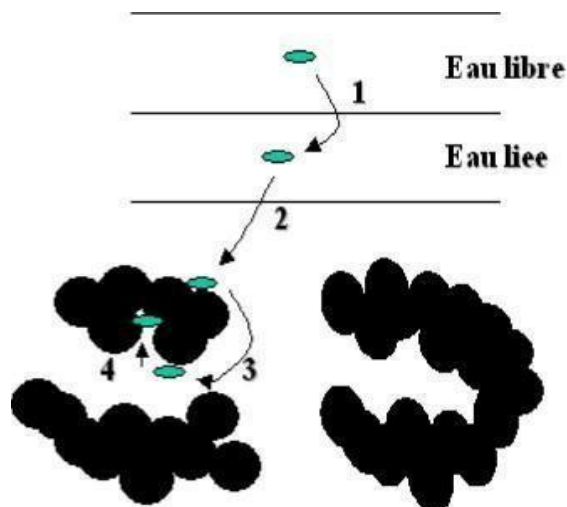


Figure II.5. Mécanisme d'adsorption en phase aqueuse sur charbon actif [41]

Tableau II.2. Les différences entre l'Adsorption physique et chimique [42].

Propriétés	Adsorption physique	Adsorption chimique
Température du processus	Relativement basse à la température d'ébullition de l'adsorbât	Plus élevée
Chaleur d'adsorption	1 à 10 kcal/mol	Supérieur à 10 kcal/mol
Liaison	Physique de Van Der Waals	Chimique
Spécificité	Processus non spécifique	Processus spécifique
Désorption	Facile	Difficile
Cinétique	Rapide	Lente
Formation de couches	Formation de multicouches	Formation de monocouche

II.12. Cinétique d'adsorption

La cinétique d'adsorption est définie par l'évolution de la quantité adsorbée en fonction du temps de contact adsorbant/adsorbât. L'étude cinétique des processus d'adsorption donne des informations sur le mécanisme d'adsorption et sur le mode de transfert des solutés de la phase liquide à la phase solide. La littérature rapporte plusieurs modèles cinétiques nous présentons ci-dessous les modèles les plus utilisés pour l'adsorption de solutés en solution liquides. [43]

II.13. Facture influençant l'adsorption

L'efficacité d'un adsorbant vis-à-vis d'un adsorbât dépend d'un nombre important de paramètres dont les principaux sont:

- ✓ Les caractéristiques de l'adsorbant : polarité, volume poreux, surface spécifique, fonctions superficielles....
- ✓ Les caractéristiques de l'adsorbât : polarité, solubilité, poids et saturation moléculaire....
- ✓ Les paramètres physiques : tels que la température et le pH qui ont une

influence considérable sur le phénomène d'adsorption.

- ✓ Lors de l'adsorption, la valeur du pH joue souvent un rôle important, l'adsorption est maximale au point isoélectrique, car les liaisons avec l'eau y sont minimales [42].

II.14. Domaines d'applications d'adsorption

L'adsorption qui s'avère comme un traitement efficace à l'industrie. En pratique, elle est utilisée dans les domaines suivants:

- ❖ Séchage.
- ❖ Traitement des huiles.
- ❖ Traitement des gaz.
- ❖ Industrie textile.
- ❖ Décoloration et traitement des eaux [44].

Conclusion

Le charbon représente un matériau prometteur dans le domaine du traitement environnemental, notamment pour l'épuration des eaux et l'amélioration des sols. Ce chapitre a mis en évidence les propriétés physico-chimiques de ce matériau, en soulignant l'influence des matières premières et des conditions de pyrolyse sur sa porosité, sa surface spécifique et ses fonctions de surface.

Bien que ses capacités d'adsorption soient plus limitées que celles des charbons activés, le biochar non activé présente plusieurs avantages : faible coût de production, simplicité de préparation et disponibilité des résidus végétaux tels que les peaux de banane. Plusieurs études ont démontré son efficacité dans la rétention de certains polluants comme les nitrates et les métaux lourds, grâce à la présence naturelle de groupes fonctionnels à sa surface [39].

Ainsi, la compréhension des relations entre les caractéristiques du charbon et les conditions de sa production constitue une étape clé pour optimiser ses performances et orienter son utilisation vers des applications environnementales durables, en particulier dans les contextes à ressources limitées.

Chapitre III :
Matériels , Méthodes ,
résultats et discussions

III.1. Introduction

Après avoir passé en revue les aspects théoriques liés au biochar et son efficacité dans le traitement des eaux usées, ce chapitre présente l'aspect pratique de l'étude, à travers laquelle l'efficacité du biochar préparé à partir de peaux de banane à une température de 400°C a été étudiée. Pour éliminer le Nitrate des eaux usées a été évaluée.

III.2. L'objectif du travail

Une série d'expériences en laboratoire a été réalisée selon une méthodologie spécifique basée sur le prélèvement d'échantillons à intervalles de temps réguliers et leur analyse pour déterminer les changements dans les concentrations de polluants. (Nitrate NO_3^-)

Ce chapitre vise à présenter la méthodologie utilisée pour mener l'expérience, les résultats obtenus et leur analyse afin de tirer des conclusions fondées sur des données sur les conditions optimales d'utilisation du bio char dans le traitement de l'eau.

III.3. Matériels et méthodes

III.3.1. Matériaux utilisés

Les matériaux suivants ont été utilisés dans cette étude:

- ✓ Biochar préparé à partir de matières premières végétales (pelures de banane).
- ✓ Eaux usées réelles obtenues à partir d'un lave-auto.
- ✓ Solutions standard pour l'analyse de nitrate.

Les Appareils:

- La figure montre un appareil de laboratoire portable, spécifiquement un Hach SL1000 Portable Parallèle Analyzer (PPA). Cet outil est utilisé pour des analyses rapides de la qualité de l'eau, notamment pour des paramètres tels que le chlore, les nitrates, les nitrites, la dureté, etc., en fonction des modules chimiques insérés. La configuration comprend : Le dispositif SL1000 (au centre), Un support pour les sondes (en haut au centre), Des câbles de données et fils de sondes associés, Une fiche imprimée pour l'enregistrement des résultats d'analyses d'eau [45].



Figure.III.1. Multimètre qualité de l'eau [45]

- L'appareil sur la figure est un HI 2550 de Hanna Instruments, utilisé pour mesurer le pH, le potentiel redox (ORP), la conductivité électrique (EC), les solides dissous totaux (TDS) et la salinité (Na Cl) [46].



Figure III.2. Conductimètre HI2550 de Hanna Instruments [46]

La figure montre un pH-mètre modèle AD8000 de la marque ADWA, utilisé pour mesurer : le pH (potentiel hydrogène), et la température des solutions liquides. Sur l'écran, on peut lire : une valeur de pH = 2,87, ce qui indique une solution fortement acide, une température d'environ 21,2°C (valeur partiellement visible).

Ce type d'appareil est couramment utilisé dans les laboratoires pour le contrôle de la qualité de l'eau, des solutions chimiques ou des produits alimentaires [47].



Figure III.3. pH-mètre modèle AD8000 de la marque ADWA [47]

III.3.2. Préparation du biochar

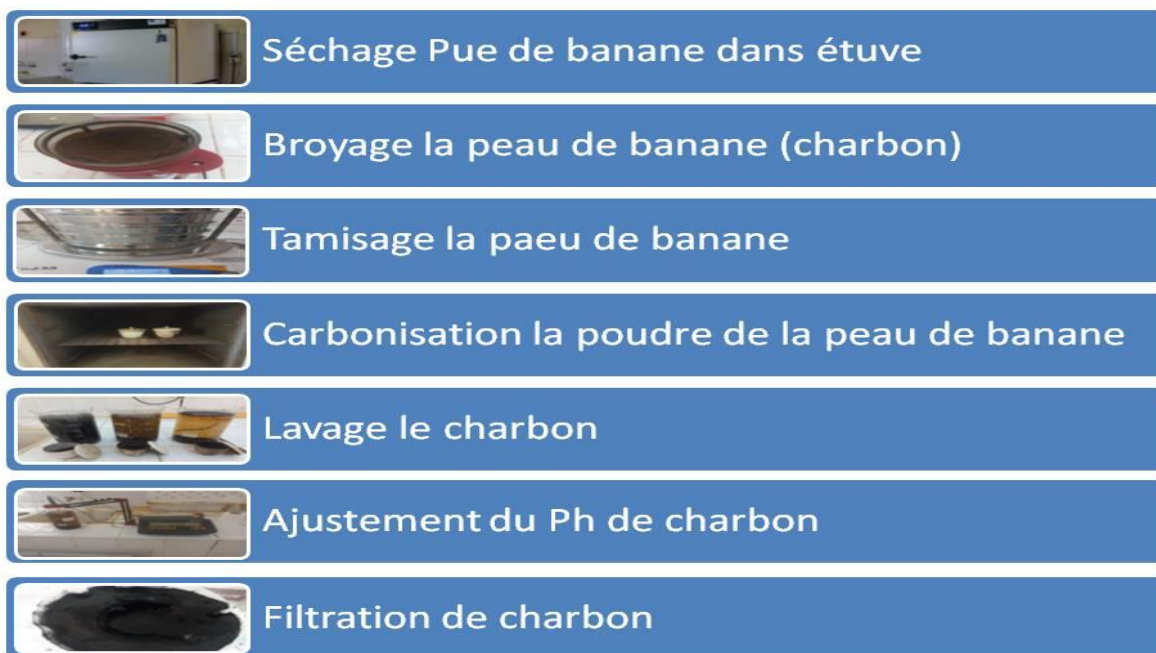


Figure III.4. Schéma montrant le processus de préparation du biochar à partir de peaux de banane.[48]

III.3.3. Collecte des eaux usées (échantillonnage)

Les stations de lavage de voitures sont une source importante d'eaux usées polluées qui contiennent une variété de contaminants physiques, chimiques et organiques. À mesure que le nombre de ces stations augmente, la quantité d'eau polluée rejetée dans l'environnement augmente, ce qui nécessite une étude minutieuse et le développement de solutions de traitement avant de la rejeter dans le milieu naturel.

Cette eau possède des propriétés complexes qui incluent :

Polluants solides : poussières, sable, résidus organiques, fibres.

Matières organiques: huiles, graisses, résidus de carburant.

Produits chimiques: détergents, tensioactifs, solvants, acides ou alcalis.

Métaux lourds : tels que le plomb, le zinc et le cuivre, résultant de la corrosion des pièces automobiles ou des composants de freins.

Polluants azotés : résultant de la décomposition de matières organiques, tels que l'ammonium et les nitrates. [49]

Les eaux usées utilisées dans cette étude ont été collectées dans une station de lavage de voitures. Cette eau est le résultat des opérations de nettoyage des voitures et comprend un mélange d'huiles, de détergents, de saletés et de matières en suspension, ce qui la rend riche en polluants organiques et inorganiques.

Étapes de préparations:

- Les eaux usées ont été collectées directement à la sortie des eaux usées après le lavage.
- Des récipients en plastique propres ont été utilisés pour recueillir l'eau.
- Les bouteilles sont remplies à ras bord pour réduire la quantité d'air à l'intérieur et éviter les changements dans la composition de l'eau dus à l'oxydation.
- Les échantillons ont été transportés directement au laboratoire le jour même à l'aide d'un conteneur réfrigéré pour éviter la biodégradation ou la modification des propriétés de l'échantillon.
- L'eau a été conservée dans un endroit ombragé à température ambiante (ou dans un réfrigérateur à 4°C) jusqu'au début des expériences.
- On le filtre d'abord à l'aide d'une étamine ou d'un tamis pour ne séparer que les solides grossiers. Comme des feuilles, du sable grossier ou de petits déchets plastiques.

III.4. Méthodologie de travail

III.4.1. Analyse initiale des eaux usées

Avant tout traitement, les paramètres suivants des eaux usées sont été mesurés:

Conductivité spécifique

pH

Concentration en nitrates (NO_3^-)



Figure.III.5. Montage pour analyse initiale des eaux usées

III.4.2. Expérience de traitement au biochar

Les eaux usées ont été traitées avec du biochar préparé à température (400°C) comme suit :

Un volume d'eaux usées a été prélevé (200ml), à concentration de nitrate (70mg\L)

Différentes quantités de biochar (0,25g, 0,5g, 0,75g, 1g) ont été ajoutées aux échantillons.

Chaque expérience a été réalisée à température ambiante et les mélanges ont été maintenus sous agitation continue.

Toutes les demi-heures, un échantillon de l'eau traitée était prélevé et la concentration en nitrate était mesurée. Par compteur de qualité de l'eau multi paramètres

Ce travail expérimental a été réalisé au Laboratoire Algérien des Eaux, Unité de Biskra.



Figure.III.6. Expérience de traitement au biochar

III.5. Résultats de l'analyse des eaux usées avant et après traitement par le biochar

Une analyse physico-chimique complète des eaux usées issues d'une station de lavage automobile a été réalisée avant et après traitement par le bio char. Le tableau suivant présente les variations observées dans les principaux paramètres étudiés, ainsi que le taux d'élimination obtenu pour chaque polluant :

Tableau III.1 Évolution des paramètres physico-chimiques des eaux usées avant et après traitement par biochar, et taux d'élimination associé

Paramètres	Avant traitement	Après traitement	Taux d'élimination (%)
Turbidité	171.00 mg/L	2.30 mg/L	98.65
Oxygène dissous	12.50 mg/L	0.13 mg/L	98.95
Ph	5.60	6.25	
Conductivité	4290 μ S/cm	3200 μ S/cm	25.41
Nitrites	11.70 mg/L	0.12 mg/L	98.95
Nitrates	70.50 mg/L	0.74 mg/L	98.95
Ortho phosphates	62.20 mg/L	0.65 mg/L	98.95
Ammonium	17.20 mg/L	2.50 mg/L	85.47
Fer total	6.50 mg/L	0.07 mg/L	98.95
Cuivre	1.30 mg/L	0.01 mg/L	98.95
Lithium	2.66 mg/L	0.03 mg/L	98.95
Aluminium	4.20 mg/L	0.04 mg/L	98.95
Manganèse	3.60 mg/L	0.04 mg/L	98.95
DCO	650.00 mg/L	26.00 mg/L	96.00

III.5.1 Méthode de calcul du taux d'élimination

Le taux d'élimination pour chaque polluant a été calculé à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Taux d'élimination (\%)} = ((C_{\text{avant}} - C_{\text{après}}) \div C_{\text{avant}}) \times 100$$

Analyse des résultats

Les résultats obtenus démontrent une efficacité remarquable du bio char dans l'élimination de la majorité des polluants, avec des taux de réduction dépassant 98 % pour, les ortho phosphates, les métaux lourds et la DCO. Une diminution significative de la turbidité a également été observée, traduisant une excellente capacité d'adsorption des matières en suspension.

Par ailleurs, une légère augmentation du pH a été notée, allant vers des valeurs plus neutres, ce qui est favorable dans le cadre du traitement des eaux. La conductivité a

diminué de manière modérée (environ 25 %), indiquant une réduction partielle des sels dissous.

Les résultats de l'analyse ont également montré que le bio char a une grande capacité à éliminer les nitrates, avec un taux d'élimination de 98,95 %, reflétant sa grande efficacité dans l'absorption de cette substance. Ce résultat fournit une preuve solide de l'efficacité du bio char comme adsorbant dans le traitement de la pollution par les nitrates, l'un des polluants les plus importants ayant de graves impacts environnementaux et sanitaires dans l'eau.

III.6. Etude de l'effet des paramètres gouvernants l'adsorption

III.6.1 L'effet des temps

Pour étudier l'effet du temps sur le phénomène d'adsorption nous avons préparé 4 échantillons d'une solution de nitrate ($V = 200$ ml), chaque échantillon a été réalisées avec ; un charbon carbonisée à 400°C pendant 1h, puis on les place un JAR test, qui est programmée à une vitesse d'agitation de 200 tr/min à différents temps d'agitation (0, 5, 10, 20, 30, 40 50, 60, 70 80et 90min). à 7.07 pH. L'effet du temps de contact sur l'élimination du nitrate est illustré sur la figure III.7

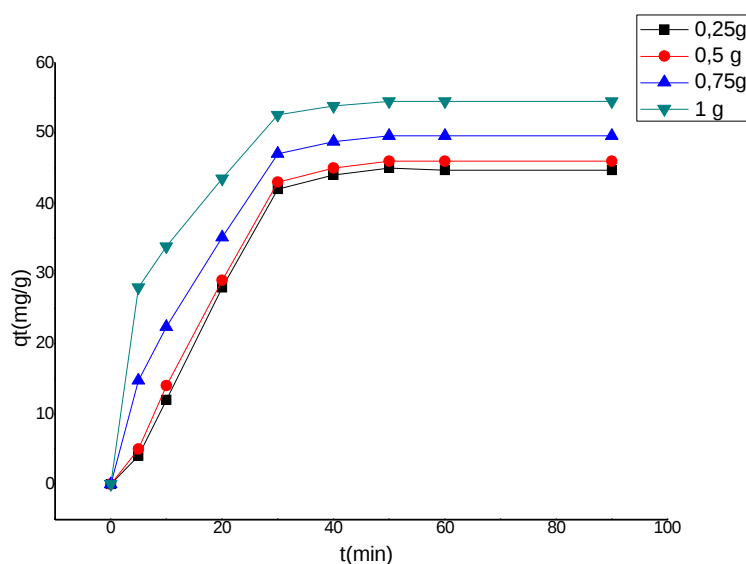


Figure III.7 Effet de temps d'adsorbant sur la quantité d'adsorption

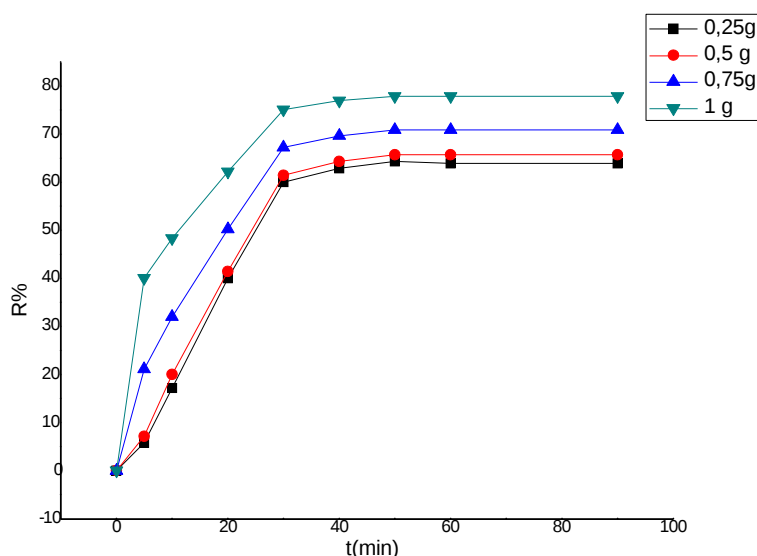


Figure III.8 Effet de temps d'adsorbant sur le rendement sur un biochar

Le taux d'élimination du nitrate était plus élevé au début jusqu'à 40 min et, par la suite, la vitesse d'adsorption devient pratiquement très lente et après 50 min. il commence la différence dans le degré d'adsorption peut être due au fait qu'au début tous les sites à la surface de l'adsorbant étaient vides et le gradient de concentration en soluté était relativement élevé. En conséquence, l'étendue de l'élimination du nitrate diminuait avec l'augmentation du temps de contact, qui dépend du nombre de sites vacants à la surface de la résine. Sur la base de ces résultats 50 min et 1g/L a été considéré comme le temps et la mieux se concentrer optimal pour le reste des expériences (fig.III.8).

III.6.2. L'effet de la masse

L'effet de la masse initiale de biochar est très indispensable pour connaître la meilleure quantité adsorbée à quelle masse. Les masses de biochar étudié sont 0.25g, 0.5g, 0.75g et 1 g

Sur la figure III.9. Le rendement a augmenté avec le temps. Ceci s'explique par l'absorption rapide du nitrate par le bio charbon, qui se stabilise alors du fait de la saturation des pores du bio charbon.

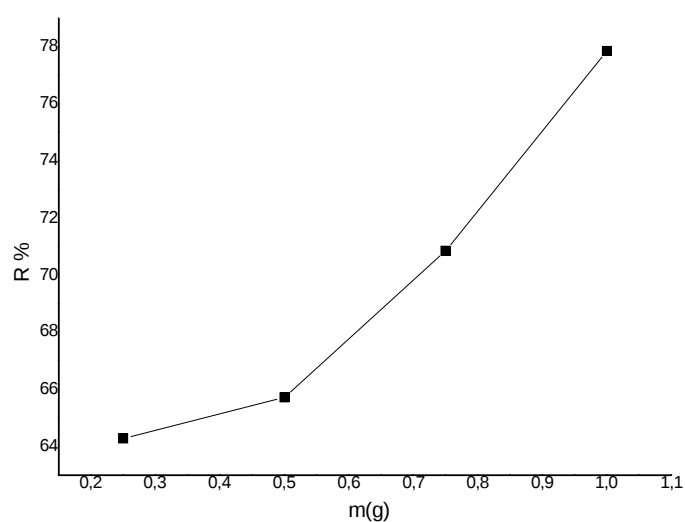


Figure III.9: Effet de la masse d'adsorbant sur le rendement

La figure III.9 montre que dans tous les cas, le pourcentage d'élimination du nitrate augmente lorsque la masse de l'adsorbant augmente. L'augmentation de la masse de l'adsorbant augmente la surface spécifique et donc le nombre des sites disponibles d'adsorption pour conséquence l'augmentation de la quantité de nitrate adsorbé. Bien que le pourcentage d'adsorption augmente avec l'augmentation de la dose d'adsorbant.

III.6.3. L'effet du pH

Pour étudier l'effet du pH sur le processus d'adsorption, nous avons mené des expériences à différents pH allant de 2 à 12, tous les autres paramètres opératoires étant maintenus constants. Les résultats ont ensuite été enregistrés et analysés à l'aide La courbe suivante :

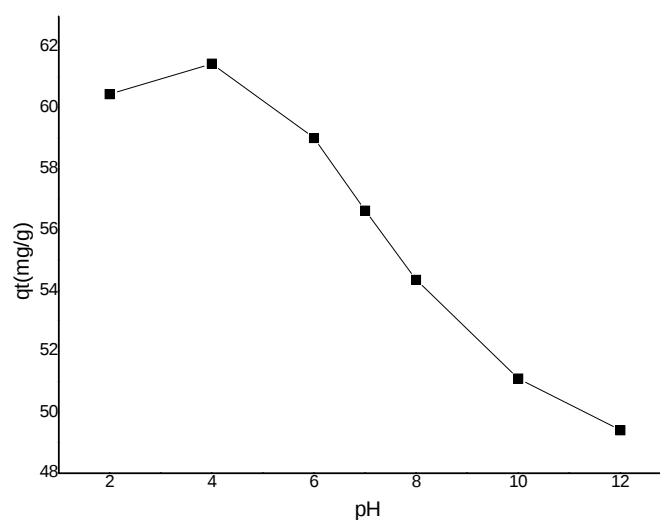


Figure III.10: Effet de pH sur la quantité d'adsorption

La Figure III.10 montre que les meilleurs taux d'élimination de nitrate est obtenue à un pH acide, et que le taux d'élimination atteint son maximum à un pH 4, une augmentation d'efficacité est observée avec aux pH=2 jusqu'à pH=5 Puis on remarque une diminution d'efficacité avec l'augmentation du pH= 6 jusqu'à pH= 12.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail est de mettre en lumière un matériau naturel de récupération (peau de banane) qui se transforme en biochar à travers une étude expérimentale sur sa capacité adsorbé le nitrate en solution aqueuse en vue d'une application dans le traitement de l'eau. Les résultats obtenus lors de notre étude ont mis en évidence les points suivants:

- L'efficacité d'élimination du nitrate augmente avec l'augmentation du temps de contact et la masse de bio char.
- L'efficacité d'élimination du biochar varie en fonction du temps d'agitation, avec une efficacité maximale obtenue après 60 min.
- l'efficacité d'élimination du biochar varie en fonction de la masse, avec une efficacité maximale obtenue à une masse de 1g
- Le meilleur rendement est obtenu en utilisant le biochar carbonisé à 400°C pendant 1heure à une masse de 1g et de temps de 60 min.
- La poudre de peau de banane est un biomatériau ayant des capacités d'adsorption intéressantes

Référence

- [1] Benhabiles, O., Benyekhlef, S., & Drouiche, N. Utilisation du charbon actif issu de déchets agricoles pour le traitement des eaux usées. Revue des Énergies Renouvelables. (2016).
- [2] labbaci.H, Boumenkare .T, étude Analyse des anomalies et redimensionnement de la STEP de la wilaya de SKIKDA, mémoire de fin d'étude, université Badji Mokhtar Annaba,2019
- [3] K BENGOUGA .Chapitre 1 : Les eaux usées. Mémoire de Master, Université Mohamed Khider – Biskra Algérie.2010
- [4] Metcalf & Eddy. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery (5e éd.). Mc Graw-Hill Education (2014).
- [5] Benlebna.M, Kaddache.A, étude Analyse des eaux usées de la zone 27,mémoire de master, université Kasdi Merbah Ouargla, 2021
- [6] Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., & Ok, Y. S. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. Chemosphere, 99, 19-33 (2014).
- [7] Barnaud, C., Souchère, V., & Leenhardt, D. Gestion des pollutions diffuses agricoles : approches et enjeux. Innovations Agronomiques, 80, 55-70 (2020).
- [8] World Health Organization (WHO). Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum. Geneva: WHO (2017).
- [9] Chebbo, G. Caractérisation des rejets urbains de temps de pluie. Techniques de l'Ingénieur, TBA141(2006).
- [10] Rodier, J., Bazin, C., Broutin, J. P., Chambon, P., & Champsaur, H. L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer (9e éd.). Dunod (2009).
- [11] United Nations Environment Programme (UNEP). A Snapshot of the World's Water Quality: Towards a global assessment. Nairobi: UNEP (2016).
- [12] Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. Wastewater Engineering:

Treatment and Resource Recovery (5th ed.). Mc Graw-Hill Education (2014).

[13] APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (23rd ed.). American Public Health Association (2017).

[14] Metcalf & Eddy. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery (5th ed.). McGraw-Hill Education (2014).

[15] Henze, M., van Loosdrecht, M. C. M., Ekama, G. A., & Brdjanovic, D. Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design. IWA Publishing (2008).

[16] Guenouai.R, étude suivi et étude des procédés d'épurations des eaux usées urbaines au niveau de l'ONA Touggourt\ Ouargla et caractérisation par méthode physico-chimiques, mémoire de master, université Kasdi Merbah Ouargla 2019.

[17] Tebib.F, étude Evaluation des performances épuratoires de la STEP de Groupement Reggane Nord GRN, mémoire de master, université Ahmed Draia ADRAR,2020.

[18] Rodier, J., et al. L'analyse de l'eau – eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. Dunod, 9^e édition (2009).

[19] Bali, M, Traitement des eaux usées. Institut Supérieur des Sciences et Techniques des Eaux, Université de Gabès, Tunisie.2024

[20] Dr Fadel Amar, cour de traitement physico-chimique et biologique des eaux usées, université Mohamed Khider – Biskra, 2023

[21] Maref.N , Cours de traitement et épuration des eaux. Faculté de Technologie, Université de Sidi Bel Abbès, Algérie.2020

[22] Toubal, A. K. Qualité et traitement des eaux. Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Université Hassiba Benbouali de Chlef, Algérie.2020

[23] Diabaté, S; Boncana, B. Redimensionnement du décanteur de la STEP des eaux usées de l'Allelick – Commune d'El Bouni – Annaba – Algérie, Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar – Annaba 2023

[24] Tan, X., Liu, Y., Zeng, G., Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. Chemosphere, 125, 70–85. (2015).

- [25] L. Aouissi, W. Merabti Étude Physico-chimique et Bactériologique Et Développement d'un Système de Traitement (membrane à Base de Charbon Actif), Mémoire de projet de fin d'études, Université 8 Mai 1945 Guelma , 2019
- [22] Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.). Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation. Routledge. (2015).
- [27] Gharou A. Nail M étude Adsorption De Polluant Organique « Diuron » Sur Charbon Actif Obtenu A Partir Des Déchets Agro-alimentaires « Peau De Banane » Mémoire De Fin D'étude UNIVERSITAIRE DE TISSEMSILT 2019
- [28] Mohan, D., Sarswat, A., Ok, Y. S., & Pittman Jr, C. U.Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent—A critical review. Bioresource Technology, 160, 191–202. (2014).
- [29] L. Meljac, Etude d'un procédé d'imprégnation de fibre de carbones activés modélisation des interactions entre ces fibres et le sulfure d'hydrogène, Thèse de Doctorat, Université de Jean Monnet, Saint-Etienne.2004
- [03] Keiluweit, M., Nico, P. S., Johnson, M. G. Kleber, M. Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar). Environmental Science & Technology, 44(4), 1247–1253. (2010).
- [31] Estevinho B.N., Ratola N., Alves A. & Santos L.. Pentachlorophenol removal from aqueous matrices by sorption with almond shell residues. J. Hazard. Materials, volume 137, Issue 2, pages 1175-1181. 2006
- [32] Nait Merzoug Nesrine. Application des tiges de dattes dans l'adsorption de polluants organiques, Mémoire de Magister, Université Mohamed Cherif Massaadia Souk-Ahras, 2014.
- [33] M .A. SLASLI, Modélisation de l'adsorption par les charbons microporeux: Approches théorique et expérimentale, Thèse de Doctorat, Université de Neuchâtel, 2002.
- [34] Présentation sur le traitement pour eau potable, Ecoles des Ponts, Paris Tech (ENPC).2005
- [35] Projet d'études par J. Omlin, L. Chesaux, Evaluation de charbons actifs en poudre (CAP) pour l'élimination des micropolluants dans les eaux résiduelles urbaines, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne 2010.
- [36] S. Donna, N. Rebecca, J. Emma, G. Shay , United States Geological Survey: Environmental Factors and Chemical and Microbiological Water- Quality, Fondation de l'Eau Potable Sûre. 2004.
- [37] www.asseau.com/fr103_9.html 15\mars \2025

- [38] S. Marsteau, Adsorption, traitements des gaz dangereux captés sur les lieux de travail, Edition 4263, Département Ingénierie des Procédés, Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS) 2005
- [39] R. Beauchet, Oxydation catalytique de divers composés organiques volatils (COV) à l'aide des catalyseurs zéolithiques, Thèse de Doctorat, Université de Poitiers. 2008
- [40] KHALFAOUI. B BENBACHA .W étude Adsorption des polluants organiques par les charbons actifs Mémoire de master Université Mouhamed El Bachir El Ibrahimi de Bordj Bou Arréridj Septembre 2020.
- [41] DOUADI Mohammed, MEDAKENE Abderrahmane Etude de l'adsorption d'une eau polluée par des hydrocarbures sur charbon actif, Mémoire MASTER ACADEMIQUE, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2017
- [42] MOUMENINE Sarah, Elimination de polluants des eaux d'usines par adsorption sur charbon de chêne en combinaison avec un désinfectant, mémoire d'ingénieur d'état en chimie, Université Abou Bekr Belkaid – TLEMSEN, 2011.
- [43] D. Guignard, L'essentiel de la cinétique et de la thermodynamique chimique, Edition Eyrolles, Paris, 1992.
- [44] G. Ozgul et al, Préparation of activated carbon from a renewable bio-plant of Euphorbia rigida by H₂SO₄ activation and its adsorption behavior in aqueous solutions, Applied surface science, 253 11 4843-4852, 2007
- [45] Radja. A Dani .kH étude Elimination d'un colorant « Indigo Carmine » par adsorption sur charbon actif Diplôme de Master en Chimie Université de Saida 2020
- [46] <https://www.hach.com/sl1000-portable-parallel-analyzer-ppa/product?id=31859511630> 12\Avril\2025 [37] <https://www.hannainst.com> 12\Avril\2025
- [47] <https://www.adwainstruments.com> 12\Avril\2025
- [48] Nadjla chennoufi. étude Elimination de bleu Méthylène sur Biochar, Mémoire de fin d'étude, université de biskra. 2024
- [49] Zaneti, R. N., Etch pare, R., & Rubio, J. Car wash wastewater treatment and water reuse – a case study. Water Science and Technologies, 67(1), 82–88. (2013).