



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCE

MEMOIRE

Présenté à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE CHIMIE

Pour l'obtention du diplôme de :

MASTER EN CHIMIE

Spécialité : Chimie Analytique

Par :

M^{lle} BENLADGHEM Zoubida

Sur le thème

Optimisation de l'élimination des colorants en milieu aqueux par un matériau non coûteux

Soutenu publiquement le 6 juin 2026 à Tlemcen devant le jury composé de :

Mr MIRAOUI Abdelkader	MCA	Université de Tlemcen	Président
Mme MAHROUG Hanane	MCA	Centre Universitaire de Maghnia	Encadrante
Mme BENMANSOUR Yasmine	MCB	Université de Tlemcen	Examinatrice
Mr OUKEBDANE Kalil	Professeur	Université de Tlemcen	Co-encadrant

Année Universitaire : 2025 ~ 2026

Remerciements

Ce travail a été réalisé au laboratoire des Technologies de Séparation et de Purification LTSP à l'Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen. Mes sincères remerciements s'adressent à mon encadrante, Docteur **Hanane MAHROUG** pour son aide précieuse, ses conseils, sa disponibilité et son suivi tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Je tiens également à exprimer mes sincères remerciements à mon co-encadrant et responsable de la spécialité Master ***Chimie Analytique***, Monsieur le Professeur **Khalil OUKEBDANE** pour l'accompagnement et le soutien apportés tout au long de mon parcours universitaire.

J'exprime mes vifs remerciements à Monsieur le Professeur **Nasr Eddine BELKHOUCHE**, directeur du laboratoire des Technologies de Séparation et de Purification et professeur à l'Université de Tlemcen pour les efforts fournis et pour les bonnes conditions offertes durant mon parcours universitaire.

J'adresse aussi mes remerciements sincères aux membres du jury, Monsieur **Abdelkader MIRAOU** pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury et Madame **Yasmine BENMANSOUR** pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Je suis très reconnaissante envers Madame **Wafaa BENAOUA**, ingénieure au sein du laboratoire LTSP pour son accompagnement et son soutien durant la réalisation de ce travail. Je remercie aussi Monsieur **Boumadien BENMANSOUR**, ingénieur au sein du laboratoire LASNABIO pour la réalisation des analyses IRTF.

Enfin, je remercie tous mes professeurs de l'équipe de formation du master ***Chimie Analytique*** pour la qualité de leur enseignement et leurs précieux conseils.

Dédicace

En premier lieu, je dédie ce travail à moi-même, pour tous les efforts, la patience, le courage et la détermination que j'ai fournis tout au long de ce parcours. Malgré les difficultés et les moments de fatigue, je n'ai jamais abandonné et j'ai continué à avancer afin d'atteindre ce résultat dont je suis fière aujourd'hui.

*Je dédie ensuite ce travail à mes très **chers parents**, qui ont toujours été à mes côtés par leur amour, leurs sacrifices, leurs conseils et leur soutien inestimable. Aucun mot ne pourra exprimer ma gratitude envers eux pour tout ce qu'ils ont fait pour moi.*

*À **mes sœurs**, pour leur présence, leur tendresse et leurs encouragements permanents qui m'ont donné la force de continuer.*

*À **toute ma famille**, pour leur soutien, leurs prières et leurs encouragements qui m'ont accompagnée durant tout ce parcours.*

*Enfin, à mes amies, **Soumia, Rabiaa, Hayet et Salima** pour leur soutien, leur aide, leurs conseils et tous les beaux moments partagés durant cette période. Leur présence a rendu ce parcours plus agréable et inoubliable.*

Sommaire

Liste des abréviations et des symboles

Liste des figures

Listes des tableaux

Introduction générale 1

Chapitre I : Recherche bibliographique

I.1. Les colorants et les effluents colorés	3
I.1.1. Définition et structure chimique	3
I.1.2. Types des colorants	6
I.1.3. Les colorants étudiés et leurs propriétés	7
I.1.4. Origine des colorants dans les rejets industriels	8
I.1.5. Risques et toxicité des colorants	9
I.1.6. Procédés de traitement des effluents colorés	10
I.2. Chimie de l'adsorption	12
I.2.1. Définition et types d'adsorption	12
I.2.2. Définition et classe des adsorbants	13
I.2.3. Mécanisme d'adsorption	14
I.2.4. Les paramètres influençant l'adsorption	15
I.2.5. Cinétique d'adsorption	15
I.2.6. Isothermes et modélisation d'adsorption	16
I.3. La biomasse lignocellulosique	18
I.3.1. Définition des bio-adsorbant	18
I.3.2. Définition et composition de la biomasse lignocellulosique	18
I.3.3. L'origine de la biomasse lignocellulosique	20
I.3.4. Propriétés physico-chimiques de la biomasse lignocellulosique	21
I.3.5. Application de la biomasse lignocellulosique	22

Chapitre II : Materials et Méthodes

II.1. Protocole de la préparation de sciure de bois	23
II.2. Caractérisation physico-chimique du l'adsorbant sciure de bois	24
II.2.1. La spectroscopie FTIR	24
II.2.2. Détermination du point de charge nulle	25
II.3. Préparation des solution aqueuses et courbes d'étalonnages	25

II.4. Dosage des colorants par spectroscopie UV-Visible	26
II.5. Procédé général d'adsorption par la méthode en batch.....	27
II.6. Paramètres d'adsorption étudiés	28
II.6.1. Effet de granulométrie	28
II.6.2. Effet de masse	29
II.6.3. Effet de pH	29
II.6.4. Effet du temps de contact	29
II.6.5. Effet de la concentration initiale en colorant	29
II.6.6. Effet de la température	30
II.7. La régénération	30
II.7.1. L'adsorption	30
II.7.2. Régénération	30
II.7.3. Cycle adsorption-désorption	31

Chapitre III : Résultats et Discussion

III.1. Caractérisation de l'adsorbant	32
III.1.1. Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (IRTF)	32
III.1.2. Point de charge nulle (PCN)	33
III.2. Etude UV-Visible des colorants	34
III.2.1. Etude de l'influence du pH initial en colorant	34
III.2.2. Les courbes d'étalonnage	36
III.3. Etudes des paramètres d'adsorption	37
III.3.1. Effet de masse de l'adsorbant	37
III.3.2. Effet de la granulométrie	38
III.3.3. Effet du pH du milieu	39
III.3.4. Effet du temps de contact et modèles cinétiques	41
III.3.4.1. Effet du temps de contact	41
III.3.4.2. Les modèles cinétiques	42
III.3.5. Effet de la concentration de colorant et isothermes d'adsorption	45
III.3.5.1. Effet de la concentration initiale de colorant	45
III.3.5.2. Les isothermes de l'adsorption	47
III.3.6. Effet de la température et paramètres thermodynamiques	51
III.3.6. 1. Effet de la température	51
III.3.6.2. Les paramètres thermodynamiques	52

III.4. Régénération du la bio-adsorbant	54
III.5. Mécanisme d'adsorption	55
Conclusion générale	57
Références bibliographiques	59
Résumé	65

Liste des abréviations et symboles

A : l'absorbance.

BB : bleu de bemacid.

C₀ (mg/L) : concentration initiale en colorant.

C_e (mg/L) : la concentration à l'équilibre du soluté.

C (mg/g) : constante indique l'épaisseur de la couche limite.

E (%) : efficacité d'adsorption.

k₁, k₂, k (g/mg.min) : les constantes de vitesse.

K_L (L/mg) : constante de de Langmuir.

K_f (L/mg) : constante de l'isotherme de Freundlich.

K_d (L/g) : coefficient de partage.

m (mg) : la masse de la bio-adsorbant.

n : l'intensité de l'adsorption.

pH : potentiel d'hydrogène.

pH_{PCN} : pH de point de charge nul.

Q (mg/g) : capacité d'adsorption.

q_e (mg/g) : la quantité de substrat adsorbée à saturation.

q_t (mg/g) : la quantité de substrat adsorbée au temps t.

q_{max} (mg/g) : la capacité maximale d'adsorption.

R_L : facteur de séparation.

R : constante des gaz parfaits.

R² : coefficient de corrélation.

SB : sciure de bois.

t (min) : temps.

T (K) : température.

tr/min : tour par minute.

VB : vert brillant.

V (ml) : volume de la solution du colorant.

ε (L.mol⁻¹.cm⁻¹) : coefficient d'extinction molaire.

λ_{max} (nm) : longueur d'onde maximale.

ΔH (KJ/mol) : l'enthalpie.

ΔS (J/mol. K) : l'entropie.

ΔG (J/mol) : l'enthalpie libre.

Liste des figures

Chapitre I : Recherche bibliographique

Figure.I.1. Exemple de groupe chromophore et Auxochrome de colorant de type azoïque	3
Figure I. 2. Structure d'un colorant azoïque	4
Figure I. 3. Structure d'un colorant cyanines	4
Figure I.4. Structure d'un colorants triphénylméthane	4
Figure I. 5. Structure d'un colorant indigoïde	5
Figure I.6. Structure d'un colorant nitriso	5
Figure I. 7. Structure d'un colorant nitro	5
Figure I. 8. Structure d'un colorant anthraquinonique	6
Figure I .9. Structure chimique de colorant vert brillant.....	7
Figure I.10. Structure chimique de bleu de bemacid	8
Figure I.11. Sources et voies de contamination de l'eau.....	9
Figure I.12. Diverses méthodes de traitement utilisées pour la purification des effluents ...	10
Figure I.13. Adsorption chimique et physique.....	13
Figure I.14. Illustration de l'engagement de l'adsorbat sur l'adsorbant dans le processus d'adsorption.....	14
Figure I.15. Les types d'isothermes d'adsorption	17
Figure.I.16. La structure chimique de cellulose.....	19
Figure.I.17. La structure chimique d'Hémicellulose.....	19
Figure.I.18. La structure chimique de la lignine.....	20
Figure.I.19. Les sources de biomasse et les produits précieux issus de la biomasse.....	20

Chapitre II : Materials et Méthodes

Figure II.1. Schéma représente le protocole expérimental de la préparation de bio-adsorbant	23
Figure II.2. Sciure de bois (SB) (a) avant broyage et (b) après broyage	24
Figure II.3. Schéma du principe de FTIR	24
Figure II.4. Spectrophotomètre FTIR « 4200-JASCO »	25
Figure II.5. pH mètre Adwa (AD 1030)	25
Figure II.6. Spectrophotomètre d'absorption UV-Visible « SPECORD 210 plus »	26
Figure II.7. Principe de Spectroscopie UV-Visible	27
Figure II.8. Schéma représentative du procédé d'adsorption	28

Figure II.9. Image représente SB-VB(a), SB-BB (b) et SB régénéré (c)	31
--	----

Chapitre III : Résultats et Discussions

Figure III.1. Spectre FTIR de sciure de bois brute	33
Figure III.2. Point de charge nulle de sciure de bois	33
Figure III.3. Spectre d'absorption du colorant VB et BB	34
Figure III.4. La variation de l'absorbance en fonction du pH des deux colorants VB et BB	35
Figure III.5. Structure de colorant VB et effet du pH sur sa stabilité de résonance	36
Figure III.6. Les courbes d'étalonnage des deux colorants	36
Figure III.7. Effet de masse de l'adsorbant sur la capacité d'adsorption Q(mg/g) (a) et l'efficacité d'adsorption E (%) (b)	37
Figure III.8. Effet de la taille des particules sur la capacité d'adsorption Q(mg/g) (a) et l'efficacité d'adsorption E (%) (b)	39
Figure III.9. Effet du pH du milieu sur la capacité d'adsorption Q(mg/g) (a) et l'efficacité d'adsorption E (%) (b)	40
Figure III.10. Effet du temps de contact sur la capacité d'adsorption Q(mg/g) (a) et l'efficacité d'adsorption E (%) (b)	41
Figure III.11. Modèle pseudo premier ordre de deux colorant VB et BB	43
Figure III.12. Modèle pseudo second ordre de VB et BB	43
Figure III.13. Modèle de la diffusion intra- particulaire des deux colorants VB et BB	44
Figure III.14. Effet de la concentration initiale de deux colorants VB et BB sur la capacité d'adsorption Q(mg/g) (a) et l'efficacité E (%) (b)	46
Figure III.15. La variation de q_e en fonction de C_e pour les deux colorant VB et BB	48
Figure III.15. L'isotherme de Langmuir de deux colorants VB et BB	49
Figure III.16. L'isotherme de Freundlich de deux colorants VB et BB	49
Figure III.17. Effet de la température sur la capacité d'adsorption Q(mg/g) (a) et l'efficacité d'adsorption E (%) (b) des deux colorants VB et BB	51
Figure III.18. La variation de $\ln K_d$ en fonction de $1/T$ de deux colorants VB et BB	53
Figure III.19. La variation de l'efficacité d'adsorption (a) et l'efficacité de Cycle (b) en fonction de nombre de cycle des deux colorants VB et BB sur SB.....	54
Figure III.20. Spectre FTIR de l'adsorbant après rétention de VB et de BB.....	55

Liste des Tableaux

Chapitre I : Recherche bibliographique

Tableau. I. 1. Groupes auxochrome et chromophores des colorants	3
Tableau I.2. Sources industrielles d'eaux usées de teinture	8
Tableau I.3. Différences entre l'adsorption physique et chimique	12
Tableau.I.4. Sources communes et composition de la biomasse lignocellulosique	18

Chapitre III : Résultats et Discussions

Tableau III.1. Différentes bandes caractéristiques du spectre FTIR de la sciure de bois brute	32
Tableau III.2. Résultats de corrélation	37
Tableau III.3. Les paramètres cinétiques des deux colorants VB et BB	44
Tableau III.4. Comparaison des performances de bio-adsorbant sciure de bois pour l'élimination des colorants VB et BB avec certains adsorbants	47
Tableau III.5. Les paramètres des isothermes d'adsorption	50
Tableau III.6. Paramètres thermodynamiques des deux colorants VB et BB	53

Introduction générale

Introduction générale

L'eau est un élément crucial pour tous les organismes vivants et surtout pour les êtres humains dont elle représente environ 60 % du poids corporel. De plus, l'eau occupe près de 71 % de la surface de la terre. La pollution de l'eau peut être définie par l'introduction de certains contaminants qui provoquent des modifications des propriétés physiques et ses qualités esthétiques ainsi que l'odeur de l'eau. Les métaux lourds, les colorants, les médicaments et les composés organiques sont parmi les contaminants les plus dangereux pour l'environnement et en particulier pour la santé humaine [1].

Les colorants sont l'un des contaminants qui sont largement utilisés dans plusieurs secteurs industriels tels que le textile, les cosmétiques, les plastiques et autres [2]. Toutefois, d'un point de vue environnemental, ils restent des substances non biodégradables toxiques et dangereux pour les espèces aquatiques (poissons, algues, bactéries) [3].

Pour cette raison, de nombreuses méthodes efficaces ont été développées par les chercheurs afin d'éliminer les colorants. Parmi les méthodes utilisées : la séparation membranaire, échange d'ion, coagulation- floculation, l'adsorption ainsi des méthodes biologiques qui sont largement utilisés pour minimiser l'impact des polluants sur l'environnement et beaucoup plus les milieux aquatiques. Dans notre mémoire, on s'intéresse à l'adsorption qui est l'un des méthodes le plus adaptée pour les traitements des eaux usées et pour l'élimination des colorants. Dans ce mémoire, nous nous intéressons à **l'adsorption**, qui constitue l'une des méthodes les plus appropriées pour le traitement des eaux usées, notamment pour l'élimination des colorants.

L'avantage de l'adsorption est dans la simplicité, la flexibilité d'utilisation et d'efficacité élevée du traitement des eaux polluées avec des colorants. L'intérêt croissant pour l'adsorption est également lié à la disponibilité d'un grand nombre d'adsorbants, qu'ils soient naturels ou synthétiques, tels que le charbon actif, les argiles, les zéolithes ou encore certains bio-sorbants issus de déchets [4]. Par ailleurs, la recherche scientifique dans ce domaine repose aujourd'hui principalement sur des critères tels que le coût de l'adsorbant, sa disponibilité et ses propriétés écologiques, afin d'éviter toute pollution secondaire de l'environnement.

Le processus d'adsorption est influencé par plusieurs paramètres tels que : le pH du milieu, la masse d'adsorbant, le temps de contact entre adsorbant et adsorbat, la concentration initiale de

polluant ainsi que la température. L'amélioration de ce procédé repose sur l'optimisation de ces paramètres ainsi que sur la possibilité de réutiliser l'adsorbant plusieurs fois [1].

C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent mémoire intitulé « **Optimisation de l'élimination des colorants en milieux aqueux par un matériau non coûteux** ». Ce travail a le but d'étudier l'adsorption de deux colorants, l'un est cationique (**vert brillant**) et l'autre anionique (**bleu de bemacid**), en milieux aqueux, en utilisant un bio-adsorbant lignocellulosique qui est la biomasse *sciure de bois*.

Afin d'organiser notre travail, le présent mémoire est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre « Recherche bibliographique » qui présente des généralités sur les colorants (définition, classification, leurs origines dans les rejets industriels, les procédés de traitement...). Le chapitre contient également des notions de la chimie de l'adsorption tels que les types d'adsorption, leurs mécanismes, classification des adsorbants ainsi que la cinétique et la modélisation des isothermes d'adsorption. La troisième et la dernière partie, est consacrée à la biomasse lignocellulosique (définition, compositions chimiques et propriétés physico-chimiques).

Le second chapitre « Matériels et méthodes » : Dans ce chapitre nous représentons les méthodes de caractérisation de l'adsorbant (point de charge nulle et l'IRTF) ainsi que les adsorbant utilisés (vert brillant et bleu de bemacid) en citons leurs propriétés. Le chapitre décrit également la méthode en batch utilisée et regroupe tous les protocoles expérimentaux réalisés pour évaluer les paramètres affectant l'adsorption.

Le troisième chapitre « Résultats et discussions » : Ce chapitre illustre l'ensemble des résultats sous forme des courbes et des spectres avec les interprétations et les discussions nécessaires.

Finalement, nous terminons ce travail par une conclusion générale qui résume les résultats essentiels en ouvrant plusieurs perspectives dans le cadre de traitement des eaux.

Chapitre I : Recherche bibliographique

I.1. Les colorants et les effluents colorés

I.1.1. Définition et structure chimique des colorants

Les colorants sont des composés de nature organique constitués en un groupe chromophore (responsable de la couleur) ; un auxochrome et une matrice [5], comme le montrent le **tableau I.1** et **figure I.1**. Les colorants sont utilisés dans beaucoup de domaines tel que les papeteries, les cosmétiques, transformation des aliments, le textile et les produits pharmaceutiques, même dans les diagnostics médicaux [6]. De plus, on peut utiliser même pour les teintures des tapis, papier, plastique et aussi dans l'alimentation [7].

Tableau I. 1. Groupes auxochrome et chromophores des colorants [5].

Groupes auxochrome		Groupe chromophore	
Alkoxy	-OR	Azo	-N=N-
Amino	-NH ₂	Alcènes	-C=C-
Aldéhyde	-CHO	Carbonyle	>C=O
Groupe carboxyle	-COOH	Ethylène	>C=C<
Diméthylamino	-N(CH ₃) ₂	Cétone-imine	>C=NH
Halogènes	Cl, Br, I	Sulfure	>C=S
Hydroxyle	-OH	Nitro	NO ₃ ou =NO-OH
Méthylamino	-NHCH ₃	Nitreux	NO ou N-OH
Méthylmercaptan	-SCH ₃	Polyméthine	=HC-HC=CH-CH=
Sulfonate	-SO ₃ H		

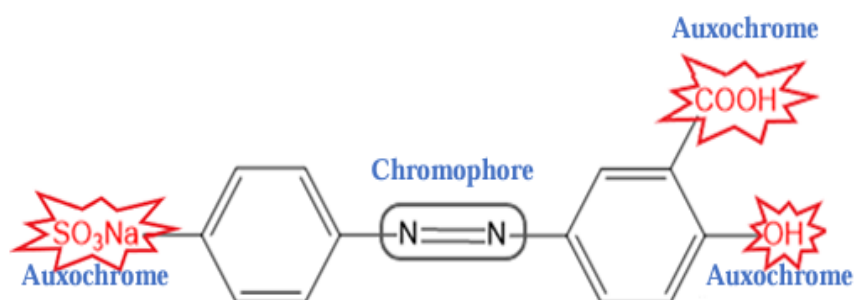


Figure I.1. Exemple de groupe chromophore et Auxochrome de colorant de type azoïque.

Selon la structure chimique et la nature du groupe chromophore, on distingue plusieurs types de colorants, tels que :

a) **Colorants azoïques** : Les colorants azoïques constituent la plus grande famille de colorants textiles. Ils sont caractérisés par la présence du groupe fonctionnel $-N=N-$ et contiennent souvent des cycles hétérocycliques permettant d'obtenir des teintes profondes. Entre 60 et 70 % des colorants azoïques sont toxiques et cancérogènes. Par ailleurs, leur biodégradation peut produire des sous-produits aminés potentiellement dangereux et cancérogènes [8].

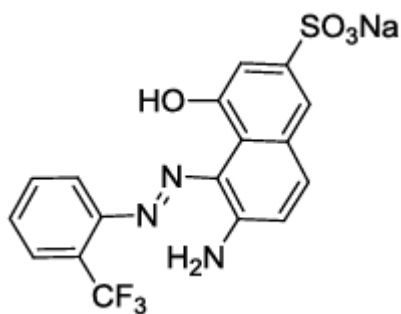


Figure I. 2. Structure d'un colorant azoïque [9].

b) **Colorants cyanines** : ce sont des colorants appartenir à la famille de polyméthines, contenant des chaînes conjuguée (hybridation sp^2) et des hétérocycles insaturés [10].

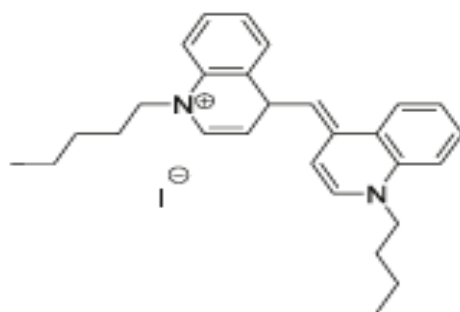


Figure I. 3. Structure d'un colorant cyanines [10].

c) **Colorants triphénylméthane** : Cette classe de colorants peut changer sa couleur selon le pH et présente une fluorescence comme le bleu isosulfan [11].

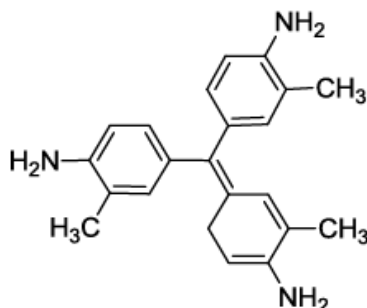


Figure I.4. Structure d'un colorants triphénylméthane [9].

d) **Les colorants indigoïdes** : Ce sont des colorants insolubles, mais l'ajout de groupes sulfonates à leur structure peut les rendre solubles. Le bleu d'indigo, par exemple, est sensible au pH et au potentiel redox [11].

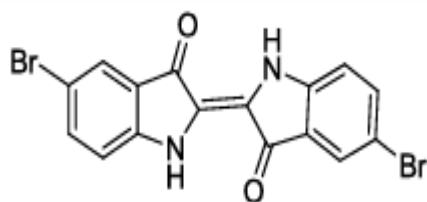


Figure I. 5. Structure d'un colorant indigoïde [9].

e) **Colorants nitriso** : Les composés nitriso forment à partir d'une réaction entre phénols et l'acide nitreux avec le groupe N=O placé sur la position ortho ou para par rapport au groupe fonctionnel OH. Exemple le naphthol vert B, CI 10020 [12].

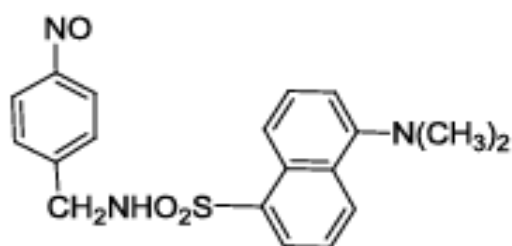


Figure I.6. Structure d'un colorant nitriso [9].

f) **Colorants nitro** : Ce sont des colorants caractérisés par le groupe -NO₂ ; les liaisons N=O et N-O sont conjuguées avec les liaisons C-C et C=C de l'anneau aromatique par résonance exemple : le jaune de naphthol S, CI 10316 [12].

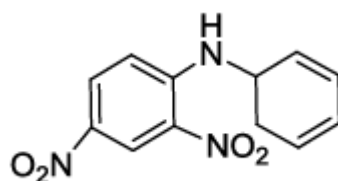


Figure I. 7. Structure d'un colorant nitro [9].

i) **Colorants anthraquinoniques** : Les colorants anthraquinoniques sont élaborés autour de la structure de l'anthraquinone. Il existe la possibilité d'établir des liaisons avec d'autres systèmes aromatiques fusionnés. Le carmin (CI 75470) constitue un exemple de colorant anthraquinonique naturel, tandis que le rouge rapide nucléaire (CI 60760) est un exemple de colorant mordant synthétique [12].

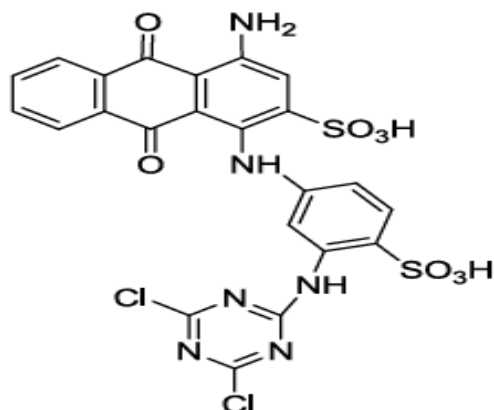


Figure I. 8. Structure d'un colorant anthraquinonique [9].

I.1.2. Type des colorants

a) **Les colorants réactifs** : Les colorants réactifs sont les plus utilisés dans l'industrie. Ils possèdent un large spectre de couleurs et un niveau de solidité important. Ils ont aussi la capacité de créer une liaison covalente avec les groupes hydroxyles au sein des fibres [13].

b) **Les colorants dispersés** : possèdent une plus faible solidité que les colorants réactifs, la majorité comporte des composés azoïques, ils ont des caractéristiques fluorescentes et plus utilisées dans l'industrie textile ex : CI disperse yellow 82 et CI. Disperse rouges 227 [13].

c) **Les colorants acides** : Ce sont des colorants actifs dans un intervalle de pH de 2 à 6 ; on peut également les appeler **colorants anioniques**. Les chercheurs travaillent sur l'amélioration des propriétés de ce type de colorants, tout en réduisant leur impact environnemental [13].

d) **Les colorants directs** : Le mot direct signifie la simplicité d'utilisation avec une structure proche des colorants acides, on peut les nommer aussi colorants substantiels. Ces colorants sont solubles dans l'eau et utilisés pour coloriser des matériaux polaires comme le coton [14].

e) **Les colorants basiques** : Les colorants basiques sont, à l'état libre, généralement incolores, mais sous forme de sels, ils sont colorés. Ils sont peu solubles dans l'eau et présentent une forte affinité pour les fibres acryliques [13]. On peut également les appeler colorants cationiques, car ils possèdent des groupements amine (NH_2 , $\text{NHR}\dots$) [14].

f) **Les colorants en cuve** : Ce type de colorants sont pulvérisés uniquement sur le tissu ; la teinture se fait en continu dans un grand récipient appelé cuve, le mieux adaptée pour le coton. Les colorants en cuve sont insolubles dans l'eau pour cette raison il faut transformer en une forme soluble dans l'eau (composé leuco) [14].

j) **Les colorants mordants** : connue aussi par colorant indirects ou adjectifs ; ils sont aussi insolubles dans l'eau, ce qui demande l'ajout d'une troisième substance pour fixer le colorant sur les fibres [14].

I.1.3. Les colorants étudiés et leurs propriétés

II.1.3.1. Le vert brillant (VB) : le vert brillant est un colorant synthétique, cationique et soluble dans l'eau, classée parmi les triphénylmethanes. Ce colorant est antifongiques, antiparasitaires et antimicrobiennes, ce qui le rend largement utilisé notamment dans le domaine l'aquaculture. Cependant, il reste un colorant toxique pour l'environnement [15]. Le vert brillant **VB** peut provoquer des problèmes pulmonaires et il cause de graves blessures s'il entre en contact direct avec l'œil. De plus, Il est également utilisé pour la teinture du papier, du cuir, de la laine et de la soie. On applique aussi pour l'identification des métaux [16]. Le vert brillant (VB), dont la structure est présentée dans la **figure I.9** et utilisé dans le présent mémoire, est un colorant commercial fourni par Sigma-Aldrich. Parmi ses caractéristiques, on peut citer [16] :

- Le nom IUPAC : (4-((4-(diéthylamino)-alpha-phénylbenzylidène)-2,5-cyclohexadiène-1-ylidène) sulfate de diéthylammonium).
- Formule chimique : $C_{27}H_{34}N_2O_4S$.
- Masse molaire : 482,63 g/mol.
- Charge: cationique.

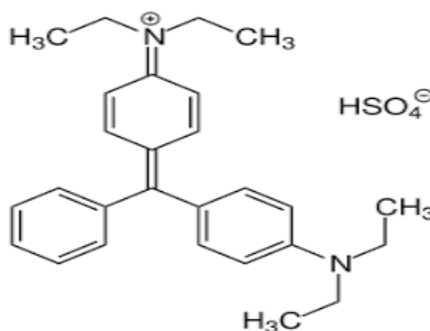


Figure I.9. Structure chimique de colorant vert brillant.

II.1.3.2. Le bleu de bemacid (BB): le bleu de bemacid **BB** est un colorant textile de type acide, de famille anthraquinone. Il est classé parmi les contaminants non biodégradables et se caractérise par une faible capacité d'adsorption sur les matériaux biologiques [17]. Le bleu de bemacid est notamment utilisé dans la teinture textile et pour les fibres de polyamide [18]. Les

BB (**figure I.10**) utilisé dans ce mémoire est fournis par Soitex-Tlemcen. Parmi ses propriétés [17] :

- Le non IUPAC : (sodium 1 -amino-4-([3-[(benzoylamino) méthyl] -2,4,6-triméthyl phényl} amino) -9,10-dioxo-9,10-dihydroanthracène-2-sulfonate.
- Formule chimique : $C_{39}H_{41}O_7SN_4Na$.
- Masse molaire : 732,82 g/mol.
- Charge: anionique.

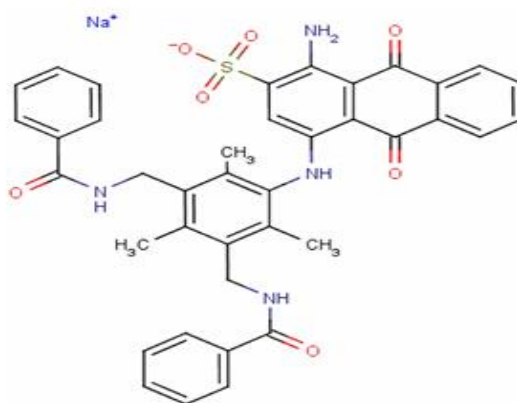


Figure I.10. structure chimique de bleu de bemacid [17].

I.1.4. Origine des colorants dans les rejets industriels

On estime que chaque année, près de 700000 tonnes de couleur sont fabriquées à partir d'environ 100000 colorants commerciaux ; et à l'échelle mondiale, environ 3000 à 4000 kilotonnes d'eaux usées générées par les industries productrices des colorant. Les principaux secteurs contribuant aux rejets colorés sont classifiés dans le **tableau I.2** [19]. Parmi les colorants les plus fréquemment utilisés on trouve les colorants azoïques, les colorants acides et basiques, les colorants indigos et les colorants d'origine végétale et animale [20].

Tableau I.2. Sources industrielles d'eaux usées de teinture [19].

Industrie	Contribution en pourcentage
Textile	54 %
Teinture	21%
Papier et pâte à papier	10 %
Tannerie et peinture	8 %
Producteurs de colorants	7 %

I.1.5. Risques et toxicité des colorants

a) **Effets des effluents textiles sur les ressources en eau** : Comme le montre la **figure I.11** il existe plusieurs activités responsables à la contamination de l'eau par plusieurs polluant organiques. Pour les colorants, les rejets issus des unités de teinture textile sont une cause majeure de la pollution aquatique. Par exemple, la production d'un seul T-shirt peut consommer 16 à 20 litres d'eau ; et chaque année libérer globalement entre 40000 et 50000 tonnes de colorants dans les systèmes d'eau [21].

Les effluents liquides générés des exploitations textiles sont constitués d'un mélange complexe de substances organiques et inorganiques ; sont soit liquides, solides ou gazeux dangereux. Lorsqu'ils sont rejetés dans l'eau, ils peuvent provoquer des risques sanitaires ; les effluents textiles exercent de multiples effets néfastes sur les écosystèmes aquatiques en raison de leur composition chimique complexe, ainsi qu'une forte teneur en demande chimique en oxygène (DCO) et demande biochimique en oxygène (DBO) causée des conditions hypoxiques qui affectent négativement à la vie aquatique [21].

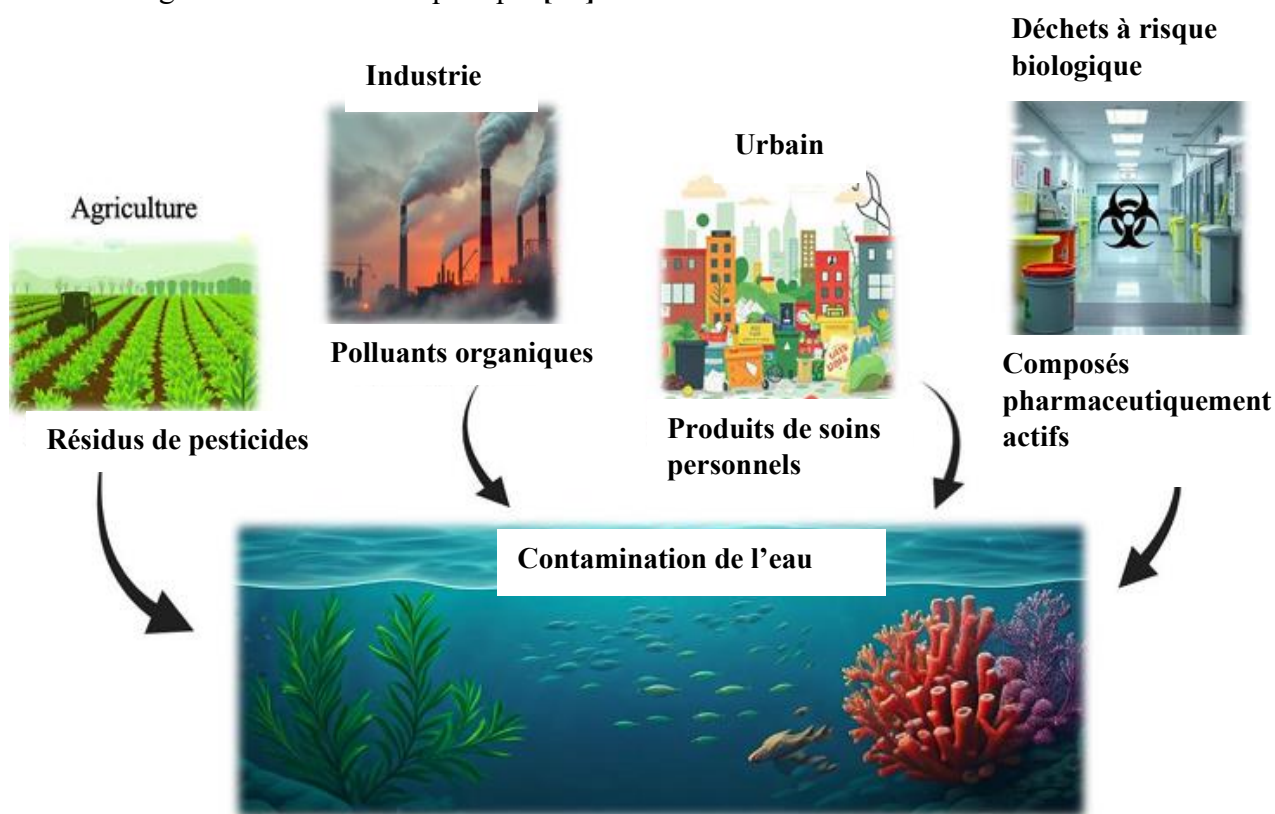


Figure I .11. Sources et voies de contamination de l'eau [22].

b) **Effets des effluents textiles sur le sol** : Le sol est un mélange de matière organique et minéraux ; est à la base de productivité agricole. Cet équilibre perturber lorsqu'il libéré ces

effluents car les polluants obstruent les pores du sol, compactent sa structure et réduisent la capacité de pénétration des racines. Des charges élevées en polluants diminuent la teneur en chlorophylle des plantes qui perturbent la photosynthèse et aussi réduisant l'accumulation de biomasse sèche [21].

c) **Effets sur la santé humaine** : Les humaines sont très sensibles aux effets toxiques des colorants de deux manières : soit en consommant directement des poissons contaminés, soit en consommant des cultures cultivées dans un sol dans lequel les colorants toxiques ou leurs formes dégradées se sont accumulés ; les troubles provoqués par les colorants textiles peuvent causer de la dermatite aux troubles du système nerveux central et aussi l'inactivation des activités enzymatiques. De plus, une exposition fréquente aux colorants textiles peut entraîner un effet génotoxique [5].

I.1.6. Procédés de traitement des effluents colorés

Les différents procédés de traitement des effluents colorés sont regroupés dans la **figure I.12**.

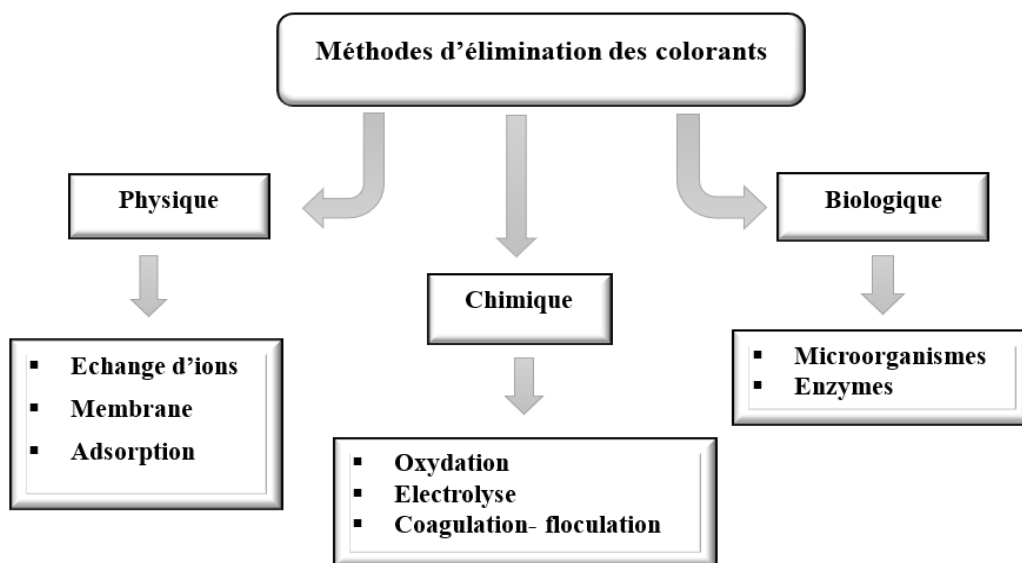


Figure I.12. Diverses méthodes de traitement utilisées pour la purification des effluents [23].

a) **Procédés chimique / physique** : ce procédé contient plusieurs méthodes tel que :

La coagulation / floculation qui est très utilisée pour l'élimination des colorants [23]. La première étape consiste en la déstabilisation des suspensions par neutralisation des charges (coagulation). Ensuite, les particules sont regroupées afin de faciliter leur séparation (floculation). La dernière étape correspond à la sédimentation [24].

L'Echange d'ions entre une solution externe et des groupes fonctionnels à l'intérieur d'une matrice solide. Cependant, présente des limites pour des eaux usées très concentrée [23].

Procédés de séparation par membrane tel que l'osmose inverse (OI), la nanofiltration (NF), et la microfiltration (MF).

L'adsorption cette méthode sera détaillée dans la partie I.2. Le principal avantage du ce processus est qu'il ne génère pas des polluants secondaires toxique contrairement à d'autres méthodes [23].

b) Méthodes biologiques

Présente la capacité à dégrader diverses classes de colorants, effectué par l'utilisation de plusieurs types de bactérie et des micro-organismes. Grace à la croissance rapide des bactéries et la simplicité de manipulation rendent le processus plus favorable pour l'élimination des colorants des eaux usées [23].

I.2. Chimie de l'adsorption

I.2.1. Définition et types d'adsorption

L'adsorption est un phénomène de surface, qui collecte de particules, atomes ou ions étendus appelée **adsorbat** à la surface d'une autre substance solide appelée **adsorbant** [25]. Dans la plupart des cas ; c'est un processus réversible à cause de la présence des liaisons de van der Waals faibles entre adsorbant et adsorbat.

L'adsorption est la méthode la plus utilisée pour l'élimination des colorants grâce à son faible coût et sa flexibilité de conception. De plus ce processus ne libère aucune substance indésirable [26]. On peut classer l'adsorption en deux principaux types selon la figure I.13 :

a) **Adsorption physique** : dans l'adsorption physique ou **physisorption**, l'interaction adsorbant- adsorbat se fait par des liaisons faibles de type van der Waals sans changement des structures chimiques [27]. De plus, c'est une adsorption en multicouches [28].

b) **Adsorption chimique** : L'adsorption chimique aussi appelé **chimisorption**, la liaison entre l'adsorbat et l'adsorbant est de nature ionique ou covalente (liaison chimique), se fait par émission importante de chaleur et nécessite une énergie d'activation. De plus, cette adsorption est rapide mais faible et est une réaction irréversible grâce à la forte liaison chimique. L'adsorption chimique est réalisée en une seule couche d'adsorption [28]. Les deux types d'adsorption sont comparés dans le tableau I.3.

Tableau I.3. Différences entre l'adsorption physique et chimique [27].

Critères	Adsorption physique	Adsorption chimique
Nature de l'adsorption	Dépend de la nature de l'adsorbant	Dépend de la nature de l'adsorbant
Réversibilité	Processus réversible	Principalement irréversible
Enthalpie	Faible (20-40 KJ/ mol)	Importante (40 – 300 KJ/ mol)
Energie d'activation	Faible	Élevée
Couche d'adsorption	Multicouches	Monocouche
Liaison	Van der Waals	Ionique ou covalente

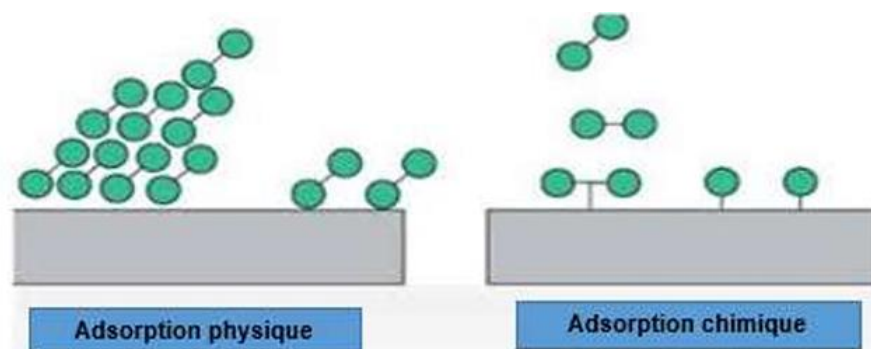


Figure I.13. Adsorption chimique et physique.

I.2.2. Définition et classe des adsorbants

Les adsorbants sont des matériaux solides qui sont disponibles avec divers propriétés physiques et chimiques appropriés pour éliminer les contaminants d'un milieu aqueux ; pouvant classées en *adsorbants conventionnels* qui incluent le charbon actif et le gel de silice et *non conventionnels* incluent les adsorbants naturels et les bio adsorbants [29].

a) **Adsorbants conventionnels** : sont couramment favorisés pour l'élimination des polluants mais leur utilisation est limitée à cause du son cout élevée [30].

Charbon actif : le charbon actif est l'un des adsorbants les plus importantes et les plus utilisables pour l'élimination de divers contaminants d'un milieu aqueux. Elle possède une surface interne remarquablement développée ; une couche de graphite poreux et une matrice carbonée avec certains groupes acides et basiques [29].

Gel de silice : le gel de silice est plus efficace pour l'élimination des ions métalliques et des déchets pharmaceutiques. La forme mésoporeux de ce gel est la plus utilisée. La principale limitation du gel de silice est ses caractéristiques hydrophiles à sa surface [29].

b) **Adsorbants non conventionnels** Les adsorbants non conventionnels par exemples les bio-adsorbants (des déchets agroalimentaires) et les matériaux naturels (minéraux argileux). Ces adsorbants sont des matériaux peu couteux et efficaces [30].

Minéraux argileux : la majorité des minéraux argileux sont très efficace pour l'élimination des polluants de différent types d'eaux. L'alumine et les silices sont les principales constituant de ces minéraux, ils sont très poreux à cause de la présence d'ions échangeables à sa surface.

Les zéolites : ce sont des adsorbants à faible cout utilisée beaucoup plus pour l'élimination des colorants et les métaux lourds des eaux usées. La structure poreuse des zéolites et son utilisation à faible concentration le rendre plus efficace par rapport aux autres adsorbants [29].

Les déchets industriels : un grand nombre de déchets solides sont générés par différentes industries, ils sont plus utilisés par des grandes quantités dans l'adsorption de divers contaminants nocifs, à cause de leur grande disponibilité, leur forte capacité d'adsorption et leur faible coût. La cendre volante est un exemple de ces déchets le plus efficace et le peu coûteux au tant qu'adsorbant en raison de sa forte teneur en alumine et en silice [29].

Les déchets agroalimentaires : se sont parmi aussi les matériaux le plus utilisée pour l'élimination des polluants car sont principalement composés du cellulose, d'hémicellulose et de lignine. La forte teneur en carbone et de leur grande disponibilité et de leur faible coût sont les principaux avantages de ces matériaux ; exemple : le bambou, la balle de blé [29].

I.2.3. Mécanisme d'adsorption

L'adsorption est un processus qui implique généralement l'adhésion des adsorbats d'un liquide ou d'un gaz vers une surface solide connue appelée adsorbant, qui se fait par quatre étapes continues ; selon la **figure I.14**, en premier lieu, le déplacement des molécules de l'adsorbat en solution en vrac vers le film liquide entourant l'adsorbant, c'est *la diffusion en vrac (ou en volume)*. Puis les adsorbats migrent du film liquide vers la surface extérieure de l'adsorbant (*diffusion externe*), qui est entraînée par des gradients de concentration. Ensuite, le transfert des molécules de l'adsorbats vers les sites actifs de l'adsorbant (*diffusion intra particulaire*), une fois, l'adsorbat se fixer à la surface de l'adsorbant le processus est finie [31].

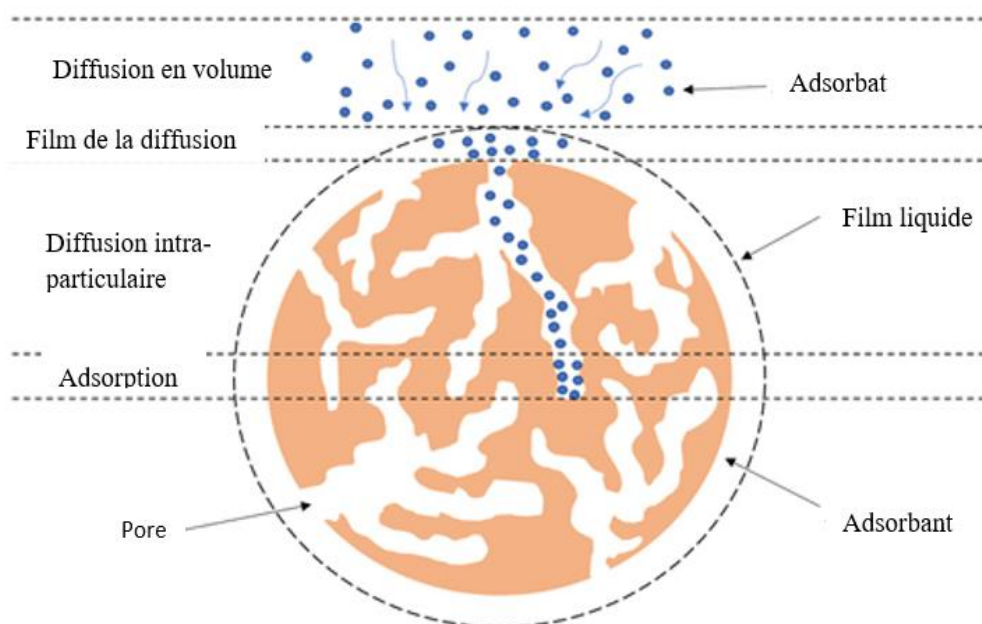


Figure I.14. Illustration de l'engagement de l'adsorbat sur l'adsorbant dans le processus d'adsorption [31].

I.2.4. Les paramètres influençant l'adsorption

a) **La concentration initiale du soluté** : la concentration initiale de soluté agit comme force motrice pour le processus d'adsorption, stimulant la diffusion et les processus de transfert de masse de la solution vers la surface libre de l'adsorbant. A une concentration initiale basse de la solution, le nombre de sites d'adsorption disponibles est élevé ; par cela les contaminants se lient facilement à la surface de l'adsorbant. En revanche, à des hautes concentrations initiales de la solution, le nombre global de sites d'adsorption est limitée ; ce qui conduit à une diminution du taux d'élimination des contaminants [32].

b) **Le pH** : le pH influence la capacité de l'adsorbant et l'efficacité du processus. Il, affecte la chimie des polluants, l'activité des groupes fonctionnels de l'adsorbant, la concurrence avec les ions coexistant dans la solution et également sur la charge de surface de l'adsorbant.

c) **La dose d'adsorbant** : Plus le dosage d'adsorbant augmente plus les sites actives disponible augment, ce qui entrainer une augmentation du pourcentage d'élimination des contaminants.

d) **Effet de la taille des particules de l'adsorbant** : ce paramètre peut être important dans la plupart des recherches sur l'adsorption. Pour des particules plus fines la surface spécifique de l'adsorbant augmente ce qui favorise une élimination efficace des polluants d'un milieu aqueux [32].

e) **Effet de la température** : la température est un paramètre physico-chimique qui peut changer la nature de la réaction, passant d'endothermique à exothermique ou inversement. Un processus exothermique et avec l'augmentation de la température l'efficacité d'élimination des contaminants diminue ; par contre si le processus est endothermique l'augmentation de la température augmente l'efficacité d'adsorption [32].

I.2.5. Cinétique d'adsorption

a) **Modèle pseudo-premier ordre** : ce modèle est décrit selon l'équation suivantes [27]:

$$\ln (q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (I.1)$$

k_1 : la constante de vitesse d'adsorption.

q_t : la quantité de substrat adsorbée au temps t (mg/g).

q_e : la quantité de substrat adsorbée à saturation (mg/g).

b) **Modèle pseudo-seconde ordre** : ce modèle est décrit par l'équation suivantes [27] :

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{(k_2 \cdot q_e^2)} + \frac{t}{q_e} \quad (I.2)$$

K_2 : la constante de vitesse d'adsorption.

q_t : la quantité de substrat adsorbée au temps t (mg/g).

q_e : la quantité de substrat adsorbée à saturation (mg/g).

c) **Modèle de la diffusion intra-particulaire**: ce modèle est développé par Weber et Morris ; indique que si la ligne de modélisation traverse l'origine (0.0), l'adsorption est dominée par la diffusion intra- particulaire et elle est supervisée par plusieurs étapes de transfert de masse. Le modèle suggère que l'étape limitante est la diffusion de l'adsorbat dans les pores de l'adsorbant [33]. Et décrit par l'équation générale suivante :

$$q_t = K \cdot t^{1/2} + C \quad (I.3)$$

K_{W-M} : constante de vitesse de diffusion dans les pores (mg/(g·min)).

C : constante indique l'épaisseur de la couche limite (mg/g).

I.2.6. Isothermes et modélisation d'adsorption

Les isothermes d'adsorption décrivent l'évolution de l'interaction d'un substrat de la solution en vrac jusqu'à la surface de l'adsorbant. Ils relient la quantité de substrat adsorbée par unité de masse d'adsorbant avec la concentration ou la pression [27]. D'après l'IUPAC, les isothermes d'adsorption sont classées en six types (**figure I.15**) :

a) **Modèle de type I** : ce type est réversible et concave sur l'axe de la pression relative. Des exemples courants de ce concept incluent les zéolites et le charbon actif.

b) **Modèle de type II** : ce modèle est aussi réversible et régulier ; qui peut être obtenu à partir d'un adsorbant non poreux. Exemple, l'adsorption d'azote sur le gel de silice [34].

c) **Modèle de type III** : c'est un modèle qui est convexe sur l'axe de la pression. Même il est réversible. L'exemple courant est l'adsorption de vapeur d'eau sur le carbone non poreux.

d) **Modèle de type IV** : la condensation capillaire dans les mésopores est le responsable des boucles d'hystérésis, ce qui limite également l'absorption dans toute la plage de haute pression. Par exemple : l'adsorption d'eau ou d'air humide sur un certain type de charbon actif [34].

e) **Modèle de type V** : il est obtenu dans le cas où il y a une faible interaction entre l'adsorbant et l'adsorbat. Ce type peut être présente dans certain adsorbant poreux.

f) **Modèle de type VI** : dans ce type l'adsorption est progressive en couches sur une surface homogène non poreuse. Exemple : l'adsorption de gaz inertes à la surface du graphite [34].

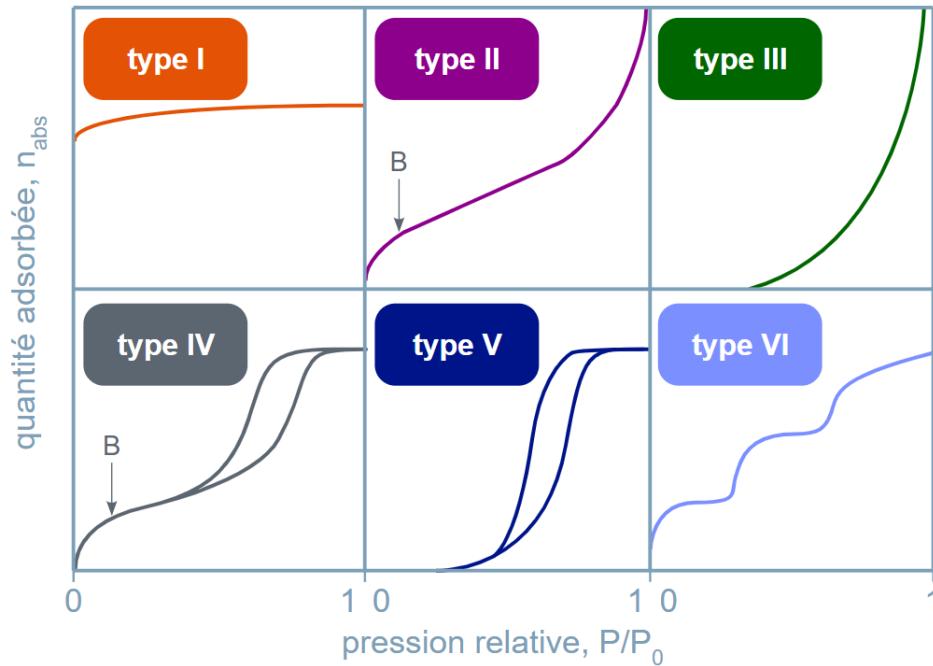


Figure I.15. Les types d'isothermes d'adsorption.

Les points expérimentaux dans les isothermes d'adsorption, peut être modéliser selon :

Le modèle de Langmuir : C'est l'isotherme le plus simple obtenu en 1916, il décrit la couche d'adhésion unique sur une surface homogène. Il est défini par l'équation suivante [27] :

$$\frac{1}{q_e} = \left(\frac{1}{q_m \cdot k_L} \right) \left(\frac{1}{C_e} \right) + \frac{1}{q_m} \quad (\text{I.4})$$

q_e : quantité d'équilibre de soluté adsorbée par unité de masse d'adsorbant (mg/g).

C_e : la concentration à l'équilibre du soluté (mg/L).

K_L : constante de Langmuir liée à l'énergie et l'affinité des sites l'adsorption (L/mg).

Le modèle de Freundlich : l'adsorption dans ce modèle se fait en multi couches sur des surfaces hétérogène selon l'équation [27] :

$$\text{Log } q_e = \text{log } (k_f) + \left(\frac{1}{n} \right) \text{log } C_e \quad (\text{I.5})$$

K_f : la constante de l'isotherme de Freundlich, et n est l'intensité de l'adsorption

I.3. La biomasse lignocellulosique

I.3.1. Définition des bio-adsorbants

Les bio- adsorbants sont des matériaux de source biologique (les déchets agricoles), matériaux végétaux et les biomasses. La haute porosité de ces matériaux offre une grande surface pour l'adsorption, par ailleurs la présence de divers groupes fonctionnels capables d'interagir avec les polluants. Pour cette raison les bio-adsorbants sont une solution pour l'élimination de divers contaminant de l'eau. Par exemple, les dérivés des déchets agricoles peuvent éliminer en moyenne 68 à 100 % des colorants [35].

I.3.2. Définition et composition de la biomasse lignocellulosique

Les biomasses lignocellulosiques sont l'une des sources de carbone les plus abondantes et renouvelables, elles sont composées de trois principales polymères, cellulose, d'hémicellulose et de lignine ; formant une matrice complexe et récalcitrante [36]. Comme le montre le **tableau I.4**, les lignocelluloses ont un pourcentage massique de lignine, hémicellulose et de cellulose varie selon la structure de la biomasse [37,38].

Tableau I.4. Sources communes et composition de la biomasse lignocellulosique [38].

<i>Catégorie</i>	<i>Source</i>	<i>Cellulose (%)</i>	<i>Lignine (%)</i>	<i>Hémicellulose (%)</i>
Résidus agricoles	Pailles de maïs	34,3	26,6	7,53
	Pailles de maïs	34,5	16,5	27,7
	Paille de blé	35,9	19,2	18
	Paille de blé	32	16,2	26,9
	Paille de blé	38	22	36
	Paille de colza	36	24	37
	Coques de riz	36,7	21,6	17,7
	Bagasse de canne à sucre	42,2	27,6	21,6
	Bagasse de canne à sucre	45,3	22,4	22,1
Résidus forestiers	Sciure d'eucalyptus	42,7	22	16,1
	Copeaux de bois	45,58	24,15	27,9
	Écorce	37,8	30,1	18,2
	Écorce	35,2	32,1	14,7
Cultures énergétiques dédiées	Herbe à bascule	39,4	/	/
	Herbe à bascule	38,9	30,4	28,9
	Miscanthus	50,4	12	24,8
	Épicéa (bois tendre)	37,6	32,6	17,6

Les lignocellulosiques biomasses sont composées principalement en trois polymères cellulose, hémicellulose et lignine.

a) Cellulose : la cellulose est une macromolécule linéaire, être classé parmi les polysaccharides, formée par l'enchaînement de milliers de molécules répétitives de ***β -D-glucopyranose (cellobiose)***. La cellobiose est un dimère de glucose, unie par des liaisons glycosidiques covalentes entre les groupes OH et les atomes de carbone C₄ et C₁ des unités de glucose.

Comme le montre la **figure I.16**, la chaîne polysaccharidique de cellulose est constituée de deux extrémité une non-réductrice où se trouve un groupe alcool libre sur l'atome C₄ et une extrémité réductrice qui possède un groupe hémiacétal ou aldéhyde libre sur l'atome C₁ [39].

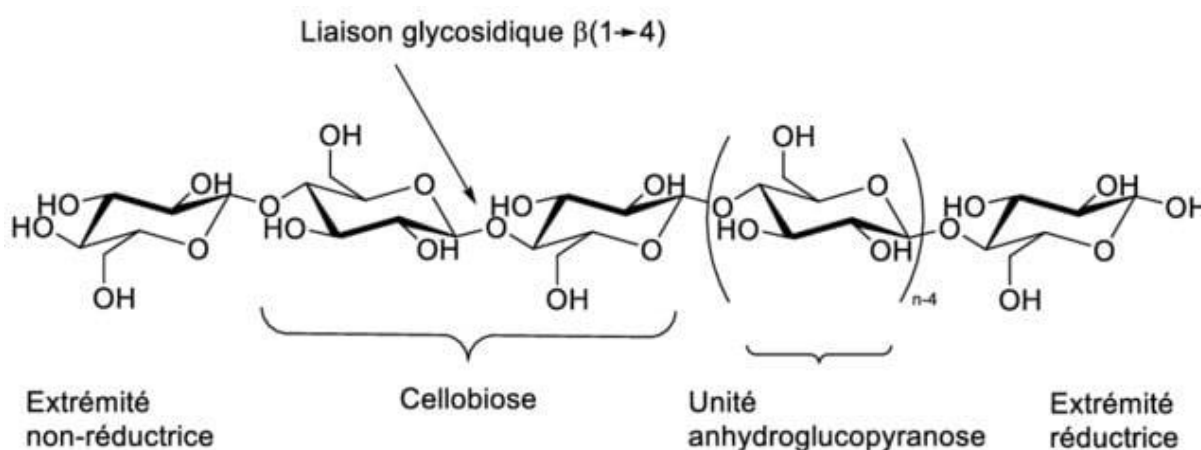


Figure I.16. La structure chimique de cellulose.

b) Hémicellulose : hémicellulose se positionne comme le second élément principal de la biomasse lignocellulosique (LCB). Formant un réseau réticulé de glycanes essentiellement composé de pentosanes, d'acides uroniques, de groupement acétyles et d'hexoses (**figure I.17**). Sa composition chimique varie en fonction de la source d'origine à une degré de polymérisation plus bas (50 à 300) [40].

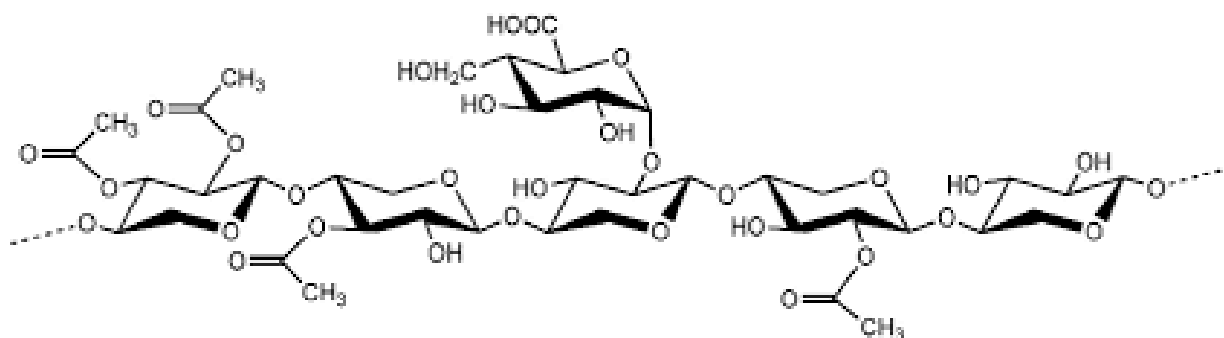


Figure I.17. La structure chimique d'Hémicellulose.

c) **Lignine** : la lignine est le troisième biopolymère le plus abondant, il possède une structure chimique complexe. Résultant de la polymérisation des unités p-hydroxyphénol, syringyle et guaiacyle du phénylpropane. L'existence de plusieurs groupements fonctionnels (OH, OCH₃, COOH et C-O) ; génèrent une forte polarité dans la molécule de lignine et une grande diversité structurale, qui mène à un processus complexe de décomposition pyrolytique [41]. La structure chimique de la lignine et ses trois motifs est donnée par la **figure I.18**.

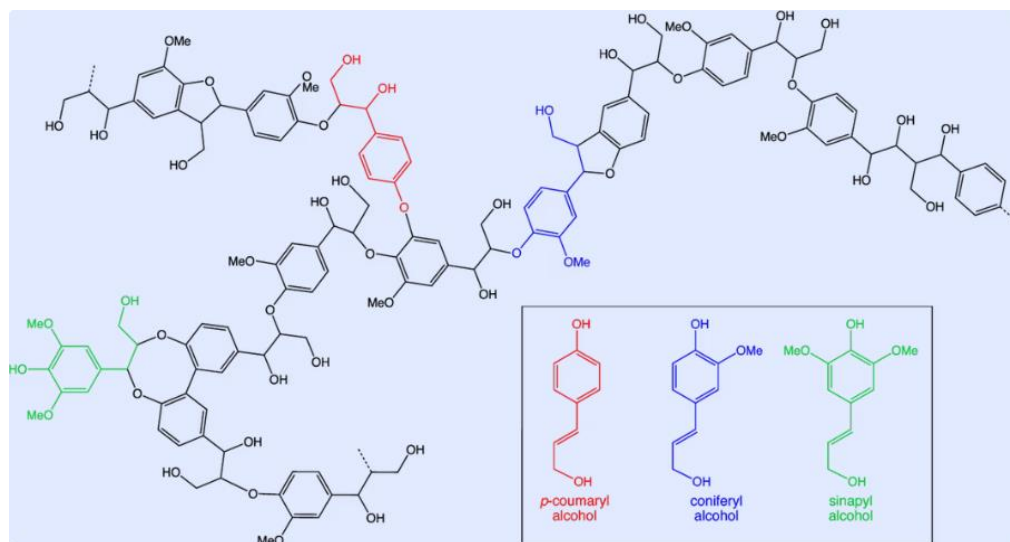


Figure.I.18. La structure chimique de la lignine.

I.3.3. L'origine de la biomasse lignocellulosique

Comme le montre la **figure I.19**, la biomasse peut être obtenue à partir de différentes origines.

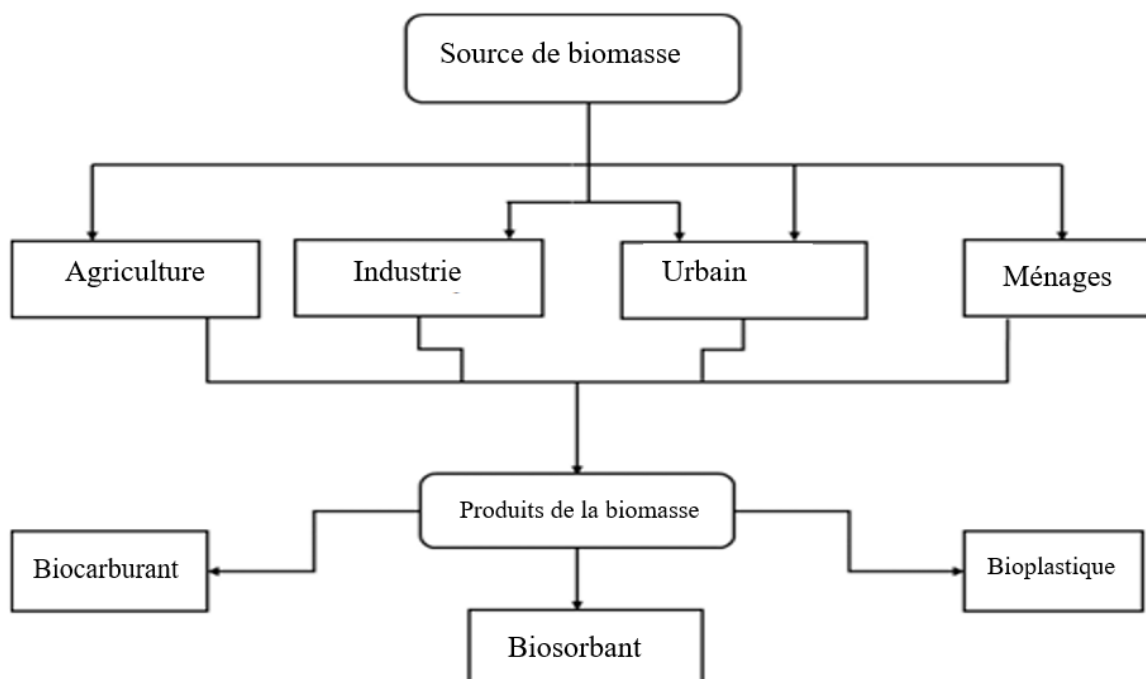


Figure.I.19. Les sources de biomasse et les produits précieux issus de la biomasse [42].

Les résidus de déchets végétaux provenant de l'agriculture et de la foresterie sont des sources abondantes de biomasse lignocellulosique. Les déchets alimentaires et industriels sont des sources supplémentaires de lignocellulose. Étant donné que les sources de biomasse lignocellulosique peuvent être récoltées plusieurs fois à partir d'une seule culture et qu'elles diminuent le coût médian annuel de la gestion des cultures énergétiques comparé aux cultures traditionnelles, elles sont considérées comme des ressources potentiellement très prometteuses pour la production de biens à valeur ajoutée [37].

I.3.4. Propriétés physicochimiques de la biomasse lignocellulosique

a) **Propriétés physiques** : parmi les caractéristiques physiques de la biomasse lignocellulosiques on trouve :

La taille des particules : les matières premières de diverses formes et dimensions peuvent présenter des efficacités de conversion et des exigences énergétiques distinctes. Pour cette raison, les matières premières sont habituellement soumises à un prétraitement afin de satisfaire les critères des diverses technologies de conversion thermodynamique.

La broyabilité : le prétraitement de la biomasse inclut la réduction de la taille des particules a un aspect lié à un autre propriété physique : broyabilité. Cette dernière, correspond à la résistance d'un matériau au broyage [43].

La densité : il y a deux types de densité. La densité des particules ; qui est la masse de toutes les particules en excluant le volume des pores ; elle est couramment utilisée dans la simulation en dynamique des fluides. Et la deuxième, c'est la densité apparente qui correspond au la masse des particules de biomasse sur le volume totale occupé par celles-ci, c'est une propriété physique crucial dans la conception du système logistique pour la manipulation et le transport de la biomasse [43].

L'absorption d'humidité : est l'une des propriétés physiques les plus importantes pour récolte, la manipulation, le transport et le stockage de biomasse. Ainsi, des opérations appropriées de séchage et de stockage sont essentielle pour maintenir la qualité des matières premières de la biomasse. L'humidité d'équilibre (EMC) est un indicateur crucial pour caractériser le comportement de sorption d'eau de la biomasse [43].

Propriétés thermiques : les caractéristiques de conversion thermochimique de la biomasse sont fortement influencées par ses propriétés thermiques. Cette partie décrit deux

caractéristiques thermiques essentielles : la conductivité thermique et la capacité calorifique spécifique [43].

b) Propriétés chimiques :

L'analyse proximal : l'analyse proximale peut fournir des informations sur la quantité d'humidité, de cendres, des substances volatiles et de carbone fixe contenues dans l'échantillon de biomasse. La teneur en humidité indique la quantité d'eau dans la biomasse ; exprimée en pourcentage du poids du matériau [43].

L'analyse ultime : l'analyse ultime vise à établir la teneur en carbone, hydrogène, azote, soufre et l'oxygène. Les résultats de l'analyse ultime sont habituellement présentés en termes de biomasse sèche ou sans cendre sèche. L'analyse ultime est réalisée grâce à des analyseurs élémentaires via la combustion d'un échantillon de biomasse pesé dans une atmosphère contrôlée, suivie d'une analyse subséquente de ses produits gazeux. Durant la combustion, le carbone se transforme en CO₂, l'hydrogène en H₂O, l'azote en NO_x et le soufre en SO₂ [43].

Le contenu énergétique : il est déterminé par la quantité d'énergie stockée dans une unité donnée d'un échantillon de biomasse exprimée par la chaleur de combustion. De plus, il est représenté par l'énergie totale dégagée sous forme de chaleur lors d'une combustion standard ; en utilisant la valeur calorifique comme mesure du contenu énergétique [43].

I.3.5. Application de la biomasse lignocellulosique

En raison des caractéristiques telles que la grande surface spécifique, une porosité ajustable et des capacités remarquables de groupes fonctionnels, les biomasses lignocellulosiques sont imposées comme une ressource révolutionnaire dans le traitement des eaux usées. Elles sont très performantes dans l'extraction des contaminants de l'eau comme les métaux lourds de nombreux types de colorants et même des polluants organiques. De plus, la récupération de nutriments grâce au biochar permet de réduire l'impact environnemental [44]. Par ailleurs, on peut l'utiliser même comme l'emballage de films dans le secteur alimentaire, les bandages antibactériens ou encore les transporteurs de médicaments dans le domaine médical [45].

Chapitre II : Matériels et Méthodes

II.1. Protocole de la préparation de sciure de bois

En raison de leur structure lignocellulosique, les déchets de bois peuvent servir d'adsorbants pour les ions métalliques et les colorants. Ils présentent des avantages considérables tels qu'une grande disponibilité, une manipulation aisée et un coût réduit. Le bois est un matériau hétérogène contenant divers constituants principalement *la cellulose, la lignine et l'hémicellulose*. Donc le bois a une variabilité structurale et chimique notable qui lui confère des caractéristiques spécifiques telles que la densité, la perméabilité, la capillarité et surtout l'hydrophobicité [46].

En raison de ces propriétés, ce mémoire vise à valoriser la *biomasse lignocellulosique* à base des résidus de bois, en tant qu'adsorbant dans le processus d'adsorption des colorants.

Le protocole de préparation a été réalisée par un lavage deux fois avec l'eau de robinet afin d'éliminer les grosses impuretés, suivi d'un lavage à l'eau distillée pour améliorer la pureté. Le matériau a été ensuite séché dans l'étuve à 60 °C pendant 24 h. Après séchage, la sciure de bois est broyée puis tamisée pour obtenir une poudre nommée **SB** homogène et prête à l'utilisation. La caractérisation de l'adsorbant **SB** a été faite par *spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)* et par détermination de *point de la charge nulle PCN*.

Les différentes étapes décrites précédemment sont regroupées dans la **figure II.1**. L'aspect visuel de SB avant et après broyage est donné par la **figure II.2**.

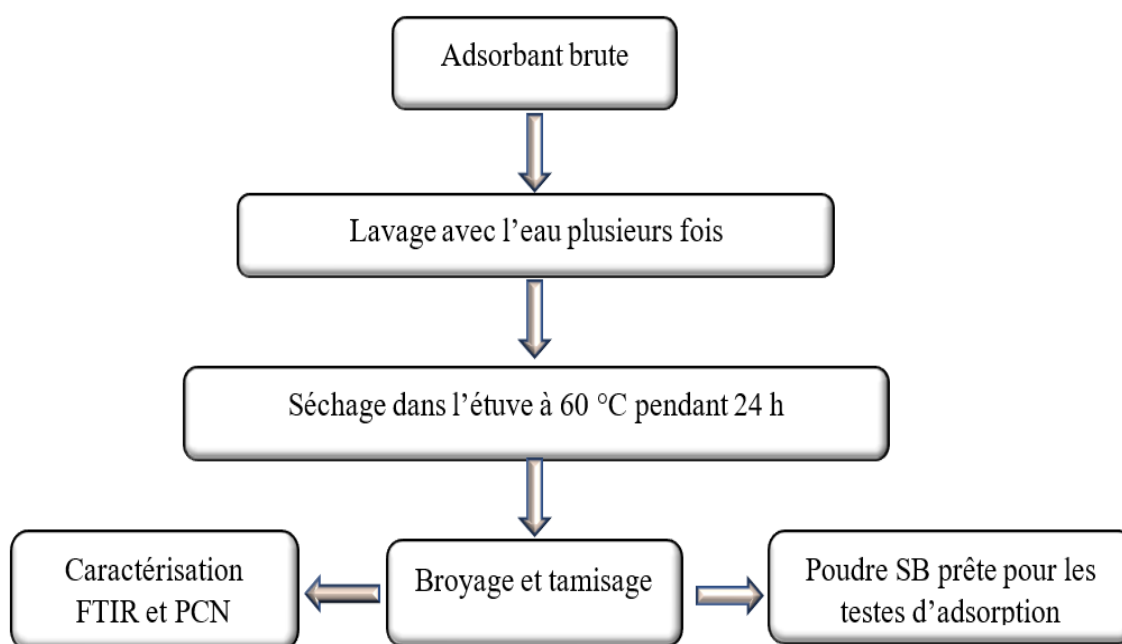


Figure II.1. Schéma représente le protocole expérimental de la préparation de bio- adsorbant.

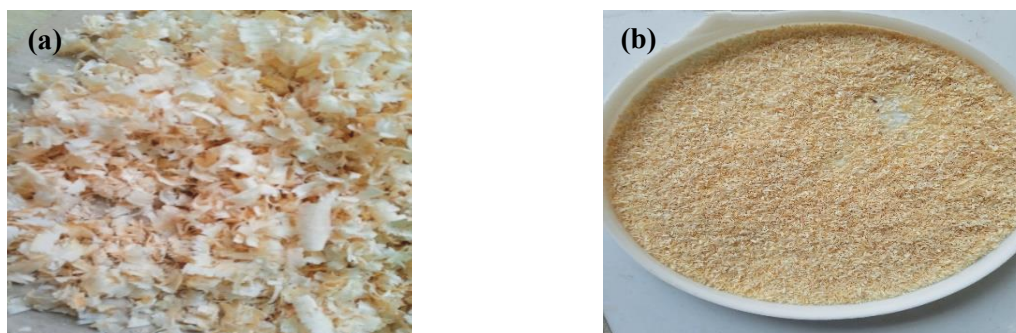


Figure II.2. Sciure de bois (SB) (a) avant broyage et (b) après broyage.

II.2. Caractérisation physico-chimique du l'adsorbant sciure de bois

II.2.1. La spectroscopie FTIR : la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) est une méthode qui repose sur les vibrations des atomes présents dans les matériaux organiques ou inorganiques. Le spectre IR d'un matériau est sensible à sa composition chimique, à sa substitution isomorphe, à l'ordre d'empilement des couches et à ses modifications structurales.

FTIR est donc une méthode très informative, non seulement pour identifier les groupes fonctionnels, mais également pour analyser les diverses interactions entre les matériaux. Cette méthode est basée sur l'interaction d'une molécule avec un rayonnement infrarouge provoquant des vibrations des liaisons moléculaires à diverses fréquences dans le domaine IR de 400 à 4000 cm^{-1} [47] (**Figure II.3**). Dans notre travail, la caractérisation de SB a été effectuée à l'aide un spectroscopie FTIR « 4200- JASCO » (**Figure II.4**).

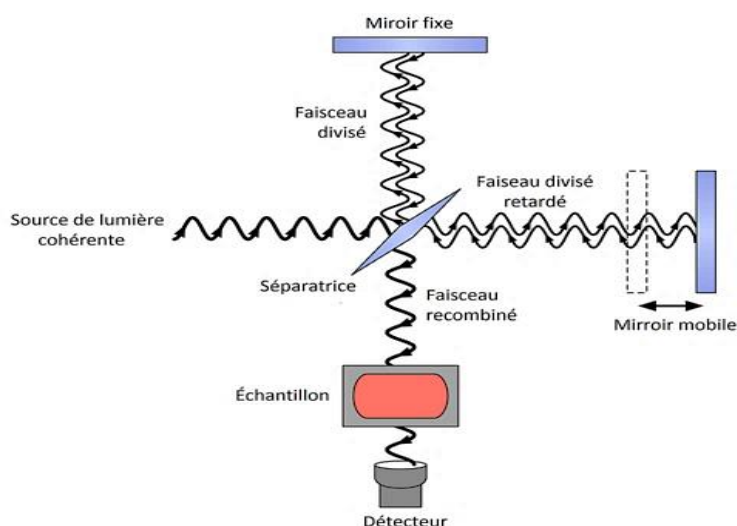


Figure II.3. Schéma du principe de FTIR.



Figure II.4. Spectrophotomètre FTIR « 4200-JASCO ».

II.2.2. Détermination du point de charge nulle PCN : la détermination de PCN consiste à utiliser une série d'erlenmeyers de 50 ml. Dans chaque erlenmeyer on a introduit un volume de 30 ml de solution de chlorure de sodium de 0,01 M (NaCl). Le pH initial de ces solutions a été ajusté à différentes valeurs comprises entre 2 et 12 à l'aide de solution d'acide chlorhydrique (HCl) ou d'hydroxyde de sodium (NaOH) de 0,1 M et un pH mètre Adwa (AD 1030) (**Figure II.5**).

Après l'ajustement du pH, une masse de 30 mg de l'adsorbant SB a été ajoutée dans chaque erlenmeyer. Les suspensions ont été laissées sous agitation magnétique à 350 tr/min pendant 24 h à température ambiante en utilisant un agitateur RT 10 power (IKA- WERKZ). Après ce temps de contact, le pH final (pH_f) a été mesuré pour chaque échantillon. La valeur du PCN correspond à l'intersection avec l'axe des abscisses de la courbe $\Delta pH (pH_f - pH_i) = f(pH_i)$.



Figure II.5. pH mètre Adwa (AD 1030).

II.3. Préparation des solution aqueuses et courbes d'étalonnages

Afin d'étudier l'adsorption des colorants par la sciure de bois (SB), des solutions mères des deux colorants, le vert brillant (VB) et le bleu de bemacid (BB) ont été préparées à une concentration de 500 mg/L (500 ppm) par dissolution de 50 mg de colorant dans 100 ml d'eau

distillée. Les concentrations requises pour les expériences d'adsorption et d'étalonnage ont ensuite été obtenues en diluant la solution mère préalablement préparée.

La courbe d'étalonnage du colorant vert brillant (VB) a été établie à partir d'une solution de 20 ppm par dilution afin d'obtenir une gamme de concentration de 1 et 10 mg/L (1,2,3,4,5,6,7,8,9 et 10 mg/L). Les mesures d'absorbance ont été réalisées à la longueur d'onde maximale dans le domaine visible $\lambda_{\text{max}} = 624 \text{ nm}$.

Par ailleurs, la courbe d'étalonnage de bleu de bemacid BB a été réalisée à partir de la solution mère (500 mg/L) par dilution pour obtenir des concentrations comprises entre 5 et 70 mg/L (5,10,20,30,40,50,60 et 70 mg/L) à une longueur d'onde maximale dans le domaine visible $\lambda_{\text{max}} = 610 \text{ nm}$.

Les longueurs d'ondes maximales dans le domaine visible **624 nm** et **610 nm** ont été préalablement déterminées à l'aide du spectrophotomètre SPECORD 210 plus qui est représenté dans la **figure II.6**. Les valeurs obtenues sont en bon accord avec celles rapportées dans la littérature [15,17].



Figure II.6. Spectrophotomètre d'absorption UV-Visible « SPECORD 210 plus ».

II.4. Dosage des colorants par spectroscopie UV-Visible

La spectroscopie UV-Visible est une technique de la spectroscopie optique qui emploie la lumière dans les domaines d'ultraviolet, visible et une zone proche à l'infrarouge (généralement de 200 nm à 800 nm). L'absorption de la lumière par la matière provoque une excitation électronique, correspondant au passage de l'état fondamental à un état excité, comme le montre la **figure II.7**.

La spectroscopie UV-visible repose sur la loi de **Beer-Lambert**, qui prévoit que l'absorbance d'une solution est proportionnelle à la concentration des espèces absorbantes dans la solution et à la longueur de trajet [48]. C'est une loi linéaire, mais elle n'est pas toujours respectée lorsque la concentration est plus élevée [49].

On peut représenter la loi de Beer-Lambert par la relation mathématique suivante :

$$A = \epsilon.C.l \quad (\text{II.1})$$

A : Absorbance, ϵ : absorptivité molaire ($\text{L.mol}^{-1}.\text{cm}^{-1}$), l : la longueur de trajet (cm^{-1}).

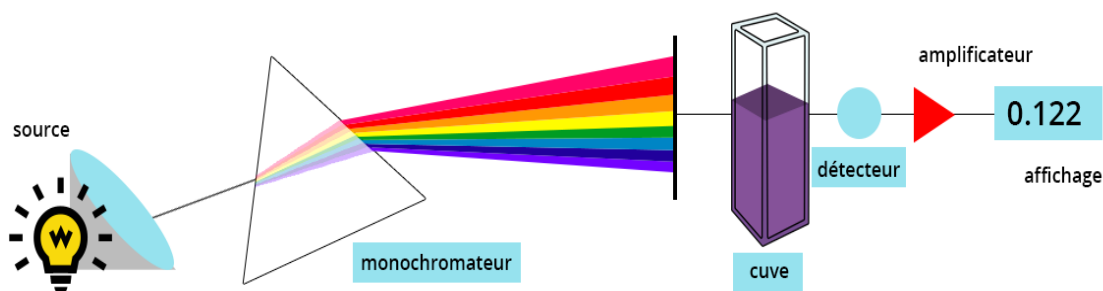


Figure II.7. Principe de Spectroscopie UV-Visible.

II.5. Procédé général d'adsorption par la méthode en batch

La méthode **en batch** est une méthode couramment utilisée dans le procédé d'adsorption dans laquelle on met en contact une masse de l'adsorbant avec un volume fixe d'une solution contenant le polluant à une concentration initiale connue. On laisse les mélanges sous agitation magnétique pendant un temps déterminé. Après séparation des phases, la solution est analysée afin d'étudier l'équilibre et la cinétique d'adsorption [50], comme indiqué dans la **figure II.8**.

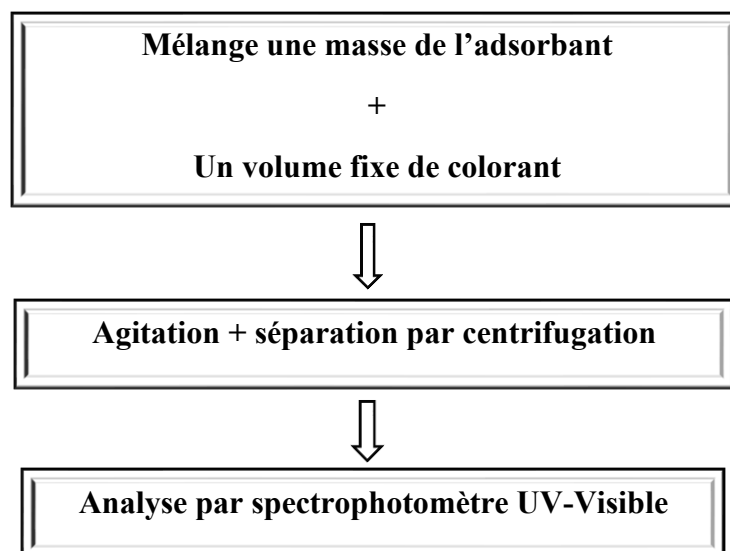


Figure II.8. Schéma représentative du procédé d'adsorption.

II.6. Paramètres d'adsorption étudiés

II.6.1. Effet de la granulométrie : dans le but d'étudier l'influence de la taille des particules du bio- adsorbant (sciure de bois, SB), l'adsorption en mode batch a été réalisée en utilisant 20 ml de solutions de colorants à des concentration de 20 mg/L pour le vert brillant (VB) et 50 mg/L pour le bleu de bemacid (BB) dans des erlenmeyers de 50 ml. Une masse du bio-adsorbant (sciure de bois) a ensuite été ajoutée à différentes tailles de particules (*< 0,2, 0,2-0,25, 0,25-0,4, 0,4-1 et > 1mm*), soit 20 mg pour le VB et 15 mg pour le BB ; le mélange a été agité pendant 2 h à 350 tr/min.

Après ce temps d'agitation, les deux phases solide (SB) et le liquide ont été séparés par centrifugation et le surnageant (liquide) a été analysé à l'aide d'une spectrophotomètre UV-Visible, afin de calculer l'efficacité d'adsorption (E (%)) et la capacité d'adsorption (Q (mg/g)) selon les équations :

$$E (\%) = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \quad (\text{II.2})$$

$$Q (\text{mg/g}) = \frac{(C_0 - C_e)}{m} \times V \quad (\text{II.3})$$

Où : E (%) : l'efficacité d'adsorption, Q (mg/g) : capacité d'adsorption, m (g) : masse de l'adsorbant, V (L) : volume de solution colorée, C_0 (mg/L) : concentration initiale en colorant C_e (mg/L) : concentration en colorant à l'équilibre, A_{initial} : Absorbance avant adsorption A_{final} : Absorbance après adsorption.

L'ensemble de ces manipulations a été effectué à pH =6 (pH neutre) pour le VB et à pH $\approx$ 3 pour le BB.

II.6.2. Effet de la masse : l'étude de l'effet de la masse du bio-adsorbant consiste à mettre en contact différentes masses comprises entre 10 et 40 mg avec un volume fixe de 20 ml des deux solutions de colorants (VB et BB), à une concentration fixe qui est respectivement 20 et 50 ppm et des pH = 6 pour le vert brillant et pH $\approx$ 3 pour le bleu de bemacid.

Les solutions ont été agitées en mode batch pendant 2 h et 350 tr/min. Ensuite, le dosage du surnageant a été effectué à l'aide de spectrophotomètre UV-Visible, à des longueurs d'onde de 624 nm pour VB et de 610 nm pour le BB, afin de déterminer l'efficacité d'adsorption (E (%)) ainsi que la capacité d'adsorption (Q (mg/g)).

II.6.3. Effet du pH : l'étude de l'influence du pH sur l'adsorption des deux colorants a été réalisée en introduisant une masse de bio-adsorbant sciure de bois (SB) de 20 mg dans l'adsorption de colorant vert brillant et 15 mg dans le cas du bleu de bemacid dans des erlenmeyers contenant un volume de 20 ml de solution colorée. L'expérience a été effectuée sur une gamme de pH de 2 à 10 et a été régulé par l'ajout de HCl (0.1M) ou de NaOH (0.1M) ; les solutions ont été maintenues sous agitation en mode batch pendant 2 h et à 350 tr/min. Les concentrations initiales ont été fixées à 50 mg/L pour le BB et à 20 mg/L pour le VB.

Après le temps de contact indique, le solide est séparé du liquide par centrifugation. L'analyse du surnageant a été effectuée à l'aide de spectrophotomètre UV-Visible à une longueur d'onde de 624 nm pour le VB et 610 nm pour le BB.

II.6.4. Effet du temps de contact : le suivi cinétique de l'adsorption a été réalisé en mettant en contact une masse de sciure de bois (SB) de 20 mg dans l'étude de VB et 15 mg pour le BB avec un volume de 20 ml de solution colorée. L'agitation a été maintenue sur un intervalle de temps compris entre 5 et 180 min. L'étude a été effectuée à des concentrations initiale de 20 ppm pour le VB et 50 ppm à un pH =6 pour le VB et à pH $\approx$ 3 pour le BB.

Par la suite, le surnageant a été séparé du solide par centrifugation puis analysé en mesurant l'absorbance correspondante à la longueur d'onde maximal de chaque colorant (624 nm pour VB et 610 nm pour BB) afin du calculer le rendement (E (%)) et la capacité d'adsorption (Q (mg/g)) et le tracé en fonction du temps.

II.6.5. Effet de la concentration initiale en colorant (C_0) : afin d'évaluer l'impact de la concentration initiale en colorant sur l'adsorption. Une masse fixe de bio-adsorbant (SB), de 20

mg pour le VB et de 15 mg pour le BB, a été mise en contact avec un volume de 20 mL de solution de ces colorants, à des concentrations initiales variant de 5 à 200 mg/L et à des pH optimaux.

Les solutions ont été maintenues sous agitation jusqu'au temps d'équilibre. Ensuite, les surnageants ont été analysés à l'aide d'une spectrophotométrie UV-Visible pour mesurer l'absorbance. Le rendement (E (%)) et la capacité d'adsorption (Q (mg/g)) ont été calculés en utilisant les équations déjà montrées. Ces résultats nous ont permis aussi de faire la modélisation et de déterminer le type d'isotherme en utilisant les équations de Langmuir et Freundlich déjà données dans le premier chapitre.

II.6.6. Effet de la température : l'effet de la température sur l'adsorption a été réalisée en mettant en contact une masse de SB, de 20 mg pour le vert brillant et 15 mg pour le bleu de bemacid avec un volume de 20 ml de ces deux colorants à une intervalle de température de 20 à 60 °C dans un bain- marie thermostaté et sous agitation à un temps et pH optimales. La concentration initiale en colorant a été fixée à 50 mg/L pour le BB et 40 mg/L pour le VB. Après le temps de contact qui correspond au temps d'équilibre, le liquide et solide ont été séparés pour analyser le surnageant par spectrophotomètres UV-Visible, afin de déterminer l'absorbance finale qui nous a permis de calculer E (%) et Q (mg/g).

II.7. La régénération

Le processus de régénération a été effectuée à l'aide de plusieurs cycles d'adsorption-désorption afin d'évaluer l'efficacité de l'adsorbant par le calcul de la capacité d'adsorption après chaque cycle. Les étapes de ce processus sont représentées comme suit :

II.7.1. L'adsorption : c'est la première étape réalisée en mettant en contact une masse de 250 mg de la bio-adsorbant sciure de bois (SB) avec 250 ml de solution contenant le colorant à une pH neutre pour le vert brillant ($C_0 = 20$ mg/L) et à $pH \approx 3$ pour le bleu de bemacid ($C_0 = 50$ mg/L). Après un temps d'agitation de 2 h, le mélange a été filtré, puis le filtrat a été analysé à l'aide d'un spectrophotométrie UV-Visible. Le solide récupéré a ensuite été lavé avec l'eau distillée afin d'éliminer les molécules de colorant non adsorbées, puis sécher à 60°C pendant 24h, afin d'obtenir le bio-adsorbant après adsorption, noté **SB-VB (figure II. 9 (a))** et **SB-BB (figure II.9 (b))** selon le type de colorant adsorbé.

II.7.2. Régénération de l'adsorbant (La désorption du colorant): cette étape a été effectuée par l'ajout d'une masse de solide récupérer lors de la première étape (SB-VB ou SB-BB) dans

un volume donné d'agent désorbant. Plusieurs solutions et valeurs de pH ont été testées pour la désorption des colorants (VB et BB), à savoir : HCl (0,05 M), NaOH (0,05 M), pH = 4, pH = 9, l'éthanol ainsi qu'un mélange éthanol/eau. Selon l'absorbance des solutions mentionnées après contact avec SB-VB et SB-BB, le mélange eau/éthanol (50/50, v/v) a été retenu comme agent de désorption le plus efficace.

Ainsi, une masse de SB-VB et SB-BB a été mise en contact avec un volume du mélange eau/éthanol, puis laissée sous agitation pendant 2 h. Le mélange a ensuite été filtré, lavé, puis séché pendant 24 h à 60 °C afin d'obtenir l'adsorbant régénéré, représenté dans la **figure II.9(c)**.

II.7.3. Cycle adsorption- désorption : l'adsorbant régénéré a été utilisé pour un nouveau cycle, afin d'évaluer son efficacité et sa capacité de réutilisation en tant que bio-adsorbant (SB). Cette opération a été répétée 3 fois pour chaque colorant.



Figure II.9. Image représente SB-VB(a), SB-BB (b) et SB régénéré (c).

Chapitre III : Résultats et Discussions

III.1. Caractérisation de l'adsorbant

III.1.1. Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (IRTF)

L'analyse par spectroscopie FTIR a été réalisée dans le but d'étudier les groupes fonctionnels de la bio-adsorbant à base de sciure de bois. Le spectre mentionné dans la **figure III.1** représente une principale bande vers 3500 cm^{-1} correspondant au groupe hydroxyle (OH) dans la structure de cellulose et hémicellulose, une bande caractéristique vers 2900 cm^{-1} indique la présence de vibration C-H du squelette carboné du matériau, une bande vers 1730 cm^{-1} représente les groupes C=O existant dans l'ester et l'acide dans les molécules d'hémicellulose, tandis qu'une autre apparaît vers 1600 cm^{-1} représente la vibration des liaisons C=C dans la structure de lignine.

De plus, une autre bande apparaît vers 1420 cm^{-1} correspondant au CH_2/CH_3 de la cellulose et une autre bande vers 1000 et 1200 cm^{-1} correspond au groupe C-O, C-C et C-O-C dans les structures de cellulose et d'hémicellulose. La bande vers 890 cm^{-1} spécifique à la structure cellulosique est attribuée aux vibrations des liaisons β -glycosidique. Ces résultats sont en bon accord avec ceux rapportés dans la littérature [51,52].

L'ensemble de ces fonctions chimiques confirme la structure lignocellulosique de l'adsorbant et résumé dans le **tableau III.1**.

Tableau III.1. Différentes bandes caractéristiques du spectre FTIR de la sciure de bois brute.

Nombres d'ondes cm^{-1}	Attribution	Groupe fonctionnel	Localisation dans la molécule
890	C-O-C	Éther	Liaisons β -glycosidique
1000-1200	C-O, C-C, C-O-C	Ester, alcane, éther	Cellulose et hémicellulose
1420	CH_2/CH_3	Méthyle	Cellulose
1600	C=C	Alcène	Lignine
1730	C=O	Ester	Hémicellulose
2900	CH	/	Chaîne aliphatique (squelette carboné)
3500	OH	Hydroxyle	Cellulose et hémicellulose

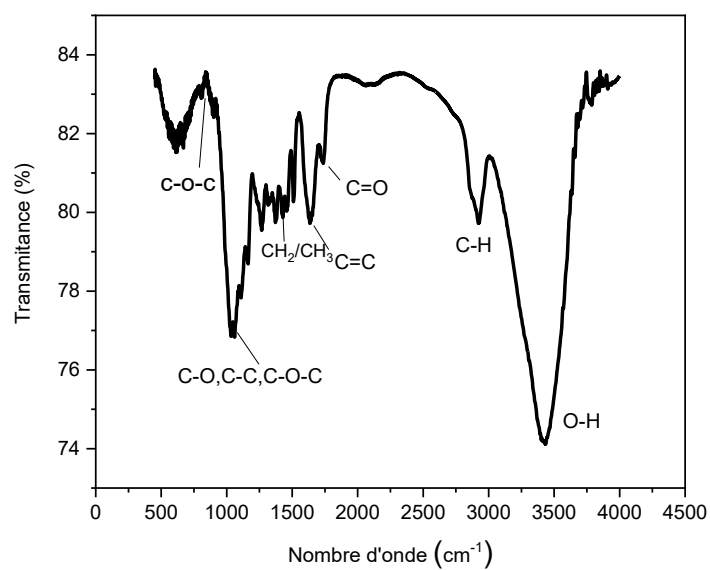


Figure III.1. Spectre FTIR de sciure de bois brute.

III.1.2. Point de charge nulle (PCN)

Les résultats de PCN de SB sont donnés par la **figure III.2**.

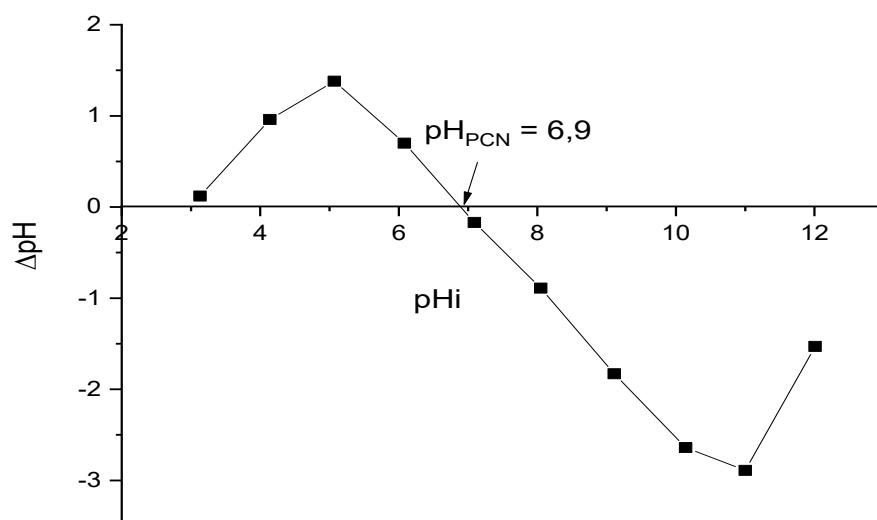


Figure III.2. Point de charge nulle de sciure de bois.

Le pH de point de charge nulle (pH_{PCN}) a été effectué dans le but d'identifier la charge électrique de la surface de l'adsorbant, dans laquelle un pH inférieur du pH_{PCN} la surface de l'adsorbant est chargée positivement à cause de la présence des protons H^+ plus que des groupes hydroxydes (OH^-) à la surface. Par contre, à pH supérieur à pH_{PCN} la surface de l'adsorbant est négative. De plus, à l'équilibre entre les charges positives et négatives la charge de la surface est nulle. C'est le cas où le $\text{pH} = \text{pH}_{\text{PCN}}$ [53]. D'après les résultats présentés dans la **figure III.2** la valeur du pH_{PCN} de l'adsorbant sciure de bois est égale à 6,9.

III.2. Etude UV-Visible des colorants

III.2.1. Etude de l'influence du pH initial en colorant

Les colorants sont des substances composées en deux groupes, une auxochrome et l'autre chromophore (groupement conjugué) qui est le responsable de couleur. Pour cette raison, le spectre des deux colorants a été réalisée dans le domaine visible de 400 nm à 800 nm. D'après les résultats de balayage spectroscopique de la **figure III.3**, les longueurs d'ondes maximales sont 624 nm et 610 nm pour respectivement le vert brillant et le bleu de bemacid.

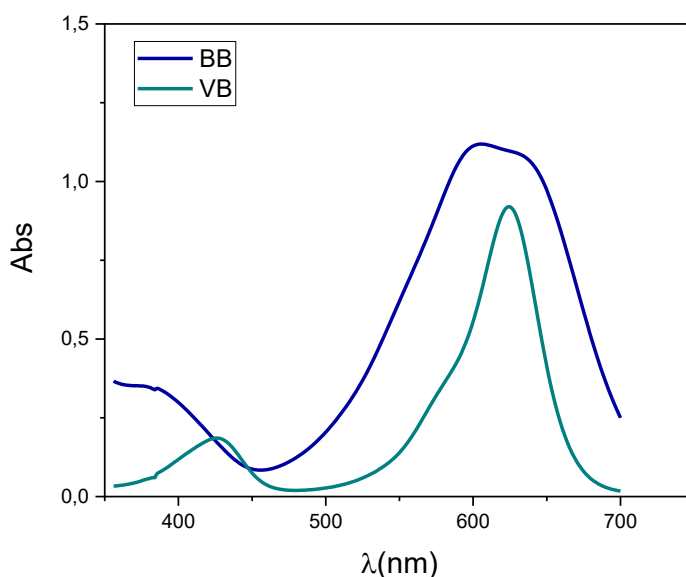


Figure III.3. Spectre d'absorption du colorant VB et BB, $[\text{VB}]_0 = 10 \text{ mg/L}$, $[\text{BB}]_0 = 70 \text{ mg/L}$
 $\text{pH}_{\text{VB}} = 6$, $\text{pH}_{\text{BB}} = 7$.

Les résultats de la variation de l'absorbance en fonction du pH du milieu sont présentés dans la **figure III.4** pour les deux colorants le vert brillant (VB) et le bleu de bemacid (BB) aux longueurs d'ondes préalablement déterminées en variant le pH dans la gamme de 2 à 10.

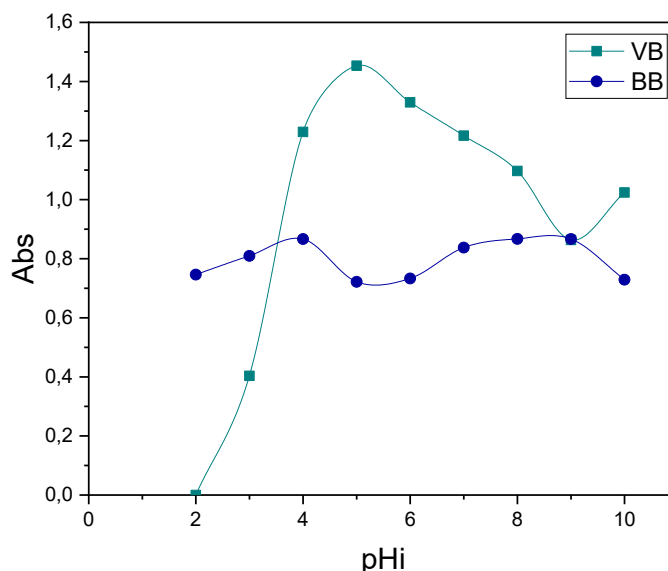


Figure III.4. La variation de l'absorbance en fonction du pH des deux colorants VB et BB, $[VB]_0 = 20 \text{ mg/L}$, $[BB]_0 = 50 \text{ mg/L}$, $\lambda_{\text{max}}(\text{VB}) = 624 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{max}}(\text{BB}) = 610 \text{ nm}$.

D'après ces courbes on peut remarquer que la variation de l'absorbance en fonction du pH pour le BB est quasi constante ce qui confirme qu'il est un colorant stable ainsi que la longueur d'onde maximale reste constante dans toute la gamme de pH étudiée.

En revanche, dans le VB on observe que l'absorbance augmente avec l'augmentation du pH jusqu'à atteindre un maximum à $\text{pH} = 5$ dans laquelle la structure de colorant devient plus stable et ensuite l'absorbance diminue en milieu basique à cause de la protonation et la déprotonation de la charge de colorant (**figure III.5 [54]**).

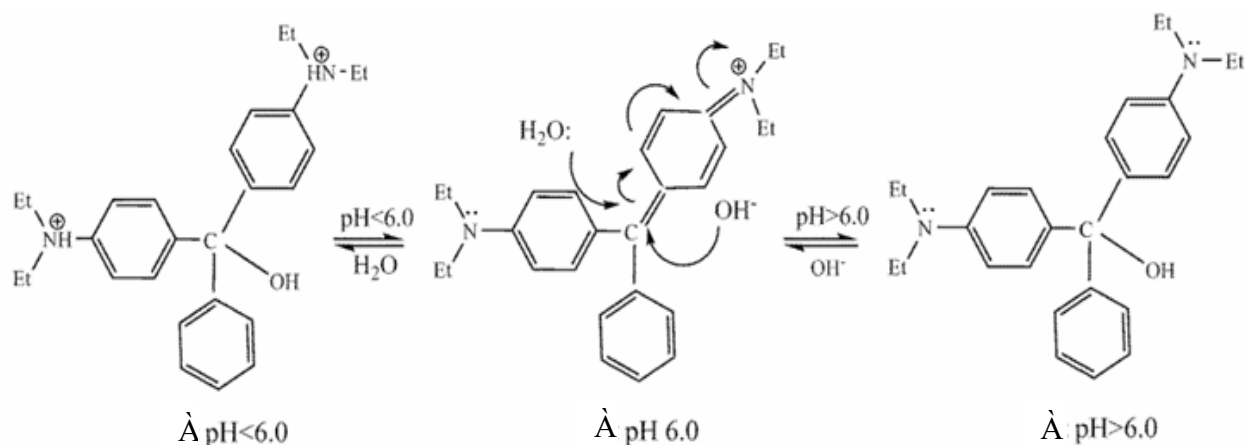


Figure III.5. Structure de colorant VB et effet du pH sur sa stabilité de résonance [54].

III.2.2. Les courbes d'étalonnage

Les courbes d'étalonnage ont été réalisées afin de vérifier la linéarité de la loi de Beer Lambert. On a tracé l'absorbance en fonction des concentrations initiales en colorant, qu'ils ont été préparés par dilution à partir d'une solution mère. La courbe d'étalonnage de colorant "vert brillant" a été effectuée à un intervalle de 1 à 10 ppm à partir d'une solution mère de 20 ppm à $\lambda_{\text{max}} = 624 \text{ nm}$ et $\text{pH} = 6$. Pour bleu de bemacid, la courbe a été effectuée à une gamme de concentration de 5 à 70 ppm à partir d'une solution mère de 500 ppm à $\lambda_{\text{max}} = 610 \text{ nm}$ et $\text{pH} = 7$. Les courbes sont présentées dans la **figure III.6** avec les résultats de corrélation avec les valeurs de coefficient d'extinction molaire dans le **tableau III.2**.

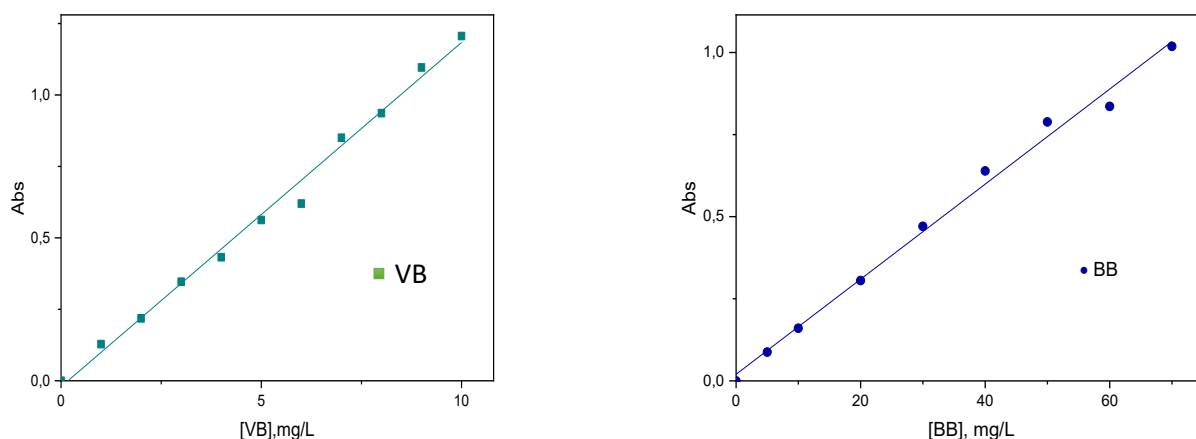


Figure III.6. les courbes d'étalonnage des deux colorants. $\lambda_{\text{max}}(\text{VB}) = 624 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{max}}(\text{BB}) = 610 \text{ nm}$, $\text{pH}_{\text{VB}} = 6$, $\text{pH}_{\text{BB}} = 7$.

Tableau III.2. Résultats de corrélation.

Colorants	Équation de la courbes	R^2	ε (L.mol ⁻¹ .cm ⁻¹)
Vert brillant (VB)	0,1204. [VB] – 0,0207	0,9928	0,1204
Bleu de bemacid (BB)	0,0145. [BB] + 0,0201	0,9930	0,0145

Les résultats montrent que la loi de Beer Lambert est vérifiée dans le domaine de concentration étudié avec un $R^2 \approx 1$. Les valeurs du coefficient d'extinction molaire ont été obtenus à partir de la pente de la courbe de l'absorbance en fonction de la concentration en colorant.

III.3. Etude des paramètres d'adsorption

III.3.1. Effet de masse de l'adsorbant

L'impact de la masse de l'adsorbant (SB) sur le processus d'adsorption a été évaluée par la variation de la masse de la bio-adsorbant SB de 10 à 40 mg avec une volume fixe en colorant $V = 20$ ml. Les résultats sont donnés dans la **figure III.7**.

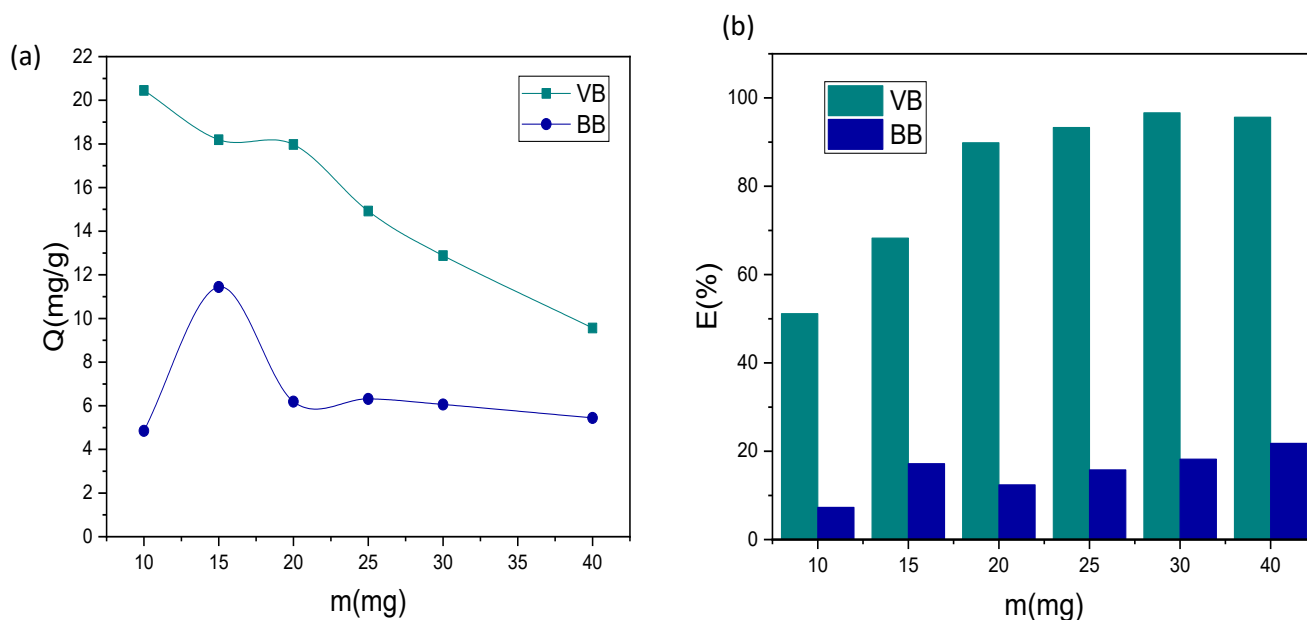


Figure III.7. Effet de masse de l'adsorbant sur la capacité d'adsorption Q (mg/g) (a) et l'efficacité d'adsorption E (%) (b), $[VB]_0 = 20$ mg/l, $[BB]_0 = 50$ mg/l $V = 20$ ml, $pH_{VB} = 6$, $pH_{BB} = 3$, $T = T$ ambiante, $t = 2$ h, $\phi = 350$ tr/min.

D'après cette figure, on observe que dans le cas de colorant vert brillant (VB) la capacité d'adsorption diminue avec l'augmentation de la masse de l'adsorbant (sciure de bois) de 20,45 mg/g à une masse de 10 mg jusqu'à 9,56 mg/g à $m = 40$ mg. Par ailleurs, l'efficacité d'adsorption augmente de 51,13 % à $m_{SB} = 10$ mg de 89,85 % à $m_{SB} = 20$ mg due à la présence de plusieurs sites actifs. A des masses plus importantes (25, 30 et 40 mg), l'efficacité d'adsorption devient constante à cause de la saturation de la sciure de bois. On peut conclure que la masse optimale dans l'adsorption du VB est $m = 20$ mg car au niveau de cette masse il y a un équilibre entre la capacité et l'efficacité d'adsorption.

Par contre, dans le cas de colorant anionique le bleu de bemacid la capacité d'adsorption a augmenté de 4,85 mg/g avec un pourcentage de 7,28 % à $m_{SB} = 10$ mg jusqu'à 11,44 mg/g et une efficacité d'adsorption de 17,16 % à $m_{SB} = 15$ mg, mais à une masse de 20 mg on a remarqué une chute de la capacité de 6,19 mg/g et une efficacité de 12,38 %. On peut expliquer ce résultat par la formation des liaisons faible entre le colorant et l'adsorbant. A partir de la masse 20 mg, on observe une stabilisation à des masses plus élevées. Selon cette étude la masse optimale pour l'adsorption de colorant le bleu de bemacid est de $m = 15$ mg avec $Q = 11,44$ mg/g.

III.3.2. Effet de la granulométrie

Afin étudier l'influence de la taille des particules de la bio-adsorbant sciure de bois (SB), différentes tailles ont été testées ($< 0,2$, $0,2-0,25$, $0,4-1$, > 1) à un temps de contact de 2 h. Les résultats sont présentés dans la **figure III.8**.

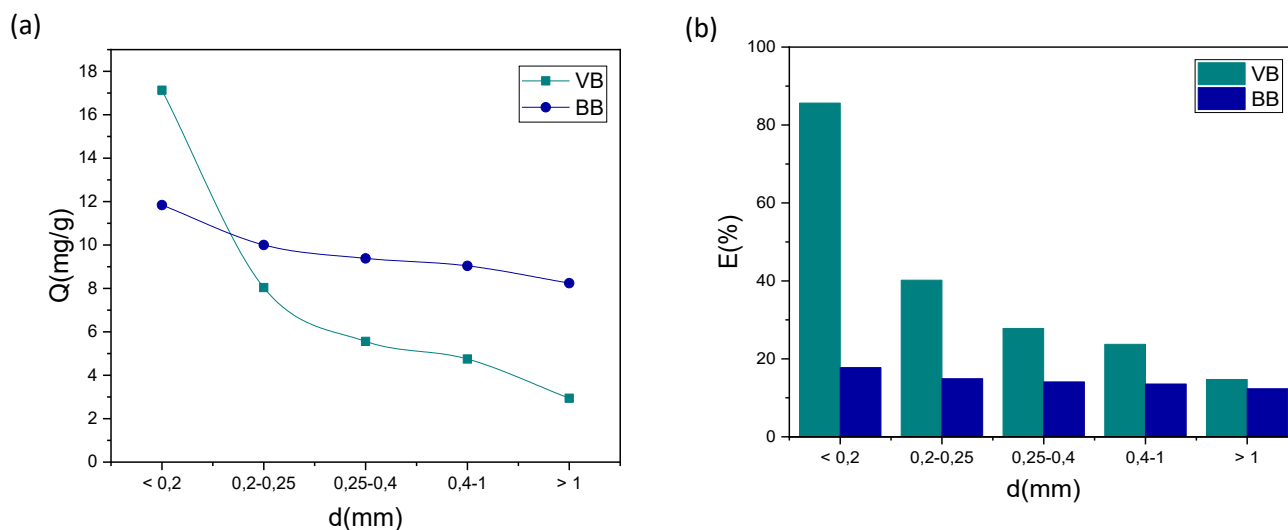


Figure III.8. Effet de la taille des particules sur la capacité d'adsorption $Q(\text{mg/g})$ (a) et l'efficacité d'adsorption $E(\%)$ (b), $[\text{VB}]_0 = 20 \text{ mg/l}$ $[\text{BB}]_0 = 50 \text{ mg/l}$, $m_{\text{SB}}(\text{VB}) = 20 \text{ mg}$ $m_{\text{SB}}(\text{BB}) = 15 \text{ mg}$, $V = 20 \text{ ml}$, $\text{pH}_{\text{VB}} = 6$, $\text{pH}_{\text{BB}} = 3$, $T = T \text{ ambiante}$, $t = 2 \text{ h}$, $\phi = 350 \text{ tr/min}$.

Les résultats montrent que dans le cas de colorant bleu de bemacid l'effet de la taille des particules de l'adsorbant n'a pas un effet significatif sur le processus d'adsorption avec une capacité d'adsorption de 11,84 mg/g et un pourcentage d'élimination de 17,76 % à une taille < 0,2.

Par contre, pour le colorant vert brillant l'effet est remarquable avec une capacité d'adsorption de 17,13 mg/g et un pourcentage d'élimination le plus élevé de 85,64 % avec à une taille < 0,2.

Ces résultats peuvent être expliqués par le fait que plus la taille des particules est petite plus la surface spécifique est grande et l'élimination des colorants est importante. Pour cette raison on a choisi cette taille (< 0,2) dans toutes les expériences.

III3.3. Effet du pH du milieu

Le pH est l'un des paramètres les plus importants, il a une influence sur la stabilité chimique des colorants. Pour étudier l'impact de ce facteur on a varié le pH des solutions du colorant de 2 à 10 en utilisant des solutions de l'acide chlorhydrique HCl (0,1 M) et hydroxyde de sodium NaOH (0,1 M). Les résultats sont présentés dans la **figure III.9**.

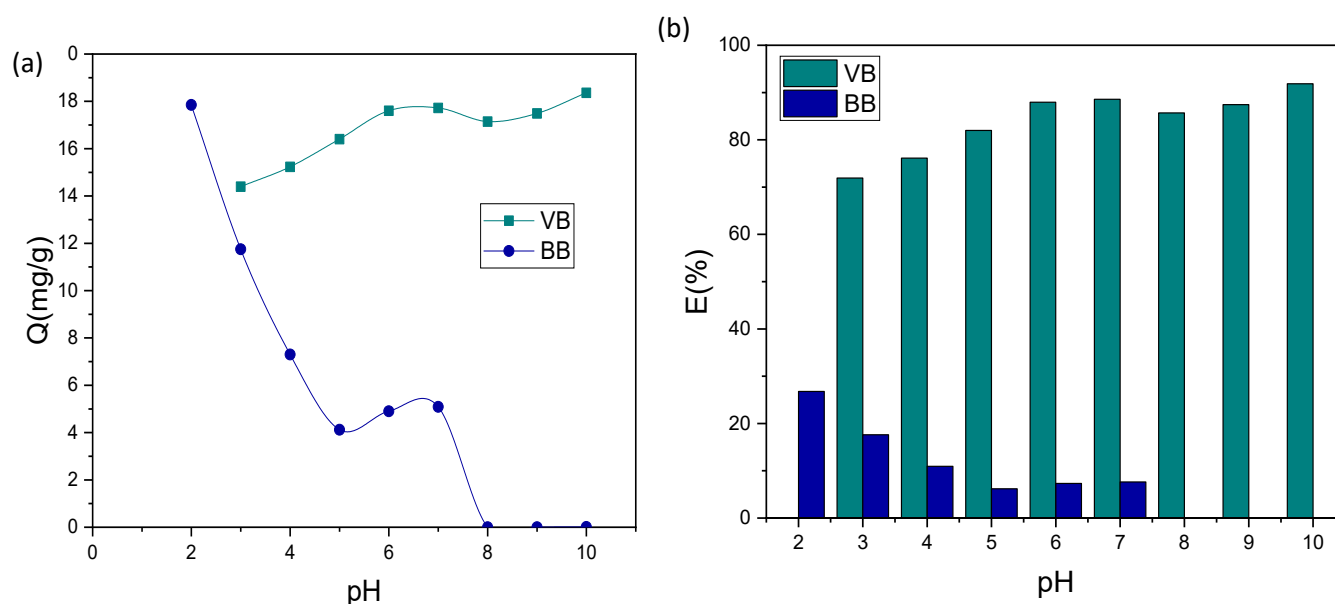


Figure III.9. Effet du pH du milieu sur la capacité d'adsorption Q (mg/g) (a) et l'efficacité d'adsorption E (%) (b), $[VB]_0 = 20$ mg/l, $[BB]_0 = 50$ mg/l $m_{SB(VB)} = 20$ mg, $m_{SB(BB)} = 15$ mg, $V = 20$ ml, $T = T$ ambiante, $t = 2$ h, $\phi = 350$ tr/min.

A partir des résultats de la **figures III.9** on observe que dans le cas du colorant vert brillant, la capacité et l'efficacité d'adsorption augmente de 14,39 mg/g et 71,91 % à pH = 3 jusqu'à pH = 6 avec une capacité d'adsorption de 17,6 mg/g et une efficacité d'adsorption de 87,96 %. Dans cette zone du pH les forces d'attraction entre le colorant et l'adsorbant (sciure de bois) est important tandis que les forces de répulsion diminue à cause de l'acidité du milieu. Au-delà du pH 6 (pH naturel du colorant) la capacité et l'efficacité d'adsorption augmente très peu avec l'augmentation du pH, la raison pour laquelle les expériences ont été suivies à ce pH considéré comme optimal dans cette étude.

Contrairement au colorant BB l'adsorption est favorisée en milieu acide dans lequel la surface de l'adsorbant est chargé positivement. De plus, les forces d'attractions est important dans ce milieu, par contre en milieu basique et pour un $pH > pH_{PCN}$ l'adsorption est quasi nul à cause des interactions répulsives entre la charge négative de la surface de l'adsorbant (SB) et la charge négative du colorant. Ces résultats sont globalement satisfaisants par rapport aux données de la littérature [55].

En conclusion, les pH optimaux de ces deux colorants sont pH = 6 (pH naturel du colorant) pour le VB avec une capacité d'adsorption de 17,6 mg/g et un pourcentage de 87,96 % et pH égale à 3 pour le BB avec une capacité d'adsorption de 11,75 mg/g et une efficacité d'adsorption de 17,62 %. Malgré que le pH = 2 nous a donné une capacité et une efficacité d'adsorption plus importante, mais il reste un pH fortement acide et donc nous avons choisi de travailler dans des conditions d'acidité modéré (pH=3).

III.3.4. Effet du temps de contact et modèles cinétiques

III.3.4.1. Effet du temps de contact

Le temps de contact est l'un des paramètres les plus importants dans le processus d'adsorption, il donne aussi une idée sur la cinétique de l'adsorption. Afin de comprendre mieux le phénomène, nous avons varié le temps de 5 à 180 min pour les deux colorants, le VB à $C_0 = 20$ mg/L et pH = 6 et le BB à $C_0 = 50$ mg/L et pH = 3. Les résultats sont présentés dans la **figure III.10**.

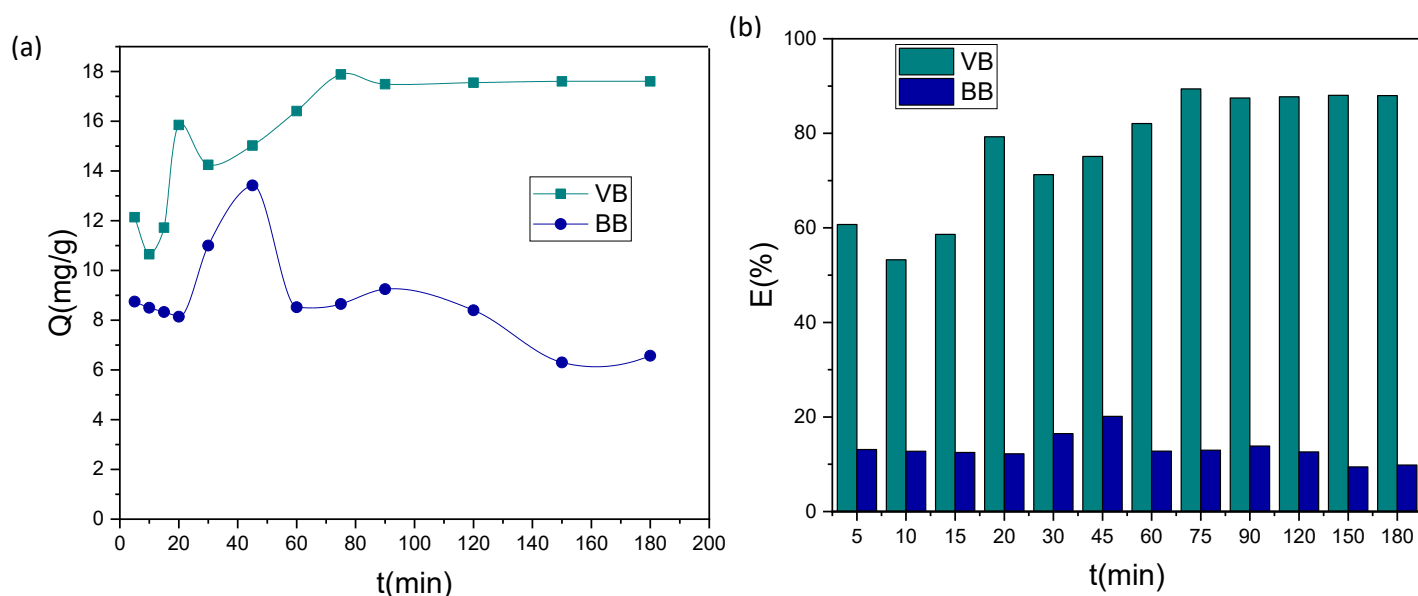


Figure III.10. Effet du temps de contact sur la capacité d'adsorption Q (mg/g) (a) et l'efficacité d'adsorption E (%) (b), $[VB] = 20$ mg/l, $[BB] = 50$ mg/l, $m_{SB(VB)} = 20$ mg, $m_{SB(BB)} = 15$ mg, $V = 20$ ml, $T = T$ ambiante, $\phi = 350$ tr/min.

D'après les résultats de la **figure III.10** la capacité Q (mg/g) (a) et l'efficacité d'élimination E (%) (b) du vert brillant VB augmentent de 12,14 mg/g ($E = 60,72$ %) à 17,88 mg/g ($E = 89,4$ %).

%) quand le temps passe de $t = 5$ min à $t = 75$ min. Ce phénomène peut être expliqué par la disponibilité des sites actifs sur la surface de l'adsorbant.

Dans la même figure, on peut remarquer que le comportement du colorant anionique le Bemacid bleu BB est différent de celui de VB. La capacité et l'efficacité d'adsorption diminuent légèrement dans les premiers temps de 5 min à 8,75 mg/g et 13,11 % de 8,14 mg/g et 12,21 % à $t = 20$ min, on peut l'expliquer par une faible interaction entre le colorant et l'adsorption. Puis, on a observé une augmentation légère à $t = 20$ min de $t = 45$ min à une maximum de 13,42 mg/g et 20,14 %. De $t = 90$ min jusqu'à $t = 180$ min et dans le cas de colorant VB, on a remarqué une stabilité indique que le système atteint de l'équilibre.

Par ailleurs, pour le colorant BB on a remarqué une diminution suivie d'une stabilité dans les temps supérieurs à 45 min à cause d'une diffusion dans les pores du matériau (sciure de bois) ce qui produit une désorption partielle traduit par une diminution dans la capacité et l'efficacité d'adsorption.

En conclusion, le temps optimal dans l'adsorption du colorant VB est 75 min qui correspond à une capacité d'adsorption de 17,88 mg/g ($E = 89,4$ %) et de 45 min avec une capacité d'adsorption de 13,42 mg/g ($E = 20,14$ %) pour le BB.

III.3.4.2. Les modèles cinétiques

Trois modèles sont utilisés pour l'étude cinétique de l'adsorption de VB et de BB sur le bio-adsorbant SB. Ces modèles sont le *pseudo premier* et *pseudo seconde ordre* déjà définis dans le premier chapitre et le modèle de *diffusion intra-articulaire*. L'équation linéaire de chaque modèle est la suivante :

$$\text{Pseudo premier} \quad \ln (q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (\text{III.1})$$

$$\text{Pseudo seconde ordre} \quad \frac{t}{q_t} = \frac{1}{(k_2 \cdot q_e^2)} + \frac{t}{q_e} \quad (\text{III.2})$$

$$\text{Diffusion intra-articulaire} \quad q_t = K \cdot t^{1/2} + C \quad (\text{III.3})$$

Avec

k_1 : la constante de vitesse d'adsorption selon le pseudo premier ordre. Elle est déterminée graphiquement en traçant $\ln (q_e - q_t)$ en fonction du temps t comme le montre la **figure III.11**.

k_2 : la constante de vitesse d'adsorption de pseudo seconde ordre, déterminée graphiquement en traçant t/q_t en fonction du temps t comme le montre la **figure III.12**.

K : constante de vitesse de diffusion dans les pores ($\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{min})$). Elle représente la pente de la courbe q_t en fonction de $t^{1/2}$ (Figure III.13).

C : constante indique l'épaisseur de la couche limite (mg/g). Elle représente l'ordonnée à l'origine de la courbe donnée par figure III.13.

q_t : la quantité de substrat adsorbée au temps t (mg/g).

q_e : la quantité de substrat adsorbée à saturation (mg/g).

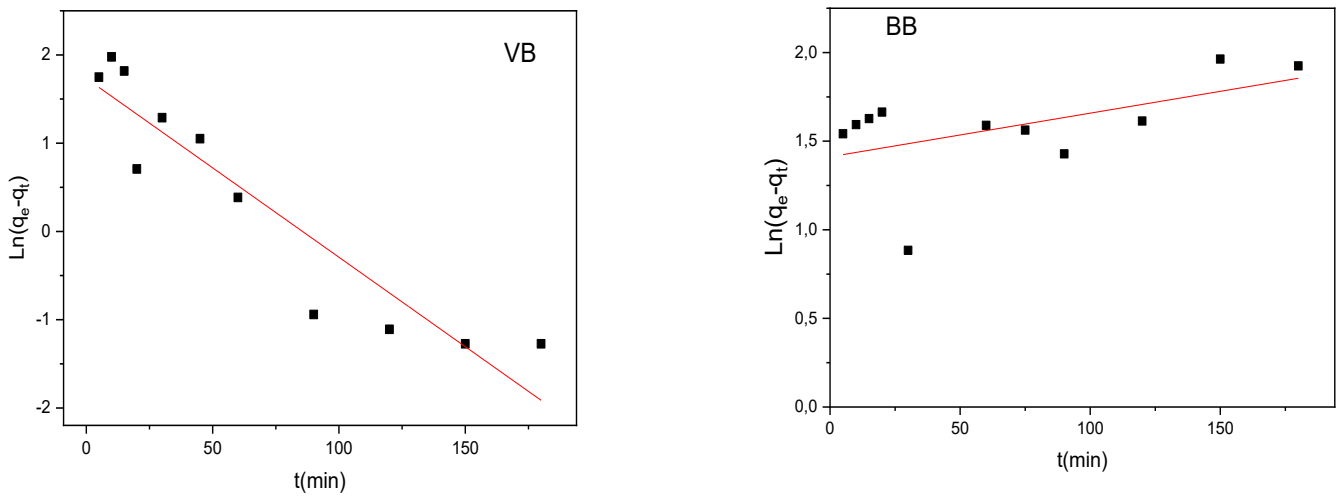


Figure III.11. Modèle pseudo premier ordre de deux colorant VB et BB.

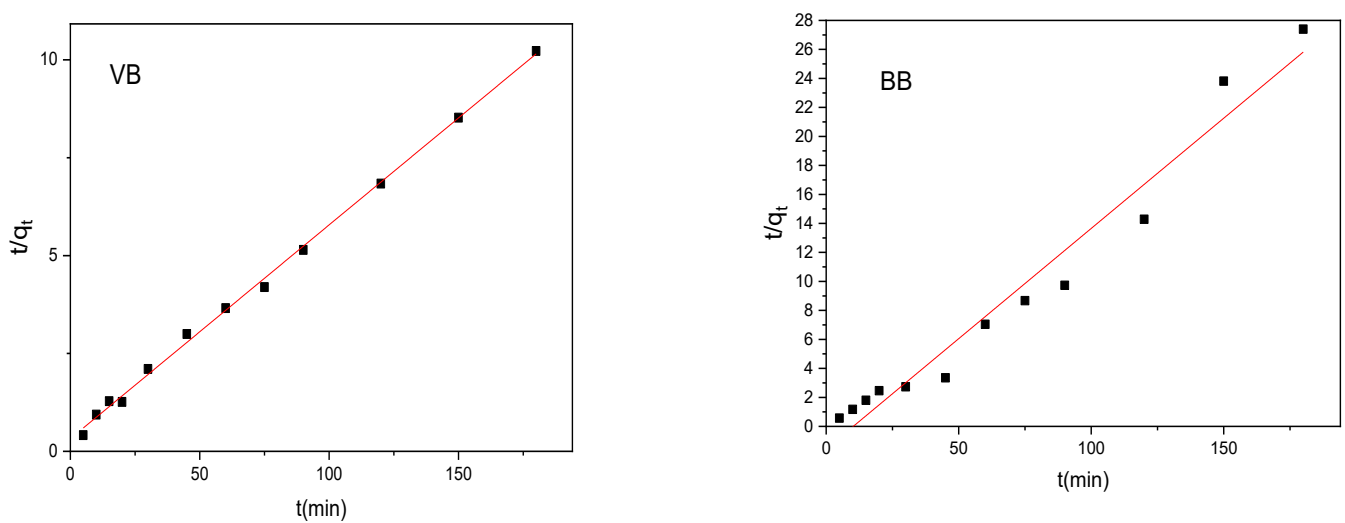


Figure III.12. Modèle pseudo second ordre de VB et BB.

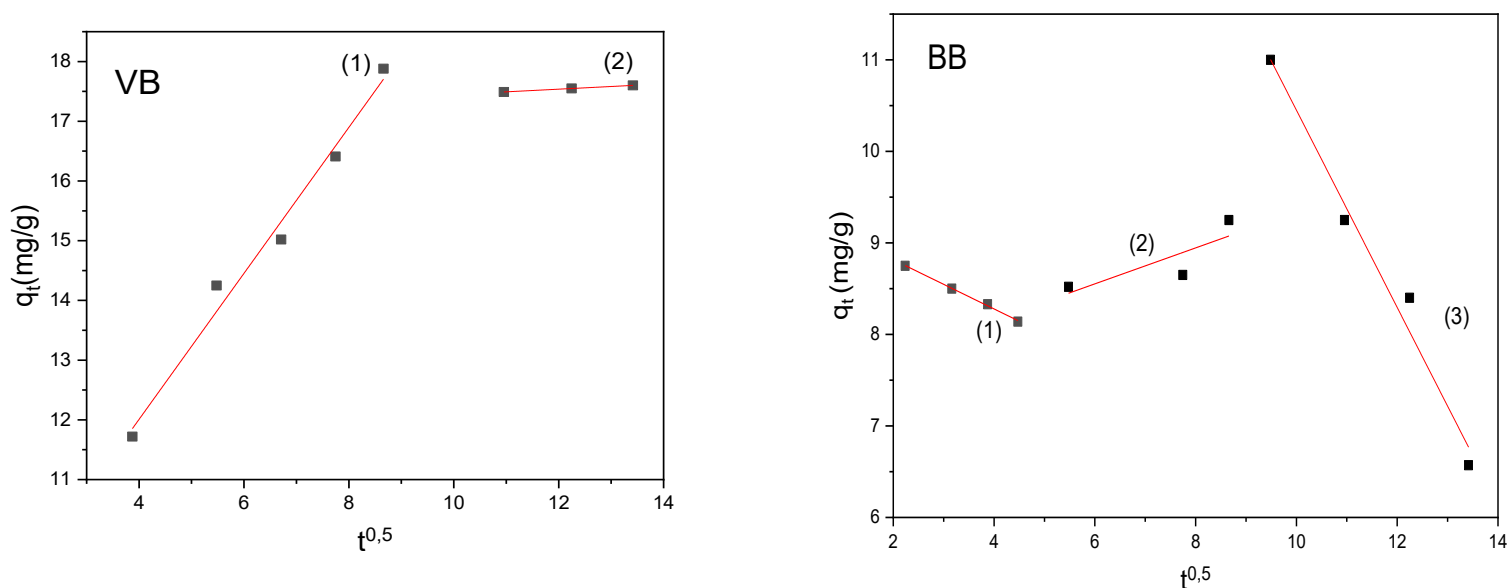


Figure III.13. Modèle de la diffusion intra- particulaire des deux colorants VB et BB.

Les valeurs des constantes de ces modèles sont résumées dans le **Tableau III.3**.

Tableau III.3. Les paramètres cinétiques des deux colorants VB et BB.

Modèles Colorants		Pseudo premier ordre	Pseudo second ordre	Diffusion intra- particulaire
VB	Paramètres	$k_1 \text{ (min}^{-1}\text{)} = 0,0203$	$k_2 \text{ (g/mg.min)} = 0,0092$	$k_1 \text{ (g/mg.min)} = 1,2223$ $k_2 \text{ (g/mg.min)} = 0,0447$
		$q_e \text{ (thé)} \text{ (mg/g)} = 5,66$	$q_e \text{ (thé)} \text{ (mg/g)} = 18,31$	$C_1 \text{ (mg/g)} = 7,1197$ $C_2 \text{ (mg/g)} = 17,0009$
		$q_e \text{ (exp)} \text{ (mg/g)} = 17,88$	$q_e \text{ (exp)} \text{ (mg/g)} = 17,88$	$R^2(1) = 0,9833$
		$R^2 = 0,8756$	$R^2 = 0,9980$	$R^2(2) = 0,9994$
BB	Paramètres	$k_1 \text{ (min}^{-1}\text{)} = 0,0023$	$k_2 \text{ (g/mg.min)} = - 0,0149$	$k_1 \text{ (g/mg.min)} = - 0,2689$ $k_2 \text{ (g/mg.min)} = 0,1966$ $k_3 \text{ (g/mg.min)} = - 1,0779$
		$q_e \text{ (thé)} \text{ (mg/g)} = 4,10$	$q_e \text{ (thé)} \text{ (mg/g)} = 6,57$	$C_1 \text{ (mg/g)} = 9,3539$ $C_2 \text{ (mg/g)} = 7,3730$ $C_3 \text{ (mg/g)} = 21,2295$
		$q_e \text{ (exp)} \text{ (mg/g)} = 13,42$	$q_e \text{ (exp)} \text{ (mg/g)} = 13,42$	$R^2(1) = 0,9977$
		$R^2 = 0,2813$	$R^2 = 0,9644$	$R^2(2) = 0,6841$
				$R^2(3) = 0,9796$

Les résultats présentés dans le **tableau III.3** indiquent que le modèle de pseudo second ordre décrit mieux la cinétique d'adsorption pour les deux colorants avec un coefficient de corrélation $R^2(\text{VB}) = 0,9980$ et $R^2(\text{BB}) = 0,9644$ et une capacité d'adsorption théorique plus proche de la valeur expérimentale.

Le modèle de la diffusion intra-particulaire représenté dans la **figure III.13** montre que le processus d'adsorption pour les deux colorants s'effectue en plusieurs étapes du déplacement de l'adsorbat de la phase liquide vers la phase solide (surface de l'adsorbant). En premier lieu, l'adsorbat se diffuse de la phase liquide jusqu'à proximité de l'adsorbant, la deuxième étape est la diffusion de l'adsorbat vers la couche limite de la surface de l'adsorbant puis à travers les sites actifs correspondant à la diffusion intra-particulaire et finalement la fixation de l'adsorbat sur la surface de l'adsorbant [56,57].

Pour le vert brillant l'adsorption se fait en deux étapes. La première est très rapide à une constante de vitesse égale à $k_1 = 1,2223 \text{ g/mg.min}$ correspond à la diffusion externe (film liquide), la deuxième étape est lente et quasi constante contrôlée par la diffusion intra-particulaire à une $k_2 = 0,0447 \text{ g/mg.min}$, tandis que l'épaisseur de la couche limite augmente de C_1 égal à 7,1974 à $C_2 = 17,0009$ avec un bon coefficient de corrélation $R^2 = 0,9994$, peut l'expliquée par l'effet très dominant de l'épaisseur de la couche limite et le système atteint l'équilibre.

En revanche, pour le bleu de bemacid les trois segments linéaires confirment que le processus d'adsorption se fait par un mécanisme complexe, une diffusion interne suivie d'une étape intermédiaire à un faible coefficient de corrélation $R^2 = 0,6841$ et finalement l'étape d'équilibre avec un C le plus élevé est égal à 21,2295 mg/g.

Dans l'ensemble, les valeurs de C qui sont différentes de 0 (la courbe ne passe pas par l'origine) montrent que l'étape de la diffusion intra-particulaire n'est pas l'unique étape limitante dans le processus d'adsorption de deux colorants, la diffusion externe et l'effet de l'épaisseur de la couche limite est remarquable d'après les résultats de **tableau III.3**.

III.3.5. Effet de la concentration de colorant et isothermes d'adsorption

III.3.5.1. Effet de la concentration initiale de colorant

L'impact de la concentration initiale C_0 (mg/L) de deux colorant le vert brillant (VB) et le bleu de bemacid (BB) sur le bio-adsorbant la sciure de bois (SB) a été réalisée à une gamme de

concentration de 5 mg/L à 200 mg/L. Les résultats de cette étude sont présentés dans la **figure III.14**.

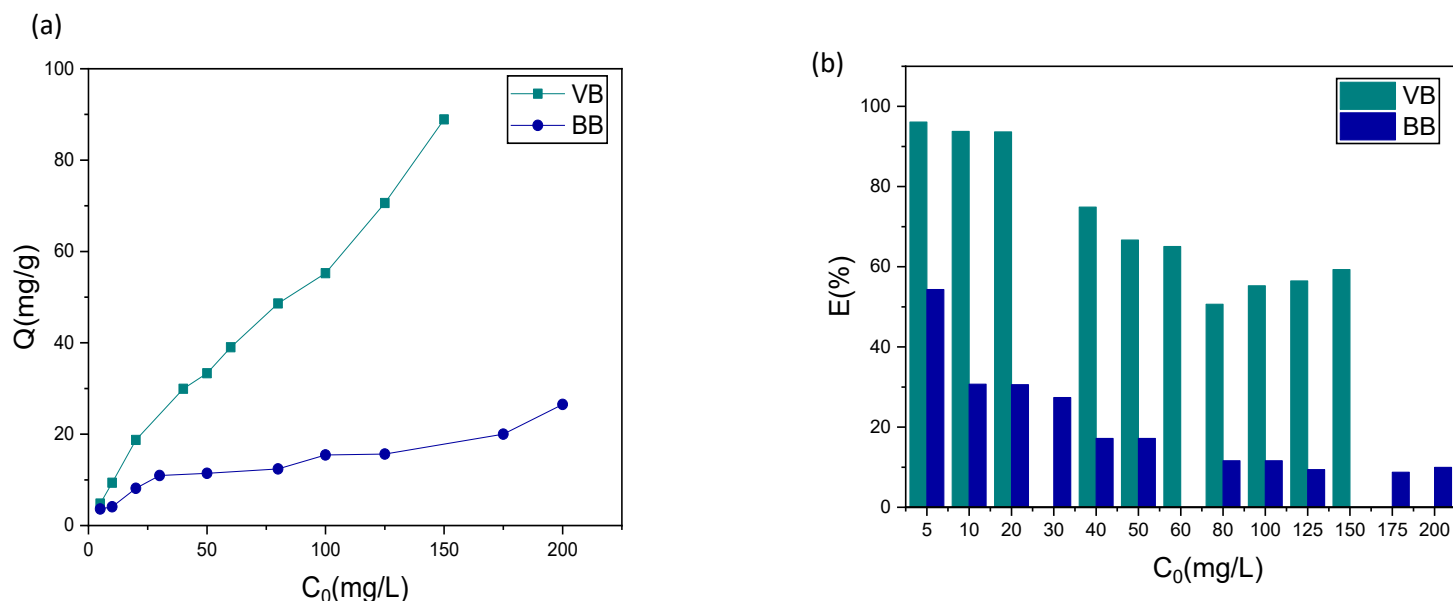


Figure III.14. Effet de la concentration initiale de deux colorants VB et BB sur la capacité d'adsorption Q (mg/g) (a) et l'efficacité E (%) (b), m_{SB-VB} = 20 mg, m_{SB-BB} = 15 mg, V = 20ml, pH_{VB} = 6, pH_{BB} = 3, $t=t_{eq}$, T = T ambiante, ϕ = 350 tr/min.

Selon les résultats de la **figure III.14** on observe que la concentration initiale de colorant augmente la capacité d'adsorption pour les deux colorants de 4,81 mg/g (C_0 = 5 mg/L) à 88,92 mg/g à la concentration la plus élevée C_0 = 150 mg/L pour le VB et de 3,62 mg/g (C_0 = 5 mg/L) jusqu'à 26,5 mg/g à C_0 = 200 mg/L pour le BB. Par ailleurs, l'efficacité d'adsorption diminue avec l'augmentation de la concentration initiale en colorant de 96,08 % (C_0 = 5 mg/L) à 59,28 % (C_0 = 150 mg/L) pour le VB et de 54,33 % à 9,94 % pour C_0 = 200 mg/L.

La variation de l'efficacité d'élimination et la capacité d'adsorption peut être expliquée par l'effet inhibiteur des fortes concentrations de colorant sur l'efficacité d'élimination des contaminants, en raison de la saturation des sites actifs du matériau (sciure de bois) ou par le renforcement de la force motrice nécessaire au transfert de masse (le déplacement des molécules est important). A l'inverse, avec les concentrations initiales les plus faibles en polluant (colorant), la disponibilité des sites actifs est grande ce qui favorise une adsorption plus rapide jusqu'à atteindre de l'équilibre.

Globalement, à une charge plus grande en colorant la résistance au transfert de masse entre la solution de colorant et la surface de l'adsorbant est important [58].

Les capacités maximales achevées dans cette étude sont importantes que plusieurs valeurs rapportées dans la littérature. Le **tableau III.4** représente une comparaison avec plusieurs adsorbants utilisés pour l'élimination de vert brillant et de bleu de bemacid.

Tableau III.4. Comparaison des performances de bio-adsorbant sciure de bois pour l'élimination des colorants VB et BB avec certains adsorbants.

Colorants	Adsorbant	pH	$q_{\max}$ (mg/g)	Références
VB	Coques de fèves	/	21,73	[55]
	Écorces de pastèque	8	25	[59]
	Bagasse de canne à sucre	6,1	26,32	[60]
	Bambou Tulda	7	32,25	[61]
	Écorces de pastèque	7	92,6	[62]
	Poudre de thé usagée	6	101,01	[63]
	Sciure de bois	6	88,92	Cette étude
BB	Déchets agroalimentaires (noyaux de fruits)	/	9,12	[64]
	Bentonite magnétique	2,5	17,08	[17]
	Atriplex Halimus	6,45	29,7	[18]
	Charbon activé	/	34,2	[64]
	Sciure de bois	3	26,5	Cette étude

III.3.5.2. Les isothermes de l'adsorption

Afin d'étudier le type de l'isotherme d'adsorption, on a tracé la capacité d'adsorption (q_e (mg/g)) à l'équilibre en fonction de la concentration à l'équilibre (C_e (mg/L)) pour les deux colorants. Les résultats sont présentés dans la **figure III.15**.

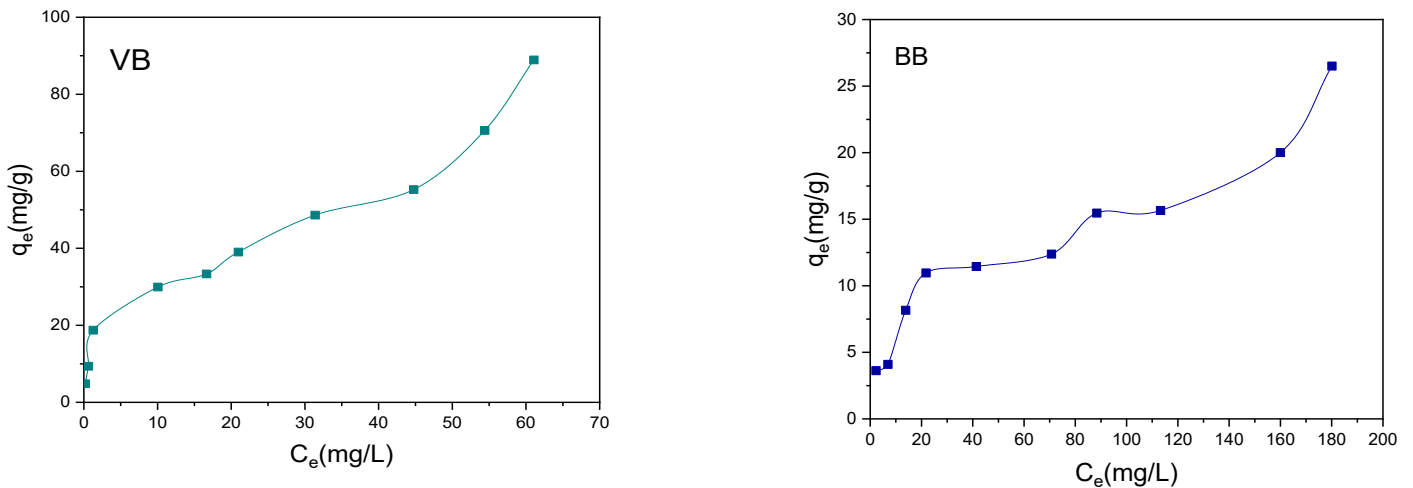


Figure III.15. La variation de q_e en fonction de C_e pour les deux colorant VB et BB.

Les deux courbes présentées dans la **figure III.15** se sont des courbes caractéristiques d'une isotherme de type II selon classification d'IUPAC et une type S selon la classification de gilles indique que le matériau est macroporeux. Pour le mieux comprendre le mécanisme d'interaction entre l'adsorbat et la surface de l'adsorbant, on a établi une modélisation des isothermes d'adsorption par les modèles de **Langmuir** et **Freundlich**. Ces modèles ont les équations mathématiques suivantes :

Equation de Langmuir
$$\frac{1}{q_e} = \left(\frac{1}{q_m \cdot k_L} \right) \left(\frac{1}{C_e} \right) + \frac{1}{q_m} \quad (\text{III.4})$$

Equation de Freundlich
$$\text{Log } q_e = \text{log } (k_f) + \left(\frac{1}{n} \right) \text{log } C_e \quad (\text{III.5})$$

Avec

q_e : quantité d'équilibre de soluté adsorbée par unité de masse d'adsorbant (mg/g).

C_e : la concentration à l'équilibre du soluté (mg/L).

K_L : constante de Langmuir liée à l'énergie et l'affinité des sites l'adsorption (L/mg).

q_m : la capacité maximale d'adsorption (mg/g).

Les constants ont été calculée en traçant la droite $1/q_e$ en fonction de $1/C_e$. Les résultats sont présentés dans la **figure III.15**.

K_f : la constante de l'isotherme de Freundlich, et n est l'intensité de l'adsorption. Les constantes de ce modèle ont été calculées en traçant $\text{Log}(q_e)$ en fonction de $\text{Log } (C_e)$. Les résultats sont présentés dans la **figure III.16**.

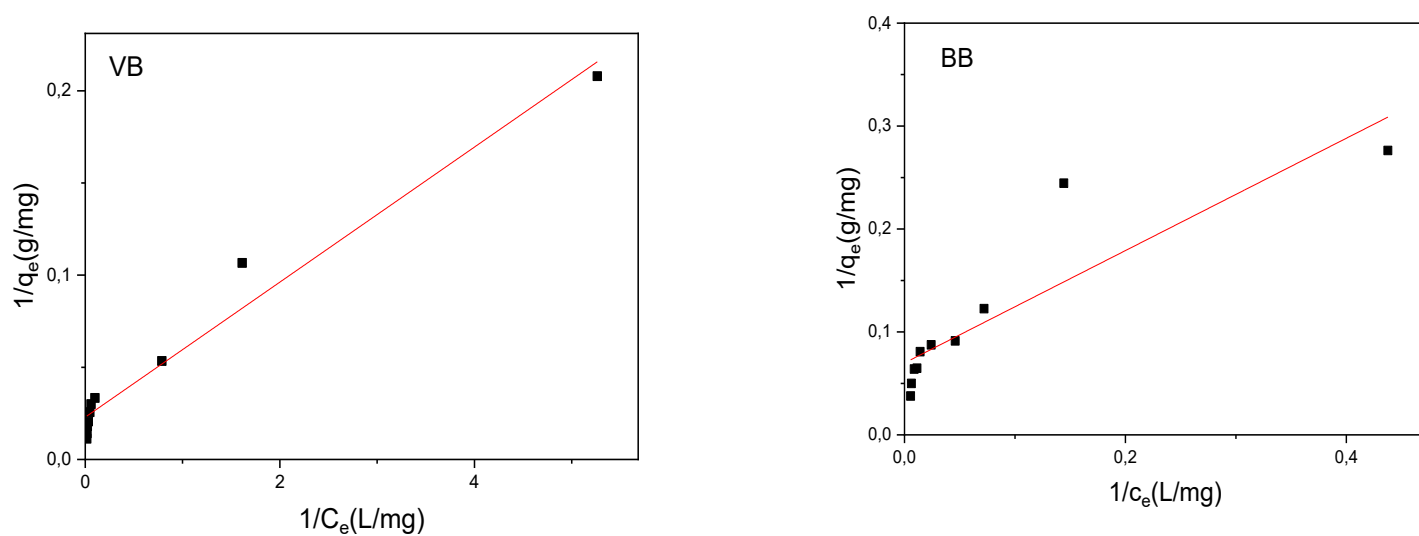


Figure III.15. L'isotherme de Langmuir de deux colorants VB et BB.

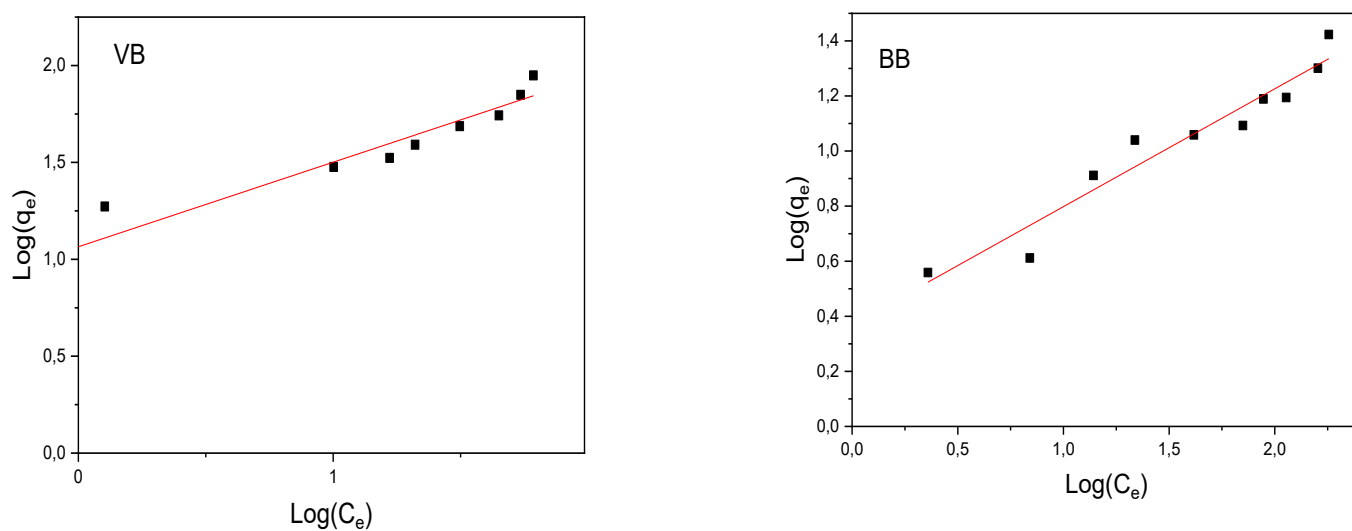


Figure III.16. L'isotherme de Freundlich de deux colorants VB et BB.

Les résultats et les valeurs des constantes de ces deux modèles sont présentés dans le **tableau III.5**.

Tableau III.5. Les paramètres des isothermes d'adsorption.

Isothermes Colorants	Langmuir	Freundlich
VB	$k_L \text{ (L/mg)} = 0,6263$	$k_f \text{ (L/mg)} = 11,6081$
	$q_m \text{ (théo)} \text{ (mg/g)} = 43,59$	$n = 2,2922$
	$q_m \text{ (exp)} \text{ (mg/g)} = 88,92$	
	$R^2 = 0,9699$	$R^2 = 0,9616$
	$R_L = 0,0739$	
BB	$k_L \text{ (L/mg)} = 0,1280$	$k_f \text{ (L/mg)} = 2,3451$
	$q_m \text{ (théo)} \text{ (mg/g)} = 14,31$	$n = 2,3366$
	$q_m \text{ (exp)} \text{ (mg/g)} = 26,5$	
	$R^2 = 0,7936$	$R^2 = 0,9378$
	$R_L = 0,1350$	

Les valeurs du coefficient de corrélation R^2 des deux modèles Langmuir et Freundlich pour le colorant le vert brillant (VB) sont très proche. De plus, les résultats de $q_{\max}$ théorique et expérimentale ne sont pas cohérent dans le modèle de Langmuir. Ce qui indique qu'il existe des zones homogènes et suit le modèle de Langmuir (adsorption en monocouche) et autre hétérogène et suit le modèle de Freundlich (adsorption en multicouche).

Afin d'évaluer la favorabilité du processus d'adsorption le facteur de séparation R_L a été déterminé selon l'équation suivante [65] :

$$R_L = \frac{1}{1 + k_L \cdot C_0} \quad \text{(III.6)}$$

Où : K_L : constante de Langmuir liée à l'énergie et l'affinité des sites l'adsorption (L/mg).

C_0 : la concentration initiale en colorant mg/L.

La valeur de R_L est égale à 0,0739 qui est comprise entre 0 et 1 ce qui confirme que l'adsorption de colorant le vert brillant sur le bio-adsorbant sciure de bois est favorable dans les conditions expérimentales étudiées.

En revanche, pour le colorant le bleu de bemacid, l'isotherme de Freundlich est le mieux adaptée avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,9378$. Ce modèle est caractérisé par une

adsorption sur une surface hétérogène (multicouche) [66]. Une intensité d'adsorption égale à 2,3366 une valeur supérieure à 1 qui confirme que l'adsorption de bleu de bemaacid sur la sciure de bois est favorable dans les conditions expérimentales étudiées.

III.3.6. Effet de la température et paramètres thermodynamiques

III.3.6. 1. Effet de la température

Afin d'évaluer l'influence de la température sur le processus de l'adsorption des colorants à la surface de la bio-adsorbant sciure de bois. L'expérience a été réalisée à une gamme de température de 20 à 60 °C. Les résultats sont présentés dans la **figure III.17**.

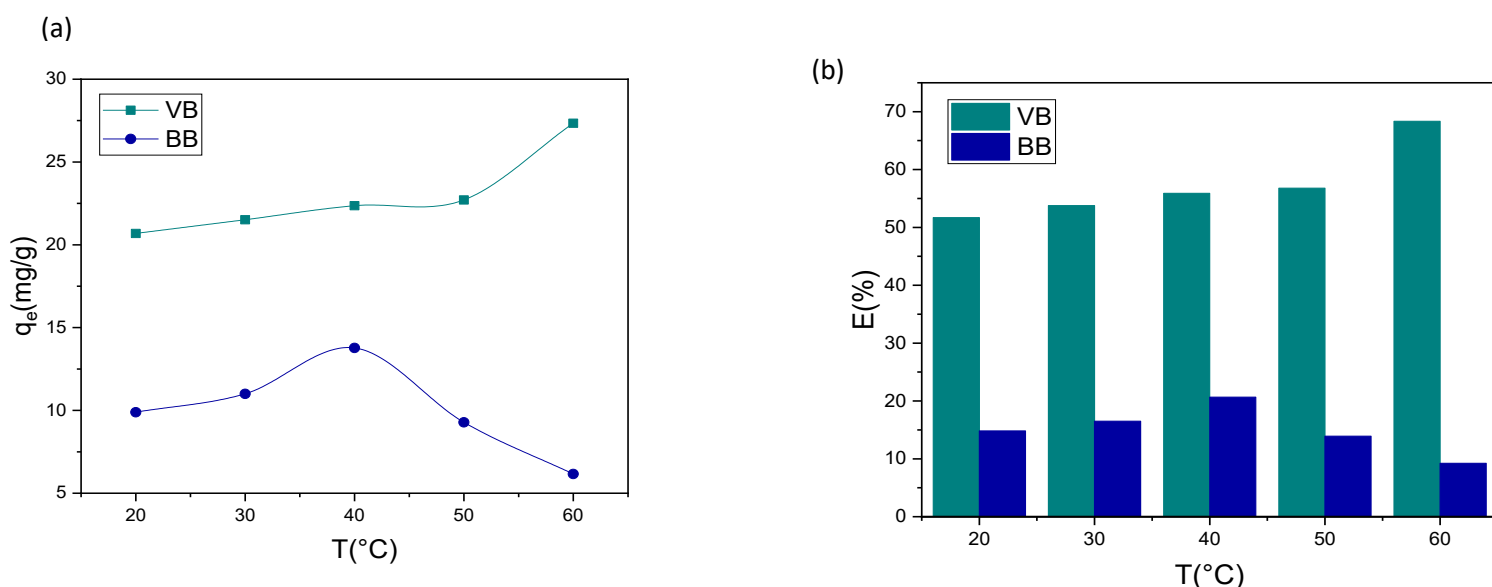


Figure III.17. Effet de la température sur la capacité d'adsorption Q (mg/g) (a) et l'efficacité d'adsorption E (%) (b) des deux colorants VB et BB, $[VB]_0 = 40$ mg/L, $[BB]_0 = 50$ mg/L $m_{SB-VB} = 20$ mg, $m_{SB-BB} = 15$ mg, $V = 20$ ml, $pH_{VB} = 6$, $pH_{BB} = 3$, $t = t_{eq}$, $\phi = 350$ tr/min.

Comme illustre la **figure III.17**, on observe que la capacité d'adsorption Q et l'efficacité d'adsorption E augmentent de 20,68 mg/g et 51,69 % à 27,34 mg/g et 68,34 % en augmentant la température de 20 °C à 60 °C pour le colorant le vert brillant (VB). Cette augmentation est liée à l'accélération de la mobilité des molécules de colorant et à la disponibilité de nombreux sites actifs pour l'adsorption, ce qui confirme la nature endothermique de l'interaction entre le vert brillant et l'adsorbant sciure de bois [67].

Concernant le bleu de bemacid, on remarque dans l'intervalle de 20°C à 40°C, une légère augmentation de la capacité d'adsorption et l'efficacité d'adsorption de 9,89 mg/g et 14,83 % à 13,77 mg/g et 20,65 % liée à un processus endothermique. D'autre part, lorsque la température augmente de 40 à 60 °C, la capacité et l'efficacité d'adsorption diminue jusqu'à 6,16 mg/g et 9,23 %. Ce phénomène peut être expliqué par une désorption partielle des molécules de colorant produite lors l'augmentation de la température ou les interactions entre l'adsorbat (bleu de bemacid) et l'adsorbant (sciure de bois) devient plus faible. Un phénomène similaire est observé dans la littérature avec un bio-adsorbant à base de la sciure de bois [65].

III.3.6.2. Les paramètres thermodynamiques

Les paramètres thermodynamiques tels que l'enthalpie (ΔH° (KJ/mol)), l'enthalpie libre (ΔG° (J/mol)) et l'entropie (ΔS° (J/mol. K)) ont été déterminés à partir de l'équation de *Van't Hoff* en traçant la droite $\text{Ln}K_d$ en fonction de $1/T$ [55].

$$\text{Equation de Van't Hoff} \quad \text{Ln}K_d = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad (\text{III.7})$$

Où : K_d (L/g) : le coefficient de partage calculer par $K_d = q_e/C_e$, q_e : la quantité d'adsorbat dans l'adsorbant à l'équilibre (mg/g), C_e : la concentration à l'équilibre (mg/L), R : la constante des gaz parfaits ($R = 8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$), T : la température absolue de la solution (K). ΔH° et ΔS° sont déterminés par la pente et l'ordonnée à l'origine de la droite obtenue ainsi que l'enthalpie libre ΔG° est déterminée par l'équation suivante :

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (\text{III.8})$$

Les résultats obtenus sont présentés dans la **figure III.18**.

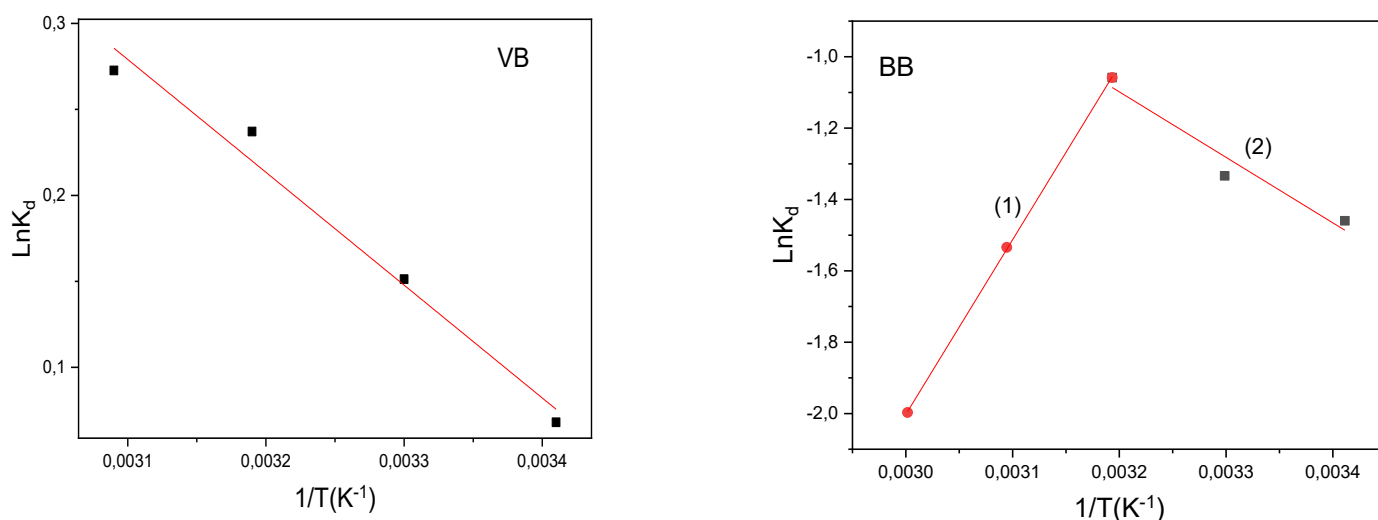


Figure III.18. La variation de $\ln K_d$ en fonction de $1/T$ de deux colorants VB et BB.

Les résultats des paramètres thermodynamiques sont présentés dans le **tableau III.6**.

Tableau III.6. Paramètres thermodynamiques des deux colorants VB et BB.

Colorants	T(K)	ΔH° (KJ/mol)	ΔS° (J/mol. K)	ΔG° (J/mol)	R ²
VB	293,15	5,4554	19,2321	-182,4901	0,9789
	303,15			-374,8111	
	313,15			-567,1321	
	323,15			-759,4531	
BB	293,15	5,7645	39,71	-5876,4865	0,9477
	303,15			-6273,5865	
	313,15			-6670,6865	
	323,15	-15,3745	-138,7729	29469,9303	0,9999
	333,15			30857,6583	

La valeur positive de l'enthalpie (ΔH°) dans le processus d'adsorption de colorant le vert brillant confirme la nature endothermique. La valeur positive de l'entropie (ΔS°) peut être expliquée par l'augmentation du désordre du système. De plus, les valeurs négatives de l'enthalpie libre (ΔG°) démontrent la spontanéité du processus d'adsorption dans toute la gamme de températures étudiée.

En revanche, pour le colorant le bleu de bemacid à des températures plus élevée l'enthalpie (ΔH°) et l'entropie (ΔS°) ont une valeur négative indique une nature exothermique avec une diminution du désordre du système. De plus, les valeurs de l'enthalpie libre (ΔG°) confirment que l'adsorption est spontanée à des faibles températures.

Les faibles valeurs de l'enthalpie (ΔH°) indiquent que l'adsorption des deux colorants est principalement de type physisorption que chimisorption a cause de faible interaction entre le colorant et la surface de l'adsorbant (sciure de bois).

III.4. Régénération du bio-adsorbant

Afin d'évaluer la réutilisabilité et la stabilité structurale du bio-adsorbant sciure de bois (SB), plusieurs cycles d'adsorption – désorption ont été réalisés en utilisant un mélange éthanol/eau comme agent pour la désorption. Les résultats sont présentés dans la **figure III.19**. L'efficacité du cycle a été calculée par l'équation suivant :

$$\text{Efficacité de cycle (\%)} = \frac{\text{Efficacité d'adsorption de cycle (n)}}{\text{Efficacité d'adsorption du cycle 1}} \cdot 100 \quad (\text{III.9})$$

Où : n : nombre de cycle effectuée.

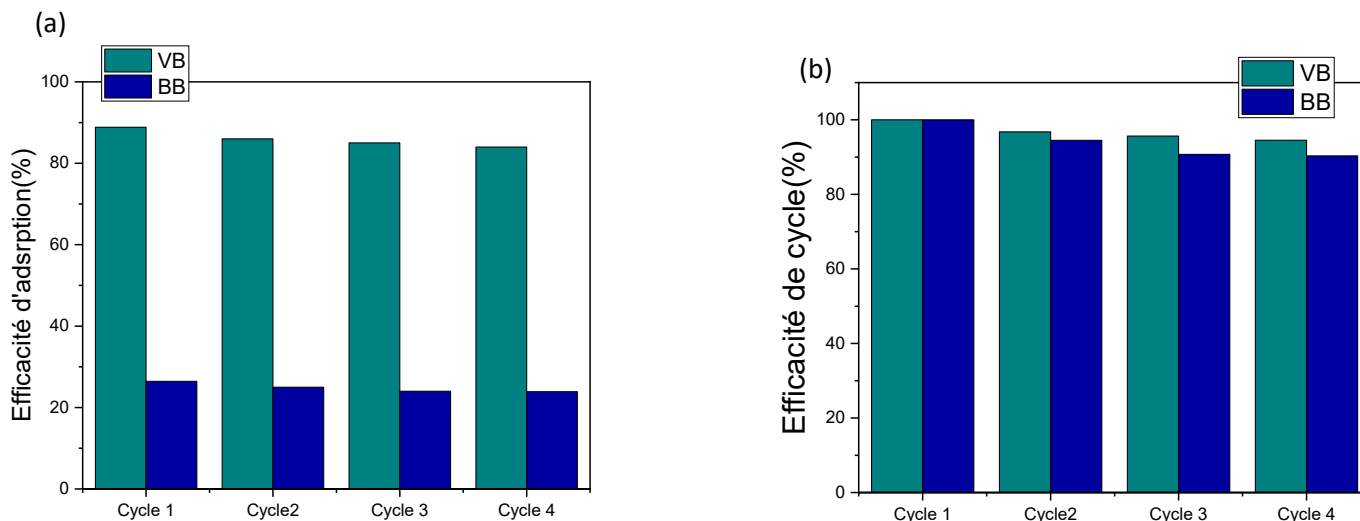


Figure III.19. La variation de l'efficacité d'adsorption (a) et l'efficacité de cycle (b) en fonction de nombre de cycle de régénération du bio-adsorbant SB pour les colorants VB et BB.

L'efficacité d'adsorption reste pratiquement constante après plusieurs cycles d'adsorption-désorption à l'aide d'un mélange éthanol/eau, cela indique que la désorption a été complète et

toutes les molécules de colorant sont déplacées de la phase solide vers la phase liquide (mélange éthanol/eau) qui est observé par la coloration de la phase liquide en raison de la solubilisation de colorant et par la diminution de l'interaction entre l'adsorbat (colorant) et l'adsorbant (sciure de bois), sans provoquer des modifications significatives de la surface de l'adsorbant.

III.5. Mécanisme d'adsorption

Les résultats déjà obtenus à partir des isothermes et des valeurs de l'enthalpie d'adsorption ΔH ainsi que la capacité de régénération de l'adsorbant, nous laissent confirmer que l'adsorption des deux colorants est principalement de type physisorption. Pour renforcer cette conclusion, nous représentons dans la **figure III.20** le spectre FTIR de l'adsorbant après rétention de VB (SB-VB) et après rétention de BB (SB-BB).

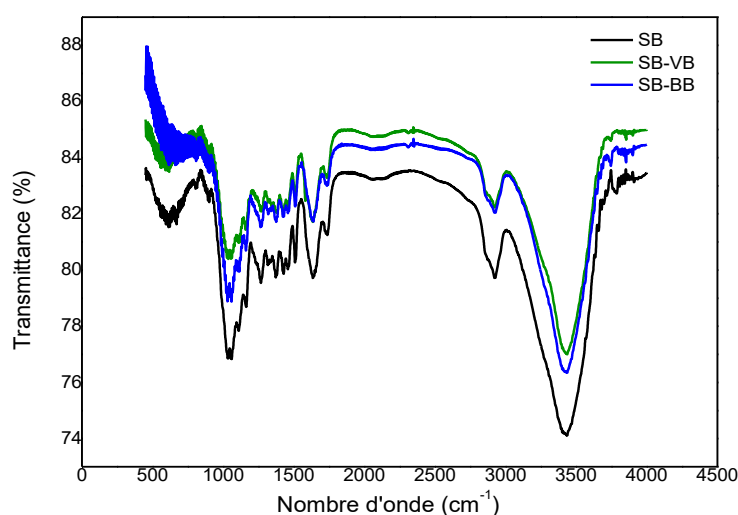


Figure III.20. Spectre FTIR de l'adsorbant après rétention de VB et de BB.

A partir de la **figure III.20** on observe une faible diminution dans l'intensité des bandes caractéristiques de l'adsorbant sciure de bois après rétention sans déplacement significatif de la position des bandes et sans apparition de nouvelles bandes ce qui confirme que l'adsorption des deux colorants sur la surface de sciure de bois (SB) est principalement de type physique et réversible. Dans ce cas-là les liaisons formées sont généralement des liaisons faibles tel que les liaisons hydrogènes, liaisons électrostatiques et les liaisons de types π - π . Des profils FTIR avant et après adsorption similaire ont été obtenus dans la littérature [61,68].

L'adsorption des deux colorants le vert brillant (cationique) et le bleu de bémacid (anionique) sur la surface de l'adsorbant sciure de bois dépend principalement du pH du milieu et de la nature des groupes fonctionnels hydroxyle (OH), carboxyle (COOH) dans la structure de cellulose et hémicellulose et phénolique correspond au cycle aromatique de lignine qui jouent le rôle des sites actifs d'adsorption. L'adsorption du vert brillant est beaucoup plus favorisée à des pH supérieurs au pH du point de charge nulle, dans lesquels la surface de la sciure de bois devient négative, ce qui entraîne une attraction électrostatique entre les ions positifs du colorant et la surface de l'adsorbant. Des liaisons hydrogènes peuvent se présenter entre les groupes hydroxyles de SB et l'atome d'azote du colorant. De plus, des interactions de type π - π entre les cycles aromatiques de colorant et les groupes phénoliques sur la surface de l'adsorbant font aussi partie des liaisons entre adsorbant et adsorbat.

En revanche, l'adsorption de colorant anionique le bleu de bémacid se fait en milieu acide ($\text{pH} < \text{pH}_{\text{PCN}}$) où la surface de l'adsorbant sciure de bois devient positive ce qui favorise des interactions électrostatiques avec les ions négatifs du colorant, aussi des liaisons hydrogène entre l'atome d'oxygène de colorant et le groupe hydroxyle sur la surface de l'adsorbant et même des liaisons de type π - π avec les groupes phénoliques à la surface de l'adsorbant font aussi partie du mécanisme d'adsorption.

Conclusion générale

Conclusion générale

Afin d'évaluer les performances d'un bio- adsorbant dans le traitement des effluents aqueux. Cette étude a été porté sur l'élimination d'un colorant cationique "le vert brillant" et un autre anionique "bleu de bemacid" à l'aide d'un bio-adsorbant peu coûteux de nature lignocellulosique "sciure de bois".

Les résultats obtenus au cours des expériences sont les suivants :

- L'analyse par FTIR indique la présence de plusieurs groupements fonctionnelles qui favorises l'adsorption sur sciure de bois.
- Le point du charge PCN nulle du bio – adsorbant a été déterminé à 6,9.
- L'étude de la granulométrie montre que à une taille des particules qui est $< 0,2$ mm donne les meilleurs rendements accompagnés à des bonnes capacités d'adsorption pour les deux colorants.
- Les résultats de l'effet de masse de l'adsorbant sciure de bois (SB) ont révélé qu'une masse égale à 20 mg pour le colorant le vert brillant (VB) et une masse de 15 mg pour le bleu de bemacid sont des masses optimales qui donnent des meilleurs résultats en capacité et efficacité d'adsorption.
- L'effet du pH indique que l'adsorption de colorant cationique VB est favorisée à pH supérieur à pH_{PCN} avec une très bonne capacité de rétention à pH naturel du colorant qui est égal à 6. Par contre, l'adsorption de BB (colorant anionique) est favorisée en milieu acide ($pH < pH_{PCN}$) avec un pH optimal égale à 2 et une bonne capacité de rétention à $pH=3$.
- L'étude cinétique montre que l'équilibre est atteint après $t = 75$ min pour le VB et $t = 45$ min pour le BB. De plus, le modèle cinétique de pseudo seconde est le mieux adaptée pour les deux colorants en comparant avec le pseudo premier ordre. Le modèle de la diffusion intra-particulaire indique que l'étape de la diffusion intra- particulaire n'est pas l'unique étape limitante dans le processus d'adsorption des deux colorants.
- L'évaluation de la capacité d'adsorption en fonction de la concentration initiale en colorant a montré que l'augmentation de la concentration initiale augmente la capacité d'adsorption jusqu'à atteindre 88,92 mg/g pour le VB et 26,5 mg/g pour le BB.
- La modélisation des isothermes d'adsorption par les modèles Langmuir et Freundlich indique que le colorant VB suit les deux modèles en même temps, en raison des coefficients de corrélation R^2 qui sont très proche, dans ce cas-là, il s'est formé des zones

homogènes (adsorption en monocouche) et autres hétérogènes (adsorption en multicouche). Tandis que, pour le BB l'isotherme de Freundlich donne un bon coefficient de corrélation qui met en évidence que l'adsorption se fait en multicouche.

- L'étude thermodynamique a démontré la nature endothermique ($\Delta H > 0$) et que le processus d'adsorption est spontané pour le VB. Par ailleurs, pour le bleu de bémacide l'influence de la température est remarquable à partir de $T = 40^{\circ}\text{C}$ et le processus d'adsorption est non spontané à des températures élevées avec un $\Delta H < 0$ qui représente la nature exothermique du système.
- L'étude de la désorption a montré que le mélange éthanol/ eau est le meilleur agent de désorption avec une capacité d'adsorption qui reste stable même après 4 cycles de régénération.

Finalement, sciure de bois est un bio-adsorbant réutilisable et efficace qu'on peut l'utiliser pour l'élimination des colorants spécialement les colorants cationiques. Ce travail ouvre la voie à l'utilisation de ce matériau en l'élimination de divers contaminants de l'eau, avec une possibilité d'une modification au niveau de sa structure afin d'améliorer son efficacité et capacité d'adsorption.

Références bibliographiques

- [1] Kordbacheh F, Heidari G, **(2023)**, Water Pollutants and Approaches for their Removal, Materials Chemistry Horizons, 2(2), 139-153.
- [2] Hosny N M, Gomaa I, Elmahgary MG, **(2023)**, Adsorption of polluted dyes from water by transition metal oxides: A review, Applied Surface Science Advances, 15 (12), 100395.
- [3] Alsukaibi A K, **(2022)**, Various approaches for the detoxification of toxic dyes in wastewater. Processes, 10(10), 1968.
- [4] Ruan W, Hu J, Qi J, Hou Y, Zhou C, Wei X, **(2019)**, Removal of dyes from wastewater by nanomaterials: A review, Advanced Materials Letters, 10 (1), 09-20.
- [5] Mehra S, Singh M, Chadha P, **(2021)**, Adverse Impact of Textile Dyes on the Aquatic Environment as well as on Human Beings, Toxicology International, 28 (2), 165-176.
- [6] Bendjelloula M, Zenatia R, Benhachem F Z, Elandaloussi E H, **(2023)**, Utility of Crosslinking a Lignocellulosic Waste Polymer for Fast and Efficient Adsorption of Bimacid Red ETL dye, Algerian Journal of Research and Technology, 7(2), 34-42.
- [7] Jain A, Wadhawan S, Sharma M, Mehta P, Mehta S K, **(2026)**, A review on adsorptive removal of dye pollutants from wastewater using nanoadsorbents, Particuology, 111, 70-90.
- [8] S Benkhaya, S Mrabet, El Harfi A, **(2020)**, A Review on Classifications, Recent Synthesis and Applications of Textile Dyes, Inorganic Chemistry Communications, 115, 107891.
- [9] Benkhaya S, El Harfi S, El Harfi A, **(2017)**, Classifications, properties and applications of textile dyes: A review, Journal of Environmental Engineering and Science, 3(3), 311-320.
- [10] Mustroph H, **(2022)**, Bring back order in the polymethine dye medley: Classification, structure and spectra, Dyes and Pigments, 208, 110783.
- [11] Azzopardi E A, Owens S E, Murison M, Rees D, Sawhney M A, Francis L W, Teixeira R S R, Clement M, Conlan R S, Whitaker I S, **(2017)**, Chromophores in operative surgery: Current practice and rationalized development, Journal of Controlled Release, 249, 123-130.
- [12] Kiernan J A, **(2001)**, Classification and naming of dyes, stains and fluorochromes, Biotechnic & Histochemistry, 76(5&6), 261-277.
- [13] Ismail G A, Sakai H, **(2022)**, Review on Effect of Different Type of Dyes on Advanced Oxidation Processes (AOPs) for Textile Color Removal, Chemosphere, 291, 132906.
- [14] Yadav C K, Basnet N, **(2023)**, Dyes and Their Importance: A Review, Damak Campus Journal, 11(1), 102-110.

- [15] Fouda A A, Abdallah A B, Awad F S, **(2026)**, Green air-assisted LLME using a novel hydrophobic deep eutectic solvent for the extraction and quantification of Brilliant Green and Rhodamine B in food matrices, *Food Chemistry*, 509,148465.
- [16] Singh S, Gupta H, Dhiman S, Sahu N K, **(2022)**, Decontamination of cationic dye brilliant green from the aqueous media, *Applied Water Science*, 12(4),61.
- [17] Necer I L, Oukebdane k, Didi M A, **(2023)**, Enhanced Removal of Bemacid Blue Anthraquinone Dye by Magnetic Nanocomposite Bentonite-Fe₃O₄: Equilibrium, Kinetic and Thermodynamic Studies, *Malaysian Journal of Chemistry*, 25(1), 143-157.
- [18] Douara N, Benzekri Benallou M, Termoul M, Mekibes Z, Bestani B, Benderdouche N, **(2022)** Removal of Textile Dyes on a Biosorbent Based on the Leaves of *Atriplex Halimus*, *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 41(11), 3726 – 3741.
- [19] Adesanmi B M, Hung Y T, Paul H, Huhnke C, **(2022)**, Comparison of dye wastewater treatment methods: A review. *GSC Advanced Research and Reviews*, 10(02), 126–137.
- [20] Parida V K, Singh N, Priyadarshini M, Kumari P, Datta D, Tambi A, **(2025)**, Insights into the synthetic dye contamination in textile wastewater: Impacts on aquatic ecosystems and human health, and eco-friendly remediation strategies for environmental sustainability, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 150, 247-264.
- [21] Kavitha G, Govindhan M, Premkumar S, **(2025)**, Dye pollution and its implications for human health, aquatic ecosystems, and sustainable wastewater treatment: A comprehensive review, *Journal of Water Process Engineering*, 80, 109071.
- [22] Pavithran R K, Reddy S G, Kumar B S, Mary A, Kugabalasooriar S, **(2025)**, Smart adsorbents: Innovations and advances in pesticide residue removal from water – A review, *HydroResearch*, DOI: 10.1016/j.hydres.2025.11.001.
- [23] Kathing C, Saini G, **(2022)**, A Review of Various Treatment Methods for the Removal of Dyes from Textile Effluent, *Recent Progress in Materials*, 4(4),1-15.
- [24] Collivignarelli M C, Abbà A, Miino M C, Damiani S, **(2019)**, Treatments for color removal from wastewater: State of the art, *Journal of environmental management*, 236, 727-745.
- [25] Aljamali N M, Baqi Aldujaili R A, Alfatlawi I O, **(2021)**, Physical and Chemical Adsorption and its Applications, *International Journal of Thermodynamics and Chemical Kinetics*, 7(2), 1-8.
- [26] Kaykhahi M, Sasani M, Marghzari S, **(2018)**, Removal of Dyes from the Environment by Adsorption Process, *Chemical and Materials Engineering*, 6(2), 31-35.

- [27] Alaqarbeh M, (2021), Adsorption Phenomena: Definition, Mechanisms, and Adsorption Types: Short Review, *Green and Applied Chemistry*, 13, 43-51.
- [28] Mhemeed A H, (2018), A General Overview on the Adsorption, *Indian Journal of Natural Sciences*, 9(51), 16127-16131.
- [29] Laiq E, Jabin S, Gupta P, (2021), Role of Adsorbents in Treatment of Pollutants from Aqueous Medium (A-Review), *Oriental Journal of Chemistry*, 37(4), 868-879.
- [30] Crini G, Lichtfouse E, Wilson LD, Morin-Crini N, (2019), Conventional and non-conventional adsorbents for wastewater treatment, *Environmental Chemistry Letters*, 17(1) 195-213.
- [31] Rajandran P, Masngut N, Manas N H A, Azelee N I W, Fuzi S F Z M, Bunyamin M A H, (2025) Fixed-bed adsorption for industrial wastewater purification: An in-depth review, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22, 3943–3964.
- [32] Rápó E, Tonk S, (2021), Factors Affecting Synthetic Dye Adsorption; Desorption Studies: A Review of Results from the Last Five Years (2017–2021), *Molecules*, 26(17), 5419.
- [33] Wang J, Guo X, (2023), Adsorption kinetics and isotherm models of heavy metals by various adsorbents: An overview, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 53(21), 1837-1865.
- [34] Tanko D B, Ahulle W R, Chahul H F, Saviour I M, (2026), Review of adsorption isotherms models, *Applied Water Science*, 16(72), 2-43.
- [35] Meftah S, Meftah K, Babassa N, Malous K, Drissi M, Amahrous A, Jabri N, Fathi J, Aguerchi K, Laababid Y, Adnouss O, Taib M, Zinaoui O, ElHassan O, Bouyazza L, (2025), The versatility and effectiveness of bio-adsorbents in the removal of chemical pollutants from water: adsorption mechanisms, optimization by ANN and RSM, SWOT analysis, and contribution to the 3rd and 6 th Sustainable Development Goals, *Discover Sustainability*, 6, 971.
- [36] Sharma A, Salhotra S, Putatunda C, Hans M, Rathour R K, Walia A, Solanki P, Bhatia R K, (2026) Recent developments in separation and storage of lignocellulosic biomass-derived liquid and gaseous biofuels: A comprehensive review, *Biomass and Bioenergy*, 204, 108417.
- [37] Bhardwaj A, Bansal M, Garima, Wilson K, Gupta S, Dhanawat M, (2025), Lignocellulose biosorbents: Unlocking the potential for sustainable environmental cleanup, *International Journal of Biological Macromolecules*, 294, 139497.

- [38] Izydorczyk G, Skrzypeczak D, Mironiuk M, Mikula K, Gil F, Taf R, Moustakas K, Chojnacka K (2024), Lignocellulosic biomass fertilizers: Production, characterization, and agri-applications, *Science of the Total Environment*, 923, 171343.
- [39] K Dhalia, Ghasemlou M, Daver F, Cass P, Adhikari B, (2021), A review of nanocellulose as a new material towards environmental sustainability, *Science of the Total Environment*, 775, 145871.
- [40] A K Chauhan, S P Singh, A S Rajpoot, S Chauhan, A Meraj, M. Jawaid, E Varghese, V Kumar, Sa A Awad, (2025), Preparation and applications of nanoparticles from lignocellulosic biomass: A review, *International Journal of Biological Macromolecules*, 321, 146831.
- [41] Rehman A, Nazir G, Heo K, Hussain S, Ikram M, Akhter Z, Algaradah M M, Mahmood Q, Foudah A M, (2024), A focused review on lignocellulosic biomass-derived porous carbons for effective pharmaceuticals removal: Current trends, challenges and future prospects, *Separation and Purification Technology*, 330, 125356.
- [42] Manyatshe A, Sibali L L, (2025), A review on the recovery of cellulose, lignin, and hemicellulose biopolymers from the same source of lignocellulosic biomass – Methodology, characterization and applications, *Journal of Water Process Engineering*, 70, 107037.
- [43] Cai J, He Y, Yu X, Banks S W, Yang Y, Zhang X, Yu Y, Liu R, Bridgwater A V, (2017), Review of Physicochemical Properties and Analytical Characterization of Lignocellulosic Biomass, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 309-322.
- [44] Hossain F, Hoque M E, Khan A A, Arifuzzaman M, (2025), Lignocellulosic Waste-Derived Nanomaterials: Types and Applications in Wastewater Pollutant Removal, *Water*, 17, 2426.
- [45] Manyatshe A, Cele Z E D, Balogun M O, Nkambule T T I, Msagati T A M, (2022), Lignocellulosic derivative-chitosan biocomposite adsorbents for the removal of soluble contaminants in aqueous solutions – Preparation, characterization and applications, *Journal of Water Process Engineering*, 47, 102654.
- [46] Dias F S, Meira L A, Carneiro C N, dos Santos L F M, Guimarães L B, Coelho N M M, Coelho L M, Alves V N, (2023), Lignocellulosic materials as adsorbents in solid phase extraction for trace elements preconcentration, *Trends in Analytical Chemistry*, 158, 116891.
- [47] Pellenz L, de Oliveira C R S, da Silva Júnior A H, da Silva L J S, da Silva L, de Souza A A U, de Souza S M A G, Borba F, da Silva A, (2023), A comprehensive guide for characterization of adsorbent materials, *Separation and Purification Technology*, 305, 122435.
- [48] Verma G, Mishra M, (2018), development and optimization of uv-vis spectroscopy - a review, *World Journal of Pharmaceutical Research*, 7 (11), 1170-1180.

- [49] Chakravarthi K S S, Ilango K B, Antony Maria Thomas S, Kowsalya Devi M, Sudharshan N, Swetha V, **(2023)**, uv-visible spectroscopy: a comprehensive review on instrumentation, World Journal of Pharmaceutical Research, 12(19), 1342-1363.
- [50] Brandani S, **(2021)**, Kinetics of liquid phase batch adsorption experiments, Adsorption, 27, 353–368.
- [51] Naeem H T, Hassan A A, **(2018)**, Effectiveness & Economy of Sawdust Wood Adsorbents in Removing Anionic Dyes of Aqueous Solutions, Pak. J. Biotechnol, 15(2), 311-320.
- [52] Makhado E, Seleka W M, Mahlaule Glory L, Selowa K, Elella M H A, Botlhoko O J, Satekge T K, Hato M J, **(2025)**, Comparative extraction and characterisation of cellulose nanostructures from sawdust and maize stalk biomass, International Journal of Biological Macromolecules, 329, 147842.
- [53] Davoudia M, Alidadib H, Mehrabpour M, Dolatabadi M, **(2018)**, Competitive removal of cationic dye (BR 46) and heavy metal (copper II) from synthetic textile effluent using adsorbent of Melia azedarach sawdust, Desalination and Water Treatment, 118, 326–335.
- [54] Rao C.V, Giri A.S, Goud V.V, Golder A.K, **(2016)**, Studies on pH-dependent color variation and decomposition mechanism of Brilliant Green dye in Fenton reaction, Int J Ind Chem, 7, 71-80.
- [55] Nahalia L, Miyaha Y, Mejbar F, Benjelloun M, Assila O, Fahoul Y, Nenov V, Zerrouq F, **(2022)** Assessment of Brilliant Green and Eriochrome Black T dyes adsorption onto fava bean peels: kinetics, isotherms and regeneration study, Desalination and Water Treatment, 245, 255–269.
- [56] Derouich G, Younssi S A, Bennazha J, Achiou B, Ouammou B, El Amrani El Hassanib Iz-E, Albizane A, **(2019)**, Adsorption study of cationic and anionic dyes onto Moroccan natural pozzolan. Application for removal of textile dyes from aqueous solutions, Desalination and Water Treatment, 145, 348–360.
- [57] Saber-Samandari S, Gulcan H O, Saber-Samandari S, Gazi M, **(2014)**, Efficient Removal of Anionic and Cationic Dyes from an Aqueous Solution Using Pullulan-graft-Polyacrylamide Porous Hydrogel, Water Air Soil Pollut, 225, 2177.
- [58] Abyar H, Nowrouzi M, Rezaei H, **(2025)**, Efficient and Eco-Friendly Sawdust Adsorbent for Methylene Blue Removal: Adsorption Optimization, Kinetics, and Isotherm Modelling, International Journal of Environmental Research, 19 (4),128.
- [59] Badr S M, Samaka I S, **(2021)**, Using Agricultural Waste as Biosorbent for Hazardous Brilliant Green Dye Removal from Aqueous Solutions, Journal of Engineering Science and Technology,16(4), 3435 – 3454.

- [60] Pathak P, Gedam V V, Deokar S, Bhagat S, Chahande A, Raut P, (2020), Studies on the removal of Brilliant Green dye using low-cost agricultural waste, *Indian Journal of Chemical Technology*, 27, 333-339.
- [61] Laskar N, Kumar U, (2019), Removal of Brilliant Green dye from water by modified Bambusa Tulda: adsorption isotherm, kinetics and thermodynamics study, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16, 1649–1662.
- [62] Lakshmiathy R, Reddy NA, Sarada NC, (2015), Optimization of brilliant green biosorption by native and acid activated watermelon rind as low-cost adsorbent, *Desalination and Water Treatment*, 54, 235–244.
- [63] Vithalkar S, Jugade, R M, Saravanan D, (2022), Adsorption of brilliant green dye by used-tea-powder: Equilibrium, kinetics and thermodynamics studies, *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 71(10), 1148-1158.
- [64] Boudia R, (2021), Etude Comparative De L'élimination De Colorants Textiles Par Deux Adsorbants : Naturel Et Activé, Thèse de doctorat, Université Djillali Liabes, Sidi Belabbes.
- [65] Zahaf F, Ouiddad S, Marouf R, Schott J, (2026), Equilibrium, kinetic and thermodynamic analysis of tartrazine adsorption onto raw wood sawdust as a low-cost lignocellulosic biosorbent, *Desalination and Water Treatment*, 325, 101670.
- [66] Nguyen H T A, Pham T T, (2023), Brilliant Green Biosorption from Aqueous Solutions on Okara: Equilibrium, Kinetic and Thermodynamic Studies, *Journal of Water and Environment Technology*, 21(1), 30-40.
- [67] Chikri R, Elhadiri N, Benchanaa M, El maguana Y, (2020), Efficiency of Sawdust as Low-Cost Adsorbent for Dyes Removal, *Journal of Chemistry*, 2020(1), 8813420.
- [68] Deka J, Das H, Singh A., Barman P, Devi A, Bhattacharyya K G, (2023), Methylene blue removal using raw and modified biomass *Plumeria alba* (white frangipani) in batch mode: isotherm, kinetics, and thermodynamic studies, *Environmental Monitoring and Assessment*, 195, 26.

Résumé

Les colorants sont des sources majeures de la pollution de l'eau. Afin de réduire cette pollution plusieurs méthodes ont été utilisées telles que l'adsorption. L'adsorption est une méthode économique et efficace pour l'élimination des contaminants notamment les colorants en utilisant divers matériaux peu coûteux. Cette étude a été réalisée afin d'éliminer deux colorants le vert brillant un colorant cationique et un anionique le bleu de bemacid par une adsorption sur la surface d'un bio-adsorbant sciure de bois. Plusieurs paramètres ont été étudiés (pH, concentration initiale en colorant, temps de contact, ect...) suivi d'une modélisation cinétique à l'aide des modèles de pseudo premier ordre, pseudo second ordre et modèle de la diffusion intra- particulaire et des isothermes de Langmuir et Freundlich ainsi qu'une étude thermodynamique. Les résultats de ce travail mettent en évidence une capacité d'adsorption maximale de 88,92 mg/g pour le vert brillant et 26,5 mg/g pour le bleu de bemacid. C'est ce qui rend ce bio-adsorbant utilisable dans le domaine du traitement des eaux.

Mots clés : vert brillant, bleu de bemacid, bio-adsorption, sciure de bois, isotherme.

Abstract:

Dyes are major sources of water pollution. In order to reduce this pollution several methods have been used such as adsorption. Adsorption is an economical and effective method for the removal of contaminants including dyes using various inexpensive materials. This study was carried out in order to remove two dyes, the brilliant green, a cationic dye, and an anionic, the bemacid blue, by liquid-solid extraction on the surface of a sawdust bio-adsorbent. Several parameters were studied (pH, initial dye concentration, contact time, etc....) followed by kinetic modeling using pseudo first order, pseudo second order and intra-diffusion models particle and isotherms of Langmuir and Freundlich as well as a thermodynamic study. The results of this work highlight a maximum adsorption capacity of 88.92 mg/g for brilliant green and 26.5 mg/g for bemacid blue. This is what makes this bio-adsorbent utilisable in the field of water treatment.

Key Words: brilliant green, bemacid blue, bio-adsorption, sawdust, isotherm.

ملخص:

الأصبغ هي المصادر الرئيسية لتلوث المياه. ومن أجل الحد من هذا التلوث تم استخدام عدة طرق مثل الامتزاز. الامتزاز هو وسيلة اقتصادية وفعالة لإزالة الملوثات بما في ذلك الأصبغ باستخدام مواد مختلفة غير مكلفة. أجريت هذه الدراسة بهدف إزالة صبغتين، اللون الأخضر اللامع صبغة موجبة الشحنة، وصبغة سالبة الشحنة اللون الأزرق بيماسيد، عن طريق الامتزاز على سطح مادة ماصة حيوية من نشارة الخشب. تمت دراسة العديد من المعلمات (الرقم الهيدروجيني، تركيز الصبغة الأولي، وقت التلامس، إلخ...) تليها النمذجة الحركية باستخدام نماذج الجسيمات من الدرجة الأولى، والدرجة الثانية، ونماذج الانتشار الداخلي ونماذج لانغموير وفروندليتش بالإضافة إلى دراسة الديناميكا الحرارية. تسلط نتائج هذا العمل الضوء على قدرة امتصاص قصوى تبلغ 88,92 مجم/جم للأخضر اللامع و26,5 مجم/جم للأزرق بيماسيد. وهذا ما يجعله قابلاً للاستخدام في مجال معالجة المياه.

الكلمات المفتاحية: الأخضر الساطع، الأزرق ثنائي الحمض، الامتزاز الحيوي، نشارة الخشب، متساوي الحرارة.