

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

Université de Ghardaïa



N° d'enregistrement

/ / / / /

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم هندسة الطرائق

Département de Génie des Procédés

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

Master

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie chimique

Thème

*Élimination d'un polluant organique par adsorption sur
charbon actif préparé à partir des fibres de palmier dattier*

Présenté par :

DJEBRIT Ikram

BOUDJERADA Bouchra

Soutenu publiquement le 15/06/2025

Devant le jury composé de :

RAACHE Imane	MCB	Université de Ghardaïa	Président
BENTARFA Djehad	MCB	Université de Ghardaïa	Encadrant
BENCHIEKHE Salah	MCB	Université de Ghardaïa	Examineur
FENNICHE Fares	MCB	Université de Ghardaïa	Examineur

Année universitaire 2024/2025

Résumé

Dans ce travail, les fibres de palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) de la région de Ouargla (Sud-Est algérien), variété *Ghars*, ont été valorisées pour la préparation de charbon actif par activation chimique à l'aide de l'acide phosphorique. Ce charbon a été préparé spécifiquement dans le but d'étudier l'élimination des polluants organiques présents dans l'eau.

Le charbon actif obtenu a été caractérisé par des méthodes physiques (perte à l'incinération) et chimiques (groupes fonctionnels de surface et spectroscopie FT-IR). Des tests d'adsorption ont été réalisés en étudiant l'effet de plusieurs paramètres opératoires tels que la masse d'adsorbant, la concentration initiale du Bleu de Méthylène, le temps de contact, le pH et la température. Les isothermes de Langmuir et de Freundlich ont été utilisés pour modéliser l'adsorption, et les cinétiques ont été analysées selon les modèles de pseudo-premier ordre et pseudo-second ordre.

Par ailleurs, une comparaison a été effectuée entre le charbon préparé à partir des fibres de palmier et deux autres charbons : l'un préparé selon une méthode différente, et l'autre issu d'une biomasse d'origine différente, afin d'évaluer leurs performances relatives dans l'adsorption des polluants organiques.

L'analyse FTIR a révélé la présence de groupes fonctionnels caractéristiques. L'échantillon CAFc1 a montré la meilleure capacité d'adsorption du bleu de méthylène (40 mg, 10 ppm, 40 min, pH 6, 25 °C). Les isothermes suivent le modèle de Freundlich, indiquant une adsorption multicouche sur surface hétérogène. La cinétique suit le modèle du pseudo-second ordre, suggérant une adsorption chimique.

Mots clés : adsorption, fibres de palmier, charbon actif, activation chimique, bleu de méthylène, polluant organique.

Abstract

In this study, date palm fibers (*Phoenix dactylifera L.*) from the Ouargla region (southeastern Algeria), variety "Ghars", were valorized to prepare activated carbon through chemical activation using phosphoric acid. This activated carbon was specifically developed to study the removal of organic pollutants from water.

The resulting material was characterized using physical methods (burn-off rate) and chemical analyses (surface functional groups and FT-IR spectroscopy). Adsorption tests were carried out to evaluate the effect of various operational parameters such as adsorbent dosage, initial Methylene Blue concentration, contact time, pH, and temperature. Langmuir and

Freundlich isotherm models were used to describe the adsorption behavior, and kinetic studies were conducted using pseudo-first-order and pseudo-second-order models.

Furthermore, a comparison was made with two other activated carbons—one prepared using a different method and the other derived from a different biomass—to assess their relative efficiency in removing organic contaminants.

FTIR analysis revealed the presence of characteristic functional groups. The CAFc1 sample showed the highest adsorption capacity for methylene blue (40 mg, 10 ppm, 40 min, pH 6, 25 °C). The adsorption isotherms follow the Freundlich model, indicating multilayer adsorption on a heterogeneous surface. Kinetic studies fit the pseudo-second-order model, suggesting that the adsorption process is governed by chemical interactions.

Keywords: adsorption, palm fibers, activated carbon, chemical activation, methylene blue, organic pollutants.

المخلص

في هذا العمل، تم تمييز ألياف نخيل التمر (*Phoenix dactylifera L.*) من منطقة ورقلة (جنوب شرق الجزائر)، صنف "الغرس"، من خلال تحضير فحم منشط باستخدام التنشيط الكيميائي بحمض الفوسفوريك، وذلك بهدف دراسة إزالة الملوثات العضوية من المياه.

تم توصيف الفحم المنشط المحضر باستخدام طرق فيزيائية (نسبة الفقد عند الحرق) وكيميائية (المجموعات الوظيفية على السطح والتحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء FT-IR)، أُجريت تجارب الامتزاز بدراسة تأثير عدة عوامل تشغيلية مثل كتلة الممتز، وتركيز أزرق الميثيلين الابتدائي، وزمن التلامس، ودرجة الحموضة، ودرجة الحرارة. كما تم استخدام نماذج لانغموير وفريندلش لنمذجة عملية الامتزاز، وتحليل الحركيات وفق نماذج الرتبة الأولى والثانية الكاذبة.

تمت أيضًا مقارنة أداء هذا الفحم مع نوعين آخرين، أحدهما محضر بطريقة مختلفة، والآخر مستخلص من مادة نباتية أخرى، وذلك لتقييم كفاءتهم في إزالة الملوثات العضوية.

كشفت تحاليل FTIR عن وجود مجموعات وظيفية مميزة. أظهر العينة CAFc1 أفضل قدرة على امتزاز أزرق الميثيلين (بكمية 40 ملغ، تركيز 10 جزء في المليون، لمدة 40 دقيقة، عند $\text{pH} = 6$ ودرجة حرارة $25\text{ }^\circ\text{C}$). تتنوع متساويات الامتزاز نموذج Freundlich، مما يشير إلى امتزاز متعدد الطبقات على سطح غير متجانس. كما أظهرت الدراسة الحركية أن البيانات تتوافق مع نموذج الرتبة الثانية الكاذبة، مما يدل على أن عملية الامتزاز تسيطر عليها تفاعلات كيميائية.

الكلمات المفتاحية: الامتزاز، ألياف النخيل، الكربون المنشط، التنشيط الكيميائي، أزرق الميثيلين، الملوثات العضوية.

Dédicace

*Nous dédions ce modeste travail, comme preuve de respect, de gratitude,
et de reconnaissance à :*

*Nos chers parents : Qui n'ont jamais cessé de nous encourager et nous
conseiller, Ils nous ont beaucoup aidé tout au long de notre chemin, grâce
à leur amour, leur compréhension, leurs sacrifices, leur tendresse, leurs
prières et leur patience sans jamais nous quitter des yeux ni baisser les bras
et leurs soutien moral et matériel, on ne saurait jamais traduire ce qu'on
ressent vraiment envers eux.*

*Nos chers frères et sœurs : Pour leurs encouragements permanents, et leur
soutien moral, pour leur indulgence en notre faveur qu'ils touchent ici
l'affection la plus intime qu'on ressent à leur égard.*

*Tous les membres de nos familles respectives : Pour leur amour, leur
solidarité, et leur présence réconfortante, même dans le silence. À chacun
de vous, nous adressons notre affection la plus sincère.*

*Nos amis et collègues : Pour leur compagnie et bons moments passés
ensemble.*

Et tous ceux qui nous sont chers...

Merci d'être toujours là pour nous.

Que Dieu vous garde

Remerciement

Premièrement, louange à « Dieu » qu'Il m'a fourni de la patience au moment du besoin, de la force au moment de la faiblesse et de la volonté contre le désespoir.

*Je tiens à exprimer mes remerciements les plus sincères à mon encadreur, **Dr. BENTARFA Djehad**, pour avoir accepté de superviser ce travail. Je lui suis profondément reconnaissant(e) pour son accompagnement constant, ses conseils précieux, sa confiance, et surtout sa grande patience tout au long de la réalisation de ce projet de recherche.*

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à **Dr. BOUAMER kheira**, ex-chef du département de Génie des procédés.*

*Nos vifs remerciements vont également aux **membres du jury, Dr. RAACHE Imane** pour avoir accepté de **présider le jury**, ainsi que*

***Dr. BENCHIEKHE Salah** et **Dr. FENNICHE Fares** pour avoir **examiné ce mémoire**. Leur expertise et leurs observations constructives nous ont permis d'enrichir davantage ce travail.*

Enfin, grands merci à nos familles respectives et nos amis qui nous ont aidés.

Nous profitons de l'occasion pour remercier tous ceux qui ont collaboré de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

Merci.

Liste des tableaux

Tableau I-1: Comparaison des deux types d'adsorption.....	7
Tableau II-1: La nomenclature des fractions des particules obtenir après le tamisage des échantillons	28
Tableau II-2: Propriété de l'acide phosphorique.	28
Tableau III-2: Propriétés physico-chimiques du bleu de méthylène.	31
Tableau III-3: les concentrations préparé avec les volumes de fiole.	31
Tableau III-1: Les valeurs de Burn-off pour les deux charbons actifs	36
Tableau III-4 : L'absorbance des déférentes concentrations de BM	37
Tableau III-5: Paramètres obtenus à partir de l'isotherme de Langmuir du bleu de méthylène sur CAFc1 et CAFc2 à 25°C.....	44
Tableau III-6: Paramètres obtenus à partir de l'isotherme de Freundlich du bleu de méthylèn sur CAFc1 et CAFc2 à 25°C.....	45
Tableau III-7: Constantes d'adsorption de pseudo-premier ordre du BM sur des CAFc1, CAFc2 à 25°C.	47
Tableau III-8: Constantes d'adsorption de pseudo-second ordre du BM sur des CAFc1, CAFc2 à 25°C.	48
Tableau III-9: Constantes thermodynamiques d'adsorption pour l'adsorption du bleu de méthylène (MB) sur des charbons actifs	48
Tableau III-10: Résultats de la comparaison entre les différents échantillons – Série 1.49	
Tableau III-11: Résultats de la comparaison entre les différents échantillons – Série 2.50	

Listes des figures

Figure I-1 : Adsorption physique et chimique.....	7
Figure I-2: Mécanisme d'adsorption.....	8
Figure I-3 : <i>Classification des isothermes d'adsorption</i>.....	9
Figure I-4: Charbon actif en grain (GAC).	19
Figure I-5: Charbon actif en poudre.	19
Figure I-6: Représentation de la structure poreuse de charbon actif.	22
Figure III-2: Structure de la molécule du bleu de méthylène	31
Figure III-1: Le FT-IR du charbon actif issu de fibres de palme.	36
Figure III-3: La courbe d'étalonnage du bleu de méthylène.	38
Figure III-4: L'effet de masse sur l'adsorption du bleu de méthylène.....	39
Figure III-5: L'effet de concentration sur l'adsorption du bleu de méthylène.	40
Figure III-6: L'effet du temps de contact sur l'adsorption du bleu de méthylène.	41
Figure III-7: L'effet de pH sur l'adsorption du bleu de méthylène.....	42
Figure III-8: L'effet de T sur l'adsorption du bleu de méthylène.....	43
Figure III-9: Diagramme de Langmuir pour l'adsorption de BM sur charbon actif CAF_{c1} et CAF_{c2} à 25°C.	44
Figure III-10: Diagramme de Freundlich pour l'adsorption de BM sur charbon actif CAF_{c1} et CAF_{c2} à 25°C.	45
Figure III-11: Diagramme de pseudo-premier ordre pour l'adsorption du BM sur CAF_{c1} et CAF_{c2} à 25 °C	46
Figure III-12: Diagramme de pseudo-second ordre pour l'adsorption du BM sur CAF_{c1} et CAF_{c2} à 25 °C.....	48
Figure III-13: Comparaison des rendement % de différentes échantillons - Série 1	50
Figure III-14: Comparaison des rendement % de différentes échantillons - Série 2	51

Liste des images

Image II-1 : Les fibres de palmier dattier.....	25
Image II-2: L'organigramme de prétraitement de la matière première.....	27
Image II-3: L'activation	28
Image II-4: La carbonisation	29
Image III-1: Les différentes concentrations de bleu de méthylène	32
Image III-2: Procédure expérimentale d'adsorption pour la détermination de la quantité de matière adsorbée.	33
Image III-3: Procédure expérimentale d'adsorption pour l'analyse de l'effet du pH.....	34

Liste des abréviations

<i>Symbole</i>	<i>Signification</i>	<i>Unité</i>
Abs	Absorbance	nm
B	La constante de Temkin	J.mol ⁻¹
BFC	Fibre de palmier Brut	-
C₀	Concentration initiale	mg.L ⁻¹
CA	Charbon actif	-
CAF_{ch}	Charbon actif fibre (activation chimique)	-
CAF_{ph}	Charbon actif fibre (activation physique)	-
CAG	Charbon actif en grainula	-
CAP	Charbon actif en poudre	-
C_e	Concentration à l'équilibre	mg.L ⁻¹
C_t	Concentration à l'instant temps	mg.L ⁻¹
FT-IR	Fourier Transform Infrared	-
K₁	Constante de vitesse du pseudo premier ordre	l.min ⁻¹
K₂	constante de vitesse du pseudo-second ordre	g.mg ⁻¹ .min ⁻¹
K₃	constante de vitesse de diffusion intra-particulaire	mg g ⁻¹ min ^{-1/2}
K_d	La constante d'équilibre	l.g ⁻¹
K_f	constantes de Freundlich	(mg.g ⁻¹) (l.mg ⁻¹) ^{1/n}
K_L	La constante d'adsorption de Langmuir	l.mg ⁻¹
K_t	La constante d'équilibre d'adsorption	L.g ⁻¹
q_m	Quantité maximale adsorbée	mg.g ⁻¹
m_f	Masse finale	g
m_i	Masse initiale	g
n	L'intensité d'adsorption	-
pH	Potentiel d'hydrogène.	-
q_e	quantité adsorbée à l'équilibre	mg.g ⁻¹
q_t	quantité adsorbée à l'instant t	mg.g ⁻¹
R%	le rendement d'adsorption	%
RB	Rhamnacées brutes	-
RC	Rhamnacées Charbon actif	-
UV-VIS	Ultraviolet-Visible	-
ΔG°	Énergie libre standard	KJ. mol ⁻¹
ΔH°	Enthalpie standard	KJ. mol ⁻¹
ΔS°	Entropie standard	KJ. mol ⁻¹
λ_{max}	Longueur d'onde maximale d'absorption	nm

Table des matières

Résumé.....	I
Dédicace	III
Remerciement.....	IV
Liste des tableaux.....	V
Listes des figures	VI
Liste des images.....	VII
Liste des abréviations	VIII
Introduction Générale	1
Chapitre I : Synthèse bibliographique.....	3
I.1 Pollutions organiques.....	4
I.1.1 Définition des polluants organiques	4
I.1.2 Types des polluants organiques	4
I.2 Adsorption	5
I.2.1 Définition d'adsorption	6
I.2.2 Types d'adsorption.....	6
I.2.2.1 Adsorption physique (physisorption).....	6
I.2.2.2 Adsorption chimique (chemisorption)	6
I.2.3 Mécanisme d'adsorption	7
I.2.4 Isothermes d'adsorption	8
I.2.4.1 Classification des isothermes d'adsorption	9
I.2.4.2 Modèles des isothermes	10
I.2.4.2.1 Modèle de Langmuir.....	10
I.2.4.2.2 Modèle de Freundlich	12
I.2.4.2.3 Isotherme d'Elovich	12
I.2.4.2.4 Isotherme de Temkin	13
I.2.5 Cinétique d'adsorption.....	13
I.2.5.1 Modèle du pseudo-premier ordre.....	13
I.2.5.2 Modèle du pseudo-second ordre.....	14
I.2.5.3 Modèle de diffusion intra-particulaire.....	14
I.2.6 Thermodynamique de l'adsorption.....	14
I.2.7 Paramètres affectant l'adsorption.....	15
I.2.8 Adsorbants.....	16

I.2.8.1	Généralité sur les adsorbants	16
I.2.8.2	Critères de choix d'adsorbant	16
I.2.8.3	Principaux adsorbants	17
I.3	Charbon actif.....	18
I.3.1	Généralité.....	18
I.3.2	Origine de fabrication du charbon actif	19
I.3.3	Différents types du charbon actif	19
I.3.3.1	Charbon actif en grain (GAC).....	19
I.3.3.2	Charbon actif en poudre (PAC).....	19
I.3.3.3	Charbon actif en fibre (CAF)	20
I.3.4	Procédés de fabrication du charbon actif	20
I.3.4.1	Carbonisation.....	20
I.3.4.2	Activation	20
I.3.4.3	Propriétés texturales.....	21
I.3.5	Domaines d'utilisations du charbon actif	22
Chapitre II	: Matérielles et Méthodes	23
II.1	Matérielles et Méthodes.....	24
II.1.1	Classification du palmier dattier	24
II.1.2	La matière première : fibres de palmier	25
II.1.3	Préparation de charbon actif (CA).....	26
II.1.3.1	Prétraitement	26
II.1.3.2	Activation	28
II.1.3.3	Carbonisation.....	29
II.2	Méthodes de caractérisation	29
II.2.1	Burn off de charbon actif	30
II.2.2	Infrarouge (IR).....	30
II.2.3	Tests d'adsorption	30
II.2.3.1	Préparation de solution mère	31
II.2.3.2	Protocole expérimental d'adsorption.....	32
II.2.3.2.1	Effet de la masse de l'adsorbant	32
II.2.3.2.2	Effet de la concentration initiale du colorant	33
II.2.3.2.3	Effet du temps de contact sur l'adsorption.....	33
II.2.3.2.4	Effet de pH.....	33

II.2.3.2.5 Effet de température	34
Chapitre III : Résultats et discussion	35
III.1 Caractérisation	36
III.1.1 Burn off de charbon actif	36
III.1.2 Infrarouge (IR).....	36
III.2 Tests d'adsorption	37
III.2.1 Courbe d'étalonnage.....	37
III.2.2 Effet de la masse de l'adsorbant.....	39
III.2.3 Effet de la concentration initiale du colorant	40
III.2.4 Effet du temps de contact sur l'adsorption.....	41
III.2.5 Effet de pH.....	42
III.2.6 Effet de température.....	43
III.2.7 Modèles d'adsorption	43
III.2.7.1 Modèle de Langmuir	43
III.2.7.2 Modèle de Freundlich.....	45
III.2.8 Cinétique d'adsorption	46
III.2.8.1 Le modèle du pseudo-premier ordre.....	46
III.2.8.2 Le modèle du pseudo-second ordre.....	47
III.2.9 Thermodynamique de l'adsorption.....	48
III.2.10 Étude comparative	49
Conclusion général.....	54
Références bibliographiques	56
Annexe.....	60

Introduction Générale

Introduction Générale

L'environnement englobe tous les éléments qui entourent une espèce vivante et lui assurent les conditions nécessaires à sa survie. Il constitue le fondement même de la vie humaine.

L'essor rapide des activités industrielles, mis en place pour satisfaire les besoins croissants de la société moderne, entraîne inévitablement une augmentation significative des rejets polluants dans l'environnement. De nombreux secteurs industriels tels que le textile, la papeterie, la plasturgie ou encore l'agroalimentaire consomment d'importantes quantités d'eau et utilisent des polluants organiques, qu'ils soient solubles ou sous forme de pigments, dans leurs procédés de production. Ces substances synthétiques, en plus d'être toxiques, contribuent à la pollution et à la coloration des eaux usées [1].

Diverses méthodes de traitement ont été mises en œuvre afin de réduire l'impact nocif des effluents industriels rejetés dans l'environnement. Toutefois, les techniques classiques, notamment les procédés biologiques, se révèlent souvent inefficaces. Cette inefficacité est principalement due à la présence dans ces rejets de substances toxiques et de composés colorés, dont la biodégradation est particulièrement difficile [2].

Plusieurs approches, relevant des domaines physique, chimique et biologique, sont utilisées pour traiter et éliminer les polluants organiques présents dans les effluents industriels. Parmi ces méthodes figurent la coagulation-floculation, la biodégradation, la filtration membranaire, l'oxydation chimique, l'ozonation, l'échange d'ions, les procédés électrochimiques ainsi que l'adsorption [3].

L'adsorption des polluants organiques, en particulier ceux issus des colorants, sur le charbon actif est largement reconnue pour son efficacité dans le traitement des effluents. Toutefois, pour certains colorants particulièrement résistants, des quantités importantes de charbon sont nécessaires afin d'assurer une performance satisfaisante, ce qui alourdit considérablement les coûts de traitement. Par ailleurs, la régénération du charbon actif représente une opération à la fois complexe et coûteuse, dont la faisabilité technique et la rentabilité économique font encore l'objet de controverses. Ces limitations ont ainsi stimulé, ces dernières années, de nombreuses recherches portant sur le développement de nouveaux matériaux alternatifs [2].

Dans une optique de développement durable, les recherches récentes se sont orientées vers la valorisation de ressources locales, renouvelables et bon marché, telles que les résidus agricoles et les déchets végétaux, pour produire des charbons actifs alternatifs. Ces biomasses lignocellulosiques sont abondantes, facilement accessibles et présentent des propriétés favorables à l'activation physique ou chimique [4].

Parmi ces biomasses, le palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*), largement cultivé dans les régions à climat sec, notamment en Afrique du Nord et au Moyen-Orient, offre un potentiel remarquable. En Algérie, classée quatrième producteur mondial de dattes avec près de 20 millions de palmiers, la production se concentre principalement dans les wilayas de Biskra, El Oued et Ouargla, qui assurent plus de 76 % de la production totale du pays [5]. Ces régions génèrent annuellement des centaines de milliers de tonnes de résidus, incluant les noyaux, les pédicelles, les palmes et surtout les fibres entourant le stipe.

Ces fibres de palmier, longtemps négligées ou brûlées, représentent pourtant une ressource prometteuse pour la fabrication de charbon actif écologique et économique

Ce travail vise donc à exploiter les fibres de palmier de la variété « Ghars » de la région d'Ouargla pour la préparation d'un charbon actif par activation chimique, en vue d'étudier son efficacité dans l'adsorption du Bleu de Méthylène à partir d'eaux polluées. L'étude portera également sur la caractérisation physico-chimique du charbon obtenu, ainsi que l'évaluation des paramètres influençant le processus d'adsorption.

Cette étude est structurée en trois chapitres principaux :

- **Chapitre I** : Présente une revue bibliographique sur la pollution organique, le phénomène d'adsorption, ses paramètres influents, ainsi que les modèles isothermes et cinétiques. Il introduit aussi les charbons actifs et leurs propriétés.
- **Chapitre II** : Décrit les matériaux et méthodes utilisés pour préparer du charbon actif à partir de fibres de palmier dattier activées chimiquement par l'acide phosphorique.
- **Chapitre III** : Regroupe les résultats de caractérisation du charbon actif et l'étude de son efficacité dans l'adsorption du bleu de méthylène. Les isothermes d'adsorption et la cinétique ont été analysées.

Enfin, une conclusion générale vient synthétiser les résultats obtenus

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I.1 Pollutions organiques

La pollution constitue un phénomène complexe aux multiples facettes, résultant de l'introduction de matières ou d'énergies dans le milieu naturel, avec des conséquences nuisibles sur les écosystèmes, la santé humaine ainsi que la biodiversité. Elle se présente sous plusieurs formes, notamment la pollution atmosphérique, aquatique, terrestre, sonore, lumineuse ou encore celle liée aux plastiques. Ses origines sont variées et comprennent des activités industrielles, agricoles, urbaines ou domestiques. Parmi ces différentes formes, la pollution organique se distingue par ses effets marquants sur les écosystèmes naturels [6].

I.1.1 Définition des polluants organiques

Les polluants organiques représentent des substances chimiques carbonées qui souillent l'environnement de diverses manières (solides, liquides ou gazeuses). Ils proviennent en grande partie des activités humaines, telles que l'agriculture, les procédés industriels et une gestion inappropriée des déchets.

Ces composés peuvent avoir une origine naturelle, comme la décomposition de matières organiques ou les feux de forêts, ou résulter d'activités humaines, notamment l'utilisation de pesticides, de solvants industriels, de plastifiants ou de combustibles fossiles. En raison de leur toxicité, de leur longévité dans l'environnement et de leur capacité à s'accumuler dans les êtres vivants, ces contaminants posent un risque majeur pour les écosystèmes et la santé humaine. Ils contribuent à divers types de pollution, tels que l'eutrophisation des milieux aquatiques, la dégradation des sols et la détérioration de la qualité de l'air, entraînant des soucis de santé comme des maladies respiratoires, des cancers et des troubles endocriniens [7].

I.1.2 Types des polluants organiques

Les polluants organiques sont classés en plusieurs catégories en fonction de leur structure chimique et de leur impact environnemental [8] :

- **Polluants organiques biodégradables** : ces substances, comme les déchets alimentaires, les excréments et les résidus végétaux, peuvent être décomposées naturellement par les micro-organismes. Bien que leur présence en grande quantité puisse causer l'eutrophisation des milieux aquatiques, ils ont généralement un impact temporaire.

- **Polluants organiques persistants (POP)** : Ces substances chimiques, notamment les pesticides à base de chlore organique (par exemple : DDT), les dioxines, ainsi que les biphényles polychlorés (PCB), se décomposent de manière très lente et s'accumulent dans les réseaux alimentaires, entraînant des effets nocifs sur la faune et la santé humaine.
- **Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)** : Issus de la combustion incomplète des matières fossiles (charbon, pétrole, bois), ces composés sont omniprésents dans l'air et peuvent provoquer des cancers et des maladies respiratoires.
- **Composés organiques volatils (COV)** : Substances telles que le benzène, le formaldéhyde et le toluène, qui s'évaporent facilement à température ambiante et contribuent à la pollution de l'air intérieur et extérieur.
- **Plastifiants et retardateurs de flamme bromés** : tels que les phtalates et les PBDE, sont couramment employés dans les secteurs du plastique et du textile. Ces substances chimiques sont soupçonnées d'agir comme des perturbateurs endocriniens et d'avoir des effets néfastes sur la reproduction humaine ainsi que sur celle de la faune.

I.2 Adsorption

Le terme « adsorption » a été proposé en 1881 par Keyser, qui a différencié ce phénomène de la condensation d'un gaz à la surface. L'adsorption fait référence au mécanisme par lequel des molécules de gaz se mêlent à la structure d'un matériau.[9]

Actuellement, l'adsorption représente une technologie clé parmi les méthodes de séparation, notamment celles qui ne reposent pas sur l'équilibre entre phases vapeur et liquide. Elle est largement adoptée pour la purification et la séparation des gaz et des liquides dans de nombreux secteurs, tels que l'industrie pétrolière, pétrochimique, chimique, ainsi que dans les domaines environnementaux et pharmaceutiques.

Cette technologie est utilisée pour produire des gaz industriels (comme l'oxygène, l'azote ou l'hydrogène) et pour séparer les hydrocarbures. Elle joue également un rôle essentiel dans le traitement de l'air, de l'eau et des effluents afin d'éliminer les polluants et les composés organiques volatils (COV), ainsi que dans le séchage et la production de médicaments. [10]

I.2.1 Définition d'adsorption

L'adsorption représente une méthode de traitement très performante pour éliminer un large éventail de substances toxiques présentes dans l'environnement, et elle est particulièrement utilisée pour la purification de l'eau et de l'air.

Ce processus se produit à la surface de contact entre un soluté et un solide, et peut être de nature physique ou chimique. Il repose sur l'adhésion des molécules contenues dans un fluide (liquide ou gazeux) à la surface d'un matériau solide. Le déroulement de ce phénomène dépend des propriétés physico-chimiques de la substance adsorbée et des caractéristiques de l'interface. L'adsorption est un phénomène spontané, provoqué par des forces déséquilibrées à la surface du solide, qui peuvent être physiques ou chimiques, ce qui permet de distinguer entre physisorption et chimisorption [11].

Elle peut aussi être considérée comme une technique de séparation physique, dans laquelle une substance est extraite d'un mélange pour se concentrer à la frontière entre deux phases [12].

I.2.2 Types d'adsorption

On distingue deux types d'adsorption :

I.2.2.1 Adsorption physique (physisorption)

La physisorption, communément désignée sous le nom d'adsorption de Van der Waals, est un processus fondé sur des interactions intermoléculaires d'attraction et de répulsion entre deux molécules.

Elle implique des forces faibles, telles que les interactions de Van der Waals et les forces électrostatiques, influencées par la polarité de la surface de l'adsorbant et la capacité de polarisation des molécules adsorbées. Ces interactions sont généralement peu spécifiques, réversibles, et permettent une désorption complète. Ce processus rapide, peut conduire à la formation d'une ou de plusieurs couches moléculaires sur la surface de l'adsorbant. La chaleur libérée lors de l'adsorption physique reste modérée, inférieure à 50 kJ par mole [13].

I.2.2.2 Adsorption chimique (chimisorption)

La chimisorption est un processus d'adsorption qui implique la formation de liaisons chimiques, qu'elles soient covalentes ou ioniques, entre l'adsorbant et les molécules adsorbées. Ce type d'interaction, souvent irréversible, modifie la nature des molécules fixées à la surface. Contrairement à l'adsorption physique, la chimisorption

ne permet la fixation que d'une seule couche moléculaire, les molécules étant liées directement et fortement à la surface du solide [14].

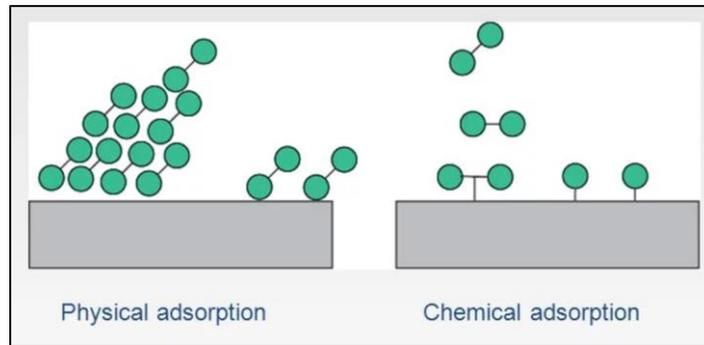


Figure I-1 : Adsorption physique et chimique.[15]

Tableau I-1: Comparaison des deux types d'adsorption[16]

Propriétés	Physisorption	Chimisorption
Liaisons	van der Waals	Chimique
Température du processus	Relativement basse	Plus élevée
Chaleur d'adsorption	4.184 à 41.84 KJ.mol ⁻¹	> 41.84 KJ.mol ⁻¹
Processus de désorption	Facile	Difficile
Cinétique	Très rapide	Lente
Formation des couches	Multicouches	Monocouche
Réversibilité	Réversible	Irréversible

I.2.3 Mécanisme d'adsorption

L'adsorption se produit principalement en trois étapes. La figure I-2 représente un matériau (adsorbant) avec les différents domaines dans lesquels peuvent se trouver les molécules organiques ou inorganiques qui sont susceptibles d'être en interaction avec le solide. [17]

- 1) **Diffusion externe** : Il s'agit du déplacement du soluté depuis la solution jusqu'à la surface extérieure de l'adsorbant. Ce transfert externe est influencé par les conditions d'écoulement du fluide à travers le lit d'adsorption, et il se déroule de manière rapide.
- 2) **Diffusion interne** : À ce stade, les molécules diffusent à travers la structure poreuse des particules d'adsorbant pour atteindre les sites actifs. Ce déplacement est régi par le gradient de concentration du soluté et constitue généralement l'étape la plus lente du processus .

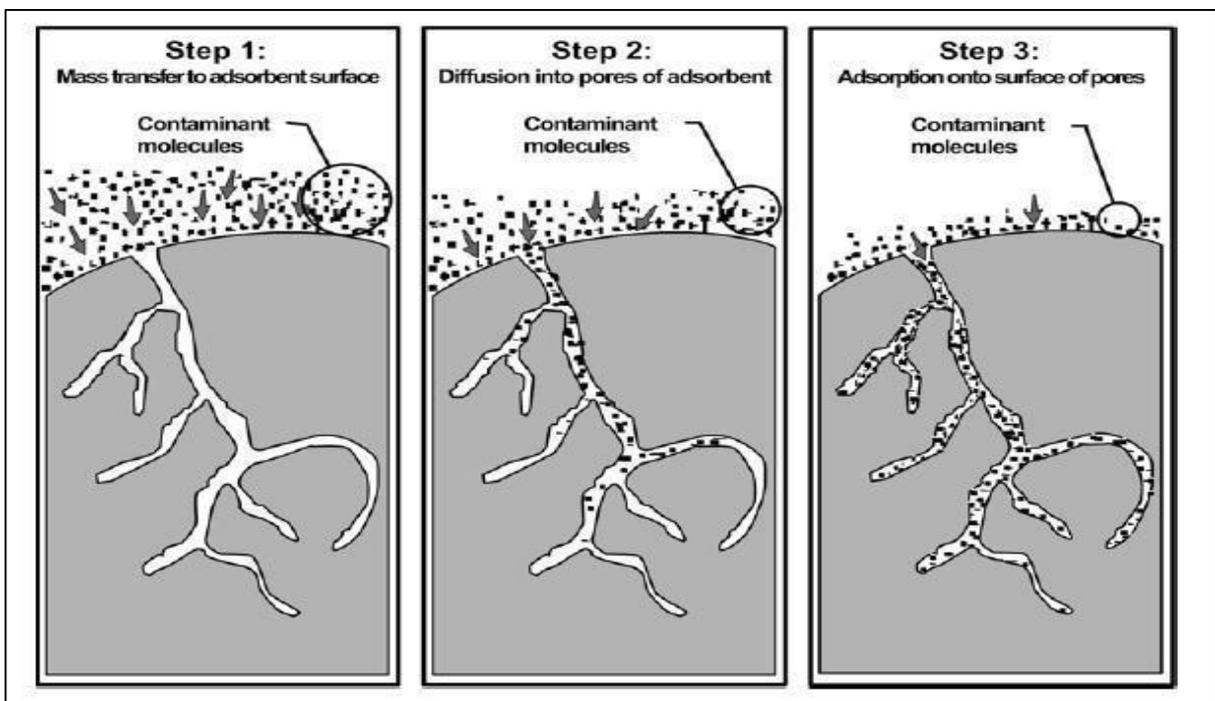
- 3) **Diffusion de surface** : Cette phase correspond à l'ancrage des molécules adsorbées sur les surfaces internes des pores. Une fois fixées, ces molécules restent statiques. Cette étape est extrêmement rapide.[18]

Figure I-2: Mécanisme d'adsorption.[18]

I.2.4 Isothermes d'adsorption

Plusieurs auteurs ont proposés des modèles, théoriques ou empiriques, pour décrire la relation entre la masse d'adsorbât fixée à l'équilibre (q_e) et la concentration sous laquelle elle a lieu (C_e). Il s'agit de relations non cinétiques $q_e = f(C_e)$, que l'on nomme isothermes.

En général, la concentration de l'adsorbât retenue par l'adsorbant est calculée par



la différence entre la concentration initiale du soluté C_0 et la concentration finale du soluté C . la quantité du soluté adsorbée à l'équilibre q_e est donnée par l'équation suivante : [19]

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) V}{m}$$

Avec :

q_e : quantité adsorbée (mg/g).

V : volume de la solution (l).

m : masse d'adsorbant (g).

C_0 : concentration initiale de l'adsorbât (mg/l).

C_e : concentration à l'équilibre de l'adsorbat (mg/l).

I.2.4.1 Classification des isothermes d'adsorption

Les interactions entre un adsorbant et un adsorbat ne suivent pas toutes le même comportement. Sur le plan expérimental, on identifie principalement quatre types de courbes d'isothermes d'adsorption, classées comme suit : S (sigmoïdale), L (type Langmuir), H (à haute affinité) et C (à partition constante). Cette typologie est illustrée dans la figure (I.3). [20]

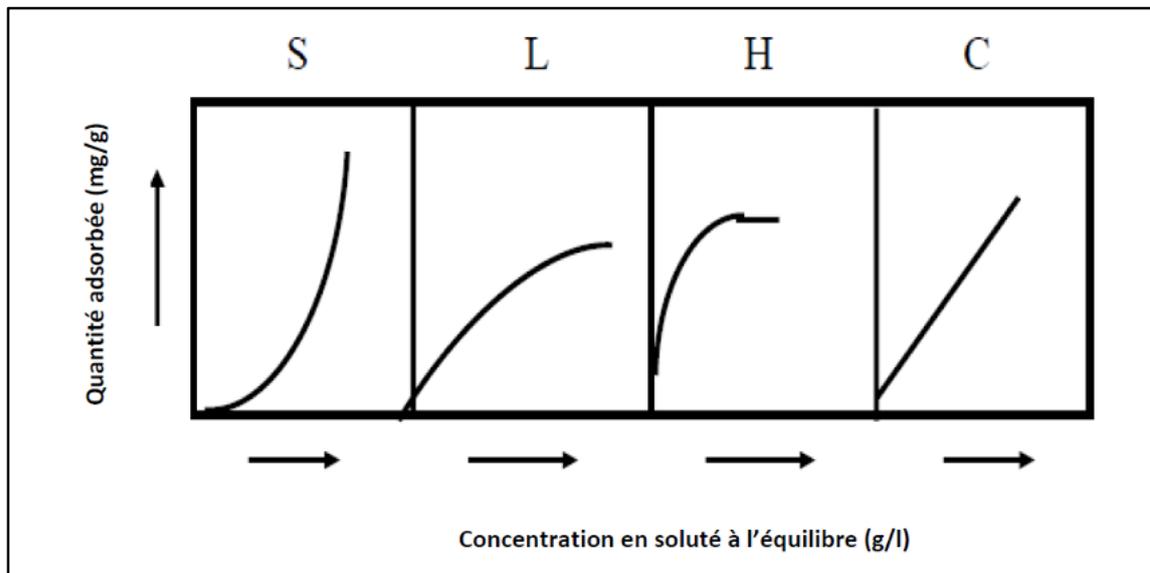


Figure I-3 : Classification des isothermes d'adsorption[20].

a) Isothermes de classe L :

Les isothermes de type L se distinguent, à faibles concentrations, par une courbe concave orientée vers le bas, indiquant une réduction progressive des sites disponibles sur l'adsorbant à mesure que l'adsorption progresse. Ce comportement survient lorsque les interactions attractives entre les molécules adsorbées sont peu marquées.

Il est souvent observé lorsque les molécules s'alignent horizontalement à la surface, limitant ainsi les forces d'attraction latérales. Ce phénomène peut également apparaître dans le cas d'une orientation verticale des molécules, à condition que la compétition entre le soluté et le solvant pour les sites d'adsorption soit faible. Dans ce contexte, l'adsorption individuelle des molécules est suffisamment forte pour que les interactions latérales deviennent négligeables.

b) Isothermes de classe S :

Les isothermes de type S se caractérisent, à faible concentration, par une courbure tournée vers le haut. Ce profil traduit un phénomène d'adsorption coopérative, où les premières molécules adsorbées facilitent la fixation des suivantes. Ce comportement s'explique par l'attraction entre molécules via les forces de Van der Waals, conduisant à la formation d'amas ou « îlots » de molécules compactées.

Ce type d'adsorption est généralement observé lorsque les molécules du soluté s'adsorbent verticalement, en particulier dans le cas des molécules possédant un seul groupe fonctionnel, ou encore en présence d'une forte concurrence entre le soluté et le solvant pour les sites d'adsorption.

c) Isothermes de classe H :

L'isotherme de classe H se distingue par une pente initiale très raide, indiquant une adsorption significative même à des concentrations très faibles du soluté. Ce comportement traduit une forte affinité entre les molécules adsorbées et la surface de l'adsorbant. Ce type d'isotherme est également fréquemment observé lors de l'adsorption de micelles ou de polymères résultant de l'agrégation des molécules de soluté.

d) Isothermes de classe C :

Les isothermes de type C présentent une relation linéaire entre la quantité adsorbée et la concentration du soluté, traduisant une répartition constante entre la phase liquide et la surface adsorbante, jusqu'à atteindre un palier.

Cette linéarité suggère que le nombre de sites disponibles demeure constant tout au long du processus, ce qui peut s'expliquer par la création de nouveaux sites d'adsorption au fur et à mesure. Ce comportement est généralement observé lorsque les molécules de soluté sont capables de modifier la structure du substrat, en ouvrant des pores que le solvant seul ne pouvait atteindre.[21]

1.2.4.2 Modèles des isothermes

1.2.4.2.1 Modèle de Langmuir

Le modèle de Langmuir considère l'adsorption comme un processus chimique réversible, se déroulant en monocouche, et reposant sur des interactions linéaires entre l'adsorbant et l'adsorbat développée par Langmuir en 1915, cette équation est une équation relativement simple qui suppose que la surface de l'adsorbant est

complètement homogène, et que chaque "site" de l'adsorbant peut se lier à un maximum d'une molécule de l'adsorbat, et qu'il n'y a pas d'interactions entre les molécules de l'adsorbat. [22]

Le modèle d'adsorption de Langmuir peut être exprimé sous la forme suivante :

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

- q_e quantité adsorbée à l'équilibre par unité de poids de l'adsorbant en (mg/g).
- q_m capacité d'adsorption à la saturation (mg/g) et qui correspond à la formation d'une monocouche.
- C_e concentration à l'équilibre après adsorption (mg.L^{-1}).
- k_L Constante d'équilibre d'adsorption.

La forme linéaire de l'isotherme est :

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

Dans certains cas, l'adsorption se produit dès le départ en plusieurs couches, où les molécules fixées sur la première couche agissent comme des sites d'adsorption pour les molécules suivantes, formant ainsi des couches successives.

Une caractéristique fondamentale du modèle de Langmuir peut être exprimée à travers un paramètre sans dimension appelé facteur de séparation, dont l'expression mathématique est donnée par l'équation suivante :

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0}$$

Où C_0 est la concentration initiale de l'adsorbât (L.mg^{-1}) et K_L est la constante de Langmuir (L.mg^{-1}).

Les conditions relatives au paramètre R_L sont les suivantes [23] :

- Défavorable pour $R_L > 1$
- Linéaire pour $R_L = 1$
- Irréversible pour $R_L = 0$
- Favorable pour $0 < R_L < 1$

I.2.4.2.2 Modèle de Freundlich

L'équation de Freundlich est un modèle logarithmique dérivé empiriquement qui tente de tenir compte des effets des divers niveaux d'énergie d'adsorption. Le modèle suppose que le nombre de sites associés à une énergie libre d'adsorption particulière diminue de façon exponentielle à mesure que le niveau d'énergie libre augmente.[24]

Le modèle d'adsorption de Freundlich peut être exprimé sous la forme suivante

$$q_e = K_f C_e^{(1/n)}$$

- q_e : Quantité adsorbée par gramme du solide.
- C_e : Concentration de l'adsorbât à l'équilibre d'adsorption.
- k_f et $1/n$ constantes de Freundlich caractéristiques de l'efficacité d'un adsorbant donné vis-à-vis d'un soluté donné.

L'adsorption s'effectue dès le début en plusieurs couches, les molécules adsorbées dans la première couche servent de sites d'adsorption pour les molécules de la deuxième couche et ainsi de suite.

La forme linéaire de l'isotherme est :

$$\ln(q_e) = \ln k_f + (1/n) \ln C_e$$

- Les valeurs de $n > 1$, indiquent une adsorption favorable,
- Les valeurs de $n < 1$ révèlent une faible adsorption.

I.2.4.2.3 Isotherme d'Elovich

Le modèle d'Elovich, formulé en 1962, se distingue du modèle de Langmuir par sa conception de l'évolution des sites d'adsorption. Contrairement à Langmuir, il suppose que le nombre de sites disponibles varie de façon exponentielle au cours du processus, ce qui suggère une adsorption en plusieurs couches. L'isotherme correspondant à ce modèle est donnée par la relation suivante :

$$\frac{q_e}{q_m} = k \cdot c_e \cdot e^{(-\frac{q_e}{qm})}$$

q_m (mg / g⁻¹) est la quantité maximale adsorbée par unité de masse de l'adsorbant.

K (L.mg⁻¹) est La constante d'adsorption d'Elovich liée à l'affinité des sites de surface avec l'adsorbat [25]

I.2.4.2.4 Isotherme de Temkin

L'isotherme de Temkin prend en considération la variation de la chaleur d'adsorption au fur et à mesure du recouvrement de la surface. Elle suppose que cette chaleur diminue de manière linéaire en raison de la réduction progressive des interactions entre l'adsorbant et l'adsorbat. Ce modèle repose sur l'hypothèse d'une distribution uniforme des énergies de liaison à la surface de l'adsorbant. L'équation de l'isotherme de Temkin s'exprime de la manière suivante :

$$q_e = \frac{RT}{b_t} \cdot \ln(k_t \cdot c_e)$$

Ou sous la forme :

$$q_e = B \ln K_t + B \ln c_e$$

Avec

- $B = RT/b_t$ (J/mol), la constante de Temkin relative à la chaleur de sorption
- K_t (L.g-1) la constante d'équilibre d'adsorption correspondant à l'énergie de liaison maximale[25].

I.2.5 Cinétique d'adsorption

I.2.5.1 Modèle du pseudo-premier ordre

Le modèle cinétique du pseudo-premier ordre, proposé initialement par Lagergren en 1898, est couramment formulé (selon l'équation suivante. [26]):

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t)$$

Où :

- q_t est la quantité adsorbée à l'instant t ; en (mg/g)
- q_e est la quantité adsorbée à l'équilibre (mg/g)
- k_1 est la constante de vitesse du pseudo-premier ordre (min^{-1}).

Après intégration, la formule devient logarithmique et s'écrit comme suit :

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 t$$

I.2.5.2 Modèle du pseudo-second ordre

Le modèle du pseudo-second ordre, proposé par Ho et McKay (1999), suppose que la vitesse d'adsorption est proportionnelle au carré de la différence entre la capacité d'adsorption à l'équilibre et celle à un instant donné [27] :

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2$$

Où k_2 est la constante de vitesse du pseudo-second ordre ($g \cdot mg^{-1} \cdot min^{-1}$).

L'intégration de l'équation donne la formule linéaire suivant :

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 \cdot q_e^2} + \frac{t}{q_e}$$

I.2.5.3 Modèle de diffusion intra-particulaire

Ce modèle, proposé par Weber et Morris (1963), considère que la diffusion dans les pores des particules d'adsorbant est le facteur limitant du processus d'adsorption. L'équation courante est [28]:

$$qt = k_3 t^{1/2} + C$$

Où :

- K_3 est la constante du modèle de diffusion intra-particulaire ($mg \cdot g^{-1} \cdot min^{-1/2}$),
- C est une constante liée à l'épaisseur de la couche limite.

I.2.6 Thermodynamique de l'adsorption

La température a un effet important sur l'adsorption. La constante d'équilibre K_D du processus d'adsorption, exprimée en $l \cdot g^{-1}$, peut être utilisée pour estimer les paramètres thermodynamiques en raison de leur dépendance à la température. Les variations de l'énergie libre standard (ΔG°), de l'enthalpie (ΔH°) et de l'entropie (ΔS°) du processus d'adsorption ont été déterminées à l'aide des équations suivant :

$$K_D = \frac{q_e}{C_e}$$

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_D$$

$$\ln K_D = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{RT}$$

Un graphique de Van't Hoff de $\ln K_D$ en fonction de $1/T$ donne une droite. Les paramètres ΔH° et ΔS° ont été calculés à partir de la pente et de l'ordonnée à l'origine de cette droite, respectivement[29].

1.2.7 Paramètres affectant l'adsorption

Lorsqu'un solide entre en contact avec une solution, les différents composants de celle-ci, à savoir le solvant et le soluté, manifestent tous deux une propension à s'adsorber à la surface du solide. Il en résulte une compétition à la surface entre ces deux processus d'adsorption, qui sont concurrentiels. Le scénario le plus intéressant survient lorsque l'adsorption du soluté prédomine largement sur celle du solvant. Ainsi, la quantité adsorbée dépend de plusieurs facteurs, dont les principaux sont les suivants:[30]

➤ Surface spécifique

La surface spécifique d'un solide correspond à la surface accessible par unité de masse et s'exprime en m^2/g . L'adsorption est directement liée à cette surface spécifique, ce qui implique qu'une surface spécifique plus élevée entraîne une capacité d'adsorption plus importante. Cette surface dépend de plusieurs facteurs, tels que la surface géométrique, les crevasses, les pores, les irrégularités de surface, ainsi que de la taille des particules du solide. Chaque fois qu'un solide est subdivisé en particules plus petites, la surface exposée augmente, favorisant ainsi l'adsorption[30].

➤ pH

Le pH joue un rôle crucial dans toute étude d'adsorption, car il peut influencer à la fois la structure de l'adsorbant et de l'adsorbat, ainsi que le mécanisme d'adsorption. En effet, une variation du pH peut modifier les propriétés de surface de l'adsorbant et affecter la charge des molécules de l'adsorbat, ce qui influence l'efficacité du processus d'adsorption. [31]

➤ La masse de l'adsorbant

La capacité d'adsorption augmente avec la quantité d'adsorbant présente dans la solution. Cependant, étant donné le coût élevé des matériaux adsorbants, il est conseillé de déterminer un rapport optimal entre le liquide et le solide pour maximiser l'efficacité du processus tout en minimisant les coûts.[32]

➤ Polarité et polarisabilité de la molécule adsorbée

L'adsorption est fortement influencée par les propriétés du composé à adsorber, telles que sa surface et son volume, ainsi que par les groupes fonctionnels présents dans la molécule (tels que les alcools, les aldéhydes, les cétones, les acides carboxyliques, les amines, le soufre, les halogènes), qui génèrent des effets de polarisabilité plus ou moins marqués. Des études approfondies ont été réalisées pour établir des corrélations quantitatives entre la structure moléculaire et les paramètres d'adsorption, notamment la capacité d'adsorption et l'énergie d'interaction.

De plus, la réactivité accrue de certaines molécules peut entraîner des réactions d'oxydation à la surface de l'adsorbant, qui joue alors un rôle catalytique. Dans le cas d'un mélange de composés, des interactions compétitives peuvent se produire entre ces composés, ce qui réduit l'efficacité de l'adsorption pour chaque composant pris séparément. [31]

➤ **Température :**

L'adsorption physique s'effectue à des basses températures (phénomène exothermique), alors que l'adsorption chimique demande des températures plus élevées (phénomène endothermique). [31]

I.2.8 Adsorbants

I.2.8.1 Généralité sur les adsorbants

En théorie, tous les solides peuvent agir en tant qu'adsorbants. Cependant, seuls ceux qui possèdent une surface spécifique suffisamment élevée (surface par unité de masse) présentent un réel intérêt dans des applications pratiques.

Les adsorbants industriels, tels que les charbons actifs, les zéolithes, les gels de silice et les alumines activées, possèdent généralement des surfaces spécifiques supérieures à 100 m²/g, et parfois même plusieurs milliers de m²/g.[33]

I.2.8.2 Critères de choix d'adsorbant

Le choix d'un adsorbant repose sur plusieurs paramètres, notamment sa capacité d'adsorption ainsi que la vitesse à laquelle se déroule le processus. Cette capacité dépend elle-même de la concentration de l'adsorbat et des conditions opératoires telles que la température, la pression et la composition du mélange à traiter. Un autre facteur clé est le niveau de sélectivité requis pour le procédé.

Les caractéristiques mécaniques et thermiques de l'adsorbant, telles que sa résistance mécanique, sa stabilité thermique, la chaleur associée à l'adsorption et sa conductivité, doivent également être considérées. Enfin, le coût de l'adsorbant reste un critère déterminant dans le choix du matériau.[34]

I.2.8.3 Principaux adsorbants

Les adsorbants les plus utilisés dans les applications industrielles sont les suivants :

A. moléculaires Tamis

Les tamis moléculaires, issus du groupe des aluminosilicates cristallins, font partie de la famille des zéolithes. Leur structure est constituée d'un réseau tridimensionnel de tétraèdres formés par les unités SiO_4 et AlO_4 , interconnectées par des atomes d'oxygène partagés. Selon leur type, ces matériaux présentent des diamètres de pores variant : de 3 à 5 Å pour les tamis de type A et de 8 à 11 Å pour ceux de type X.

Grâce à cette structure poreuse, ils permettent de séparer les molécules d'un mélange en fonction de leurs dimensions et de leur géométrie, comme dans le cas de la distinction entre hydrocarbures linéaires, ramifiés ou cycliques. [35]

B. Gel de silice

Le gel de silice se présente sous forme de particules solides, dures et poreuses, caractérisées par une surface spécifique élevée, allant de 600 à 800 m^2/g , et des pores dont le diamètre se situe entre 20 et 50 Å. Il est produit par la réaction d'une solution de silicate de sodium avec de l'acide chlorhydrique. Ce matériau est principalement utilisé pour assécher les gaz et les liquides, ainsi que pour séparer les différentes fractions des hydrocarbures. [35]

C. Alumine activée

L'alumine activée est un matériau poreux dont la surface spécifique varie entre 200 et 500 m^2/g , avec des pores mesurant entre 20 et 140 Å. Elle est obtenue par calcination d'hydroxyde d'aluminium précipité ou à partir de bauxite traitée thermiquement. Grâce à ses propriétés d'adsorption, elle est largement utilisée pour la déshydratation des gaz et des liquides. [35]

D. Argiles activées (ou terres décolorantes)

Les argiles activées sont obtenues par traitement de certaines argiles naturelles, telles que la bentonite, la kaolinite ou la terre de Fuller. Ce traitement consiste à ajouter

de l'eau pour former une pâte, puis à y incorporer une quantité précise d'acide chlorhydrique. Ensuite, la pâte est soigneusement lavée puis séchée dans des conditions bien définies afin d'optimiser les propriétés absorbantes du matériau. Il a été démontré que plus le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ est élevé, plus le pouvoir décolorant de l'argile activée est important. Ces matériaux sont couramment utilisés pour la purification et la décoloration des huiles végétales et minérales[35]

E. Charbon actif

Les charbons actifs sont des adsorbants organiques à structure amorphe, ce qui signifie qu'ils ne possèdent pas l'organisation régulière d'un réseau cristallin. Leur réseau poreux est caractérisé par une large distribution de tailles de pores, s'étendant sur plusieurs ordres de grandeur, ce qui les distingue nettement des matériaux cristallins à structure ordonnée.[36]

I.3 Charbon actif

I.3.1 Généralité

Le charbon actif regroupe une large famille de matériaux qui ne possèdent pas de structure chimique unique et définie. Il existe plusieurs types de charbon actif, différenciés par certaines de leurs propriétés, notamment leurs capacités d'adsorption et leurs caractéristiques catalytiques. Selon un rapport de l'Agence américaine de protection de l'environnement (EPA), ces matériaux jouent un rôle essentiel dans divers processus de traitement environnemental. [37]

Selon les évaluations menées en 1991 et 1995, l'adsorption sur charbon actif a été reconnue comme la technologie la plus efficace pour traiter une large gamme de contaminants présents dans les eaux souterraines et de surface. Cette méthode s'est avérée particulièrement performante pour l'élimination des solvants organiques, des hydrocarbures polycycliques aromatiques, des composés chlorés (notamment les phénols chlorés), des pesticides, ainsi que des polluants métalliques dissous.

Les charbons actifs se distinguent par un réseau très dense de micropores, conférant à ces matériaux une capacité d'adsorption exceptionnelle. Grâce à cette propriété, ils représentent aujourd'hui les adsorbants les plus produits et les plus couramment utilisés dans l'industrie.[38]

I.3.2 Origine de fabrication du charbon actif

Le Charbon Actif (CA) peut être produit à partir de divers matériaux riches en carbone et pauvres en matières inorganiques. Parmi les matières premières couramment utilisées, on retrouve le bois, le charbon de bois, la coque de noix de coco, le lignite, la tourbe, ainsi que certains polymères synthétiques ou encore des résidus issus des processus pétroliers. [39]

I.3.3 Différents types du charbon actif

Il existe trois formes principales de charbon actif :

I.3.3.1 Charbon actif en grain (GAC)

Il s'agit de particules aux formes irrégulières, dont la taille varie entre 0,2 et 5 mm. Ce type de charbon est principalement utilisé dans des applications tant en phase liquide qu'en phase gazeuse.[40].



Figure I-4: Charbon actif en grain (GAC).[41]

I.3.3.2 Charbon actif en poudre (PAC)

Il se présente sous forme de poudre dont la taille est inférieure à 0,18 mm. Ce charbon est principalement utilisé dans des applications en phase liquide ainsi que pour le traitement des flux gazeux. [42]



Figure I-5: Charbon actif en poudre.[41]

I.3.3.3 Charbon actif en fibre (CAF)

Les fibres de charbon actif sont élaborées à partir de textiles synthétiques ou de fibres végétales, telles que la rayonne tissée. Ces matériaux subissent une carbonisation à haute température, suivie d'un processus d'activation. Les premières fibres de carbone, créées à partir de cellulose à la fin des années 1970, présentent une structure microporeuse très développée et une surface spécifique pouvant atteindre 2000 m²/g. Faciles à manipuler, elles sont principalement utilisées dans la fabrication de matériaux composites, de pièces de friction pour des applications industrielles, ainsi que dans la confection de vêtements isolants résistant à de fortes températures. [40]

I.3.4 Procédés de fabrication du charbon actif

Les procédés industriels de production de CA comportent généralement deux (02) étapes : la carbonisation et l'activation.

I.3.4.1 Carbonisation

La carbonisation désigne la décomposition thermique (ou pyrolyse) des matières carbonées, au cours de laquelle les éléments autres que le carbone sont éliminés. Ce processus se déroule à des températures variant entre 600 et 800°C, en présence de sels métalliques et sous un flux continu de gaz inerte (sans oxygène).

La microstructure de base se forme aux alentours de 500°C, mais les pores générés contiennent encore divers produits de décomposition. Ce processus est réalisé à une vitesse suffisamment rapide pour limiter les interactions entre les produits carbonisés et les composés volatils. Toutefois, une simple carbonisation ne permet pas d'obtenir des produits à haute capacité d'adsorption, car les structures poreuses ainsi formées sont trop primitives pour être utilisées comme adsorbants sans un processus d'activation supplémentaire. [26]

I.3.4.2 Activation

L'activation favorise le développement de la porosité en supprimant les résidus de goudron qui bloquent les pores, tout en générant des groupes fonctionnels de surface, souvent oxydés, qui facilitent les interactions entre le solide et les molécules adsorbées. Ce processus peut être réalisé par des méthodes physiques ou chimiques. [26]

a) L'activation physique

L'activation physique contribue à élargir les pores existants tout en en formant de nouveaux. Elle est effectuée à des températures comprises entre 800 °C et 1000

°C, en présence d'un gaz légèrement oxydant, tel que l'air, la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, ou un mélange de ces gaz.

Les caractéristiques adsorbants finales du charbon actif (CA) sont influencées par plusieurs facteurs : le type de gaz oxydant, sa concentration, la température, la durée de l'activation, ainsi que la quantité et la nature des phases minérales présentes dans le CA. Elles dépendent également des additifs inorganiques incorporés durant le processus. Au cours de l'activation, les atomes de carbone à valence insaturée, formés en périphérie des feuillets lors de la carbonisation, réagissent avec des hétéroatomes comme l'oxygène, l'hydrogène, l'azote ou le soufre, ce qui conduit à la création de divers groupements fonctionnels à la surface. [26]

b) L'activation chimique

Il s'agit d'une autre méthode de production du charbon actif, reposant sur l'imprégnation du matériau de départ dans une solution concentrée d'un agent fortement oxydant et/ou déshydratant (comme l'acide phosphorique, le chlorure de zinc ou la soude). Le matériau imprégné est ensuite soumis à une pyrolyse à une température comprise entre 400°C et 800°C sous atmosphère inerte, puis lavé et séché. Cette méthode permet d'obtenir le charbon actif en une seule étape.

À l'issue du processus d'activation, le charbon actif présente une structure poreuse polydisperse, caractérisée par des pores de formes et de tailles variées. Cette répartition poreuse est influencée à la fois par la nature de la matière première utilisée et par les conditions spécifiques de l'activation. Ainsi, même en partant du même matériau de base, les propriétés physico-chimiques du charbon actif peuvent différer selon le procédé employé [27]

I.3.4.3 Propriétés texturales

La texture du charbon actif est principalement définie par deux paramètres[43] :

- L'air spécifique,
- La porosité.

Ces caractéristiques texturales sont à l'origine de sa forte capacité d'adsorption vis-à-vis de nombreuses espèces chimiques. Le charbon actif se distingue par une surface spécifique élevée et une large répartition de la taille de ses pores. Selon la classification de l'IUPAC (Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée), ces pores sont regroupés en trois catégories[44]:

- Les macropores : les pores de largeur supérieur 50nm ;
- Les mésopores : les pores de largeur comprise entre 2 et 50nm ;
- Les micropores : les pores de largeur inférieure à 2nm et sont aussi appelées nanopores.

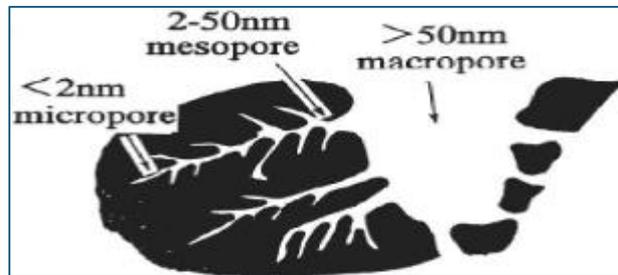


Figure I-6: Représentation de la structure poreuse de charbon actif.[45]

I.3.5 Domaines d'utilisations du charbon actif

Le charbon actif est employé dans de nombreux domaines grâce à ses propriétés polyvalentes [45]:

- La purification de l'eau, qu'il s'agisse d'eau destinée à la consommation, d'eaux industrielles ou d'eaux usées.
- La filtration de produits dans les secteurs pharmaceutique, chimique et agroalimentaire, par exemple pour raffiner le sucre ou les huiles végétales.
- L'utilisation comme support pour les réactions catalytiques.
- L'élimination des impuretés et des pigments dans les matières premières, notamment pour décolorer le sucre extrait de la canne ou de la betterave.

Chapitre II : Matérielles et Méthodes

II.1 Matérielles et Méthodes

Le palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) est principalement cultivé dans les oasis du Sahara. Originaire d'Afrique du Nord, il est largement répandu de l'Arabie jusqu'au golfe Persique, où il constitue un élément emblématique de la flore des oasis. On le trouve également aux îles Canaries, dans le nord de la Méditerranée et dans le sud des États-Unis. Sensible aux basses températures, cette plante s'adapte à divers types de sols, à condition qu'ils soient fertiles et bien drainés. Dans les zones au climat clément, le palmier dattier est cultivé en extérieur, en plein soleil, souvent apprécié comme plante ornementale pour sa silhouette élancée et son feuillage attrayant [46].

On dénombre plus de 100 millions de palmiers dattiers à travers le monde, chaque arbre pouvant atteindre une longévité supérieure à 100 ans. Quelques études (références 93 à 100) ont exploré l'utilisation optimale des fibres enveloppant le tronc du palmier dattier comme renfort dans les matériaux polymères. Le tronc est entouré d'un réseau de fibres individuelles qui forment un tapis naturel tissé, composé de fibres croisées de diamètres variés. Traditionnellement, ce tapis est détaché de l'arbre, nettoyé, puis transformé en cordes ou en paniers dans diverses régions du globe. Toutefois, ces usages ne valorisent qu'une fraction minime du potentiel mondial de production de ces fibres [47].

II.1.1 Classification du palmier dattier

- Groupe : *Spadiciflores*
- Ordre : *Palmales*
- Famille : *Palmacées*
- Sous-famille : *Coryphoïdées*
- Tribu : *Phoenicées*
- Genre : *Phoenix*
- Espèce : *Phoenix dactylifera L* [48].

II.1.2 La matière première : fibres de palmier

Les fibres issues de la gaine entourant le tronc du palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*) représentent une ressource naturelle abondante dans les régions arides et semi-arides. Composées majoritairement de cellulose, d'hémicellulose et de lignine, ces fibres se distinguent par leurs propriétés mécaniques intéressantes, notamment une bonne résistance, une flexibilité appréciable et une faible densité [49].

Grâce à leur structure poreuse, les fibres de palmier possèdent une grande capacité d'adsorption vis-à-vis de nombreux contaminants, notamment les polluants organiques et les métaux lourds. Cette aptitude en fait des matériaux prometteurs pour des applications environnementales, telles que le traitement des eaux usées. Leur disponibilité abondante dans les zones propices à la culture du palmier en fait une ressource renouvelable, économique et respectueuse de l'environnement, capable de remplacer les adsorbants synthétiques non biodégradables [50].

Noms vernaculaires :

- Arabe : *Nakhla*.
- Français : *Palmier*
- Anglais : *Date*.
- Italien: *Datter*.

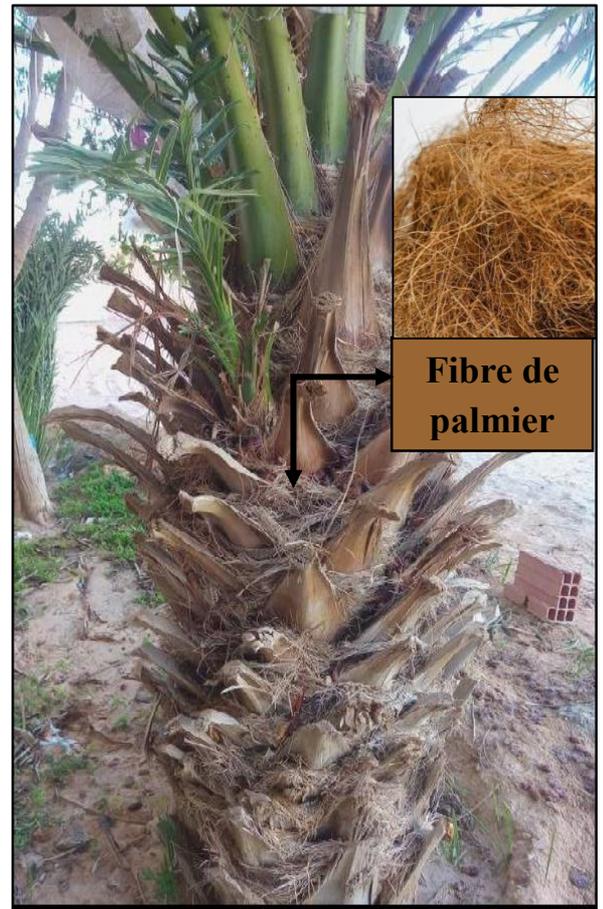


Image II-1 : Les fibres de palmier dattier

II.1.3 Préparation de charbon actif (CA)

II.1.3.1 Prétraitement

Dans une démarche de valorisation des sous-produits locaux, nous avons utilisé comme matière première les fibres de palmier issues de la gaine fibreuse du palmier dattier, collectées dans la région d'Ouargla (Sud-Est de l'Algérie). Le choix s'est porté sur la variété '*Ghars*', caractéristique de cette région.

Avant de procéder à l'activation chimique en vue de produire du charbon actif, les fibres subissent plusieurs étapes de préparation cruciales pour améliorer la structure poreuse et les propriétés adsorbantes du matériau final. Ces étapes sont décrites comme suit :

- **Lavage** : Les fibres brutes sont d'abord lavées abondamment à l'eau distillée. Cette opération vise à éliminer :
 - Les impuretés solides (poussières, sable, débris végétaux).
 - Les substances solubles (sels minéraux, composés organiques hydrosolubles).
 - Les résidus microbiens ou organiques éventuels.

Ce lavage est répété plusieurs fois jusqu'à ce que l'eau de rinçage devienne claire et limpide, signe d'un nettoyage efficace. Cela permet de garantir une matière première plus pure, ce qui est crucial pour une activation homogène.

- **Séchage** : Après le lavage, les fibres sont soigneusement égouttées, puis placées dans une étuve à 105 °C pendant plusieurs heures. Cette étape a pour but d'éliminer l'humidité résiduelle, car la présence d'eau pourrait perturber les étapes ultérieures (notamment l'activation thermique) et réduire le rendement en charbon actif.
- **Broyage** : Une fois sèches, les fibres sont broyées mécaniquement pour obtenir une granulométrie adaptée.
- **Tamissage** : Enfin, un tamissage à l'aide de tamis de différentes mailles permet de séparer les fractions granulaires des fractions fines ou pulvérulentes.

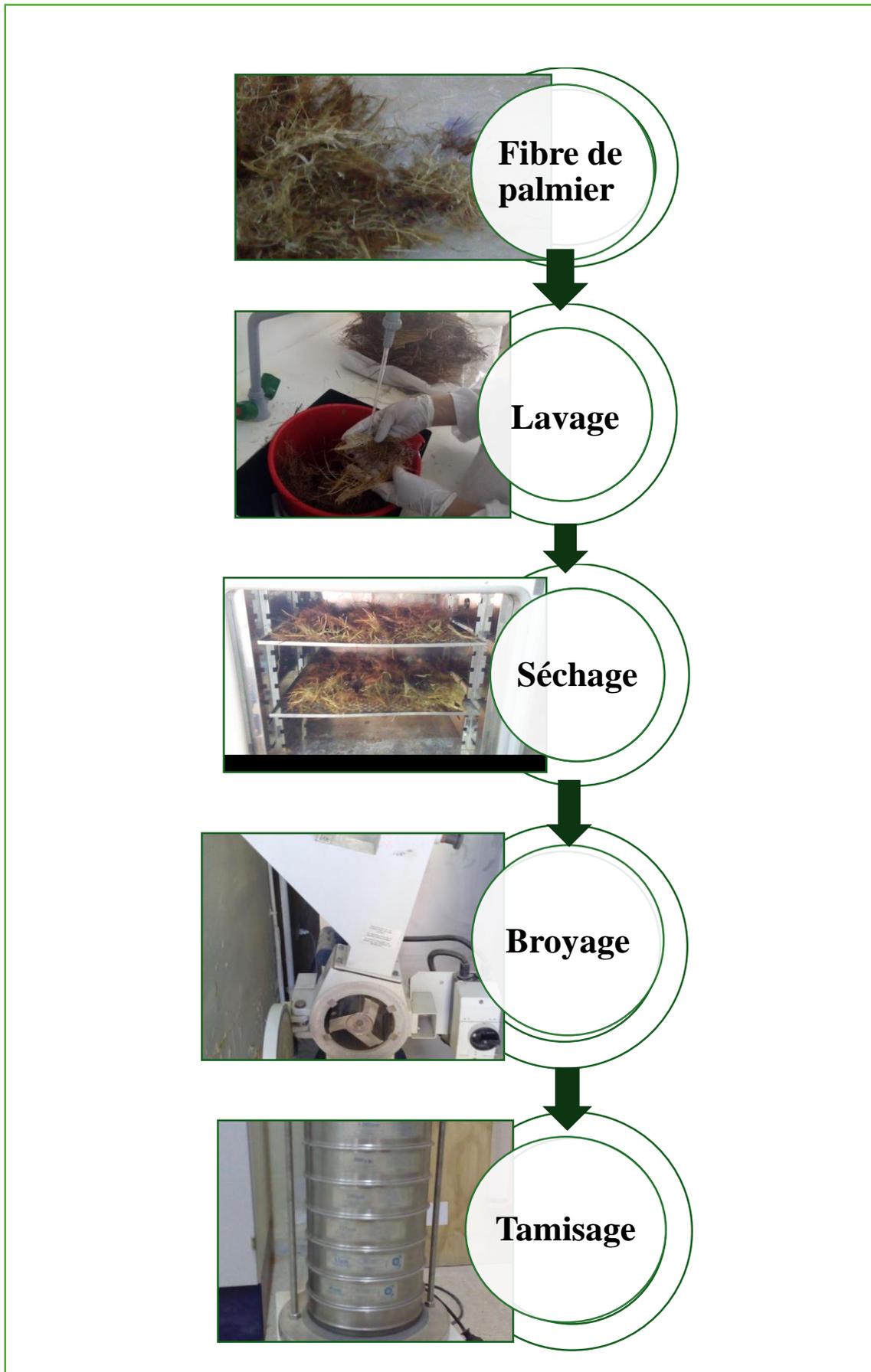


Image II-2: L'organigramme de prétraitement de la matière première

Tableau II-1: La nomenclature des fractions des particules obtenir après le tamisage des échantillons

Échantillons	1	2
Diamètres	500 μm <D<1000 μm	D = 1mm
La masse (g)	100g	100g

II.1.3.2 Activation

❖ Imprégnation avec agent activant :

L'acide phosphorique (H_3PO_4) est un oxoacide triprotique couramment utilisé comme agent d'activation en chimie des matériaux. Grâce à son caractère oxydant, il agit efficacement sur la structure des précurseurs carbonés, favorisant le développement d'une surface poreuse et fonctionnalisée. Cette modification améliore significativement la capacité d'adsorption des matériaux traités. Son emploi est particulièrement répandu dans les procédés de traitement des eaux et de dépollution organique. Par ailleurs, il joue un rôle déterminant dans la conversion des fibres végétales en charbon actif de haute performance.

Tableau II-2: Propriété de l'acide phosphorique.[51]

Propriété chimique	Acide phosphorique
Formule brute	H_3PO_4
Masse molaire (g/mol)	97.9952 \pm0.0014
Masse volumique (g/cm)	1.834 à 18 °c
pka	2.12 – 7.21 – 12.67

Mode opératoire :

L'activation chimique a été réalisée par imprégnation dans une solution d'acide phosphorique (H_3PO_4) à 50 %

❑ Quantité utilisée :

- 100 g de l'échantillon 1 immergés dans **325 ml** de H_3PO_4
- 100 g de l'échantillon 2 immergés dans **300 ml** de H_3PO_4 .

❑ Procédé :

- Mélange jusqu'à formation d'une pâte homogène.
- Activation à **25 °C pendant 24 h.**



Image II-3: L'activation

❖ Lavage :

Après l'activation, les échantillons sont filtrés puis rincés à plusieurs reprises à l'eau chaude suivie d'un lavage à l'eau distillée jusqu'à obtention d'un pH neutre (entre 6 et 7). Ensuite, ils sont séchés dans une étuve à 105°C.

II.1.3.3 Carbonisation

Les échantillons séchés sont placés dans un récipient hermétique, puis introduits dans un four à une température de 500 °C pendant 2 heures.

Cette étape permet la formation du charbon actif, en assurant l'élimination des matières volatiles et le développement de la porosité du matériau carboné, condition essentielle pour améliorer sa capacité d'adsorption.



Image II-4: La carbonisation

II.2 Méthodes de caractérisation

Pour caractériser notre charbon actif, nous avons réalisé les analyses suivantes :

- FTIR : afin d'identifier les groupements fonctionnels présents à la surface du matériau.
- Tests d'adsorption : menés en faisant varier plusieurs paramètres tels que la masse de charbon actif, la concentration de la solution, le temps de contact, le pH et la température.
- Enfin, nous avons effectué des comparaisons entre notre charbon actif et :
 - un charbon actif préparé à partir de fibres de palmier par activation physique,
 - ainsi qu'un charbon actif élaboré à partir d'une autre matière première.

II.2.1 Burn off de charbon actif

L'étape de Burn-off correspond à la diminution de la masse de la matière imprégnée par un agent chimique en raison du traitement thermique lors de l'activation.

$$\text{Burn-off \%} = \frac{(m_i - m_f)}{m_i} * 100$$

Avec :

- m_i : masse initiale de l'adsorbant exprimé en (g).
- m_f : masse finale de l'échantillon (après rinçage) exprimées en (g) [52].

II.2.2 Infrarouge (IR)

Les spectres IRTF ont été obtenus à l'aide d'un spectromètre à transformée de Fourier (FTIR), une technique efficace permettant d'identifier les groupements fonctionnels dans les composés chimiques. Cette méthode utilise un spectromètre couplé à un ordinateur numérique, qui permet de traiter les données et de tracer les spectres dans la plage allant de 4000 à 400 cm^{-1} . [52]

II.2.3 Tests d'adsorption

Le bleu de méthylène (BM) a été utilisé comme polluant modèle pour étudier les paramètres d'adsorption, notamment les isothermes, la cinétique et les mécanismes.

Le bleu de méthylène, également appelé méthylthionium, est un colorant synthétique cationique identifié pour la première fois par Heinrich Caro en 1876. Initialement conçu pour l'usage textile, ce composé a connu par la suite une large adoption dans les domaines de la recherche scientifique et de la médecine [50]. Grâce à ses propriétés colorantes, il est couramment utilisé pour la teinture de divers matériaux tels que le coton, la soie et le bois. Classé parmi les colorants organiques de masse moléculaire moyenne, le bleu de méthylène présente un risque environnemental non négligeable, notamment par son aptitude à perturber le processus de photosynthèse. [53]

Le bleu de méthylène est aussi utilisé pour évaluer l'efficacité des adsorbants comme le charbon actif, sans purification préalable [48]. Il est simplement dissous dans de l'eau distillée pour les tests d'adsorption [49]. À l'état industriel, il peut contenir des impuretés comme des métaux lourds (ex. : zinc), et présenter des risques pour la santé [50].

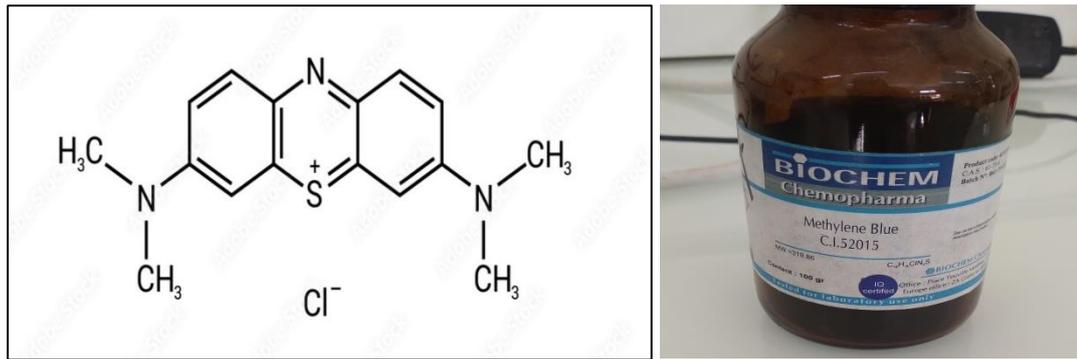


Figure II-1: Structure de la molécule du bleu de méthylène

Le tableau résume les principales caractéristiques physico-chimiques de ce colorant.

Tableau II-3: Propriétés physico-chimiques du bleu de méthylène.[54]

Dénomination	Bleu de méthylène
Appellation chimique	Chlorure de 3,7- bis (diméthylamino) Phénazathionium
Famille	Colorant basique
Formule brute	$C_{16}H_{18}ClN_3S$
Masse molaire (g/mol)	319,85
Solubilité dans l'eau (g/L) à 20°C	40
Point de fusion (°C)	190
λ_{max} (nm)	665

II.2.3.1 Préparation de solution mère

Pour bleu de méthylène, une solution mère à 1000 ppm (mg/L) a été préparée en dissolvant précisément 0,5 g du colorant solide dans une fiole jaugée de 500 mL, complétée avec de l'eau distillée jusqu'au trait. Cette solution a ensuite servi à la préparation, par dilutions successives, d'une série de solutions étalons de concentrations suivantes : (1, 2, 4, 6, 10, 20 et 30 ppm), en vue de l'établissement de la courbe d'étalonnage.

Tableau II-4: Les concentrations préparé avec les volumes de fiole.

Échantillon	1	2	3	4	5	6	7
C (ppm)	1	2	4	6	10	20	30
V de fiole (ml)	25	25	25	25	25	25	25

Pour chaque concentration, le volume nécessaire de la solution mère de Bleu de méthylène a été déterminé afin de préparer les solutions étalons par dilution.

Ces échantillons ont ensuite été analysés à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Visible (Uviline 9400 C), en mesurant l'absorbance à la longueur d'onde maximale d'absorption du Bleu de méthylène, soit $\lambda = 661 \text{ nm}$. Ces mesures ont permis de tracer la courbe d'étalonnage représentant l'absorbance en fonction de la concentration.



Image II-5: Les différentes concentrations de bleu de méthylène

Les valeurs obtenues pour l'établissement de La courbe d'étalonnage du bleu de méthylène $\lambda_{\text{max}} = 661 \text{ nm}$.

II.2.3.2 Protocole expérimental d'adsorption

Dans le cadre de cette étude, nous avons évalué plusieurs paramètres influençant le phénomène d'adsorption, notamment : la masse de l'adsorbant, la concentration initiale du colorant, le pH du milieu, la durée de contact, ainsi que la température.

II.2.3.2.1 Effet de la masse de l'adsorbant

L'effet de la masse sur l'adsorption a été étudié en faisant varier la quantité d'adsorbant utilisée, tout en maintenant constante la concentration initiale du colorant Bleu de méthylène à 10 mg/L . Un volume fixe de 20 ml de solution a été mis en contact avec différentes masses d'adsorbant ($10, 20, 30, 40, 50$ et 60 mg), durant 1 heure sous agitation à 250 tr/min , à température ambiante ($25 \text{ }^\circ\text{C}$).

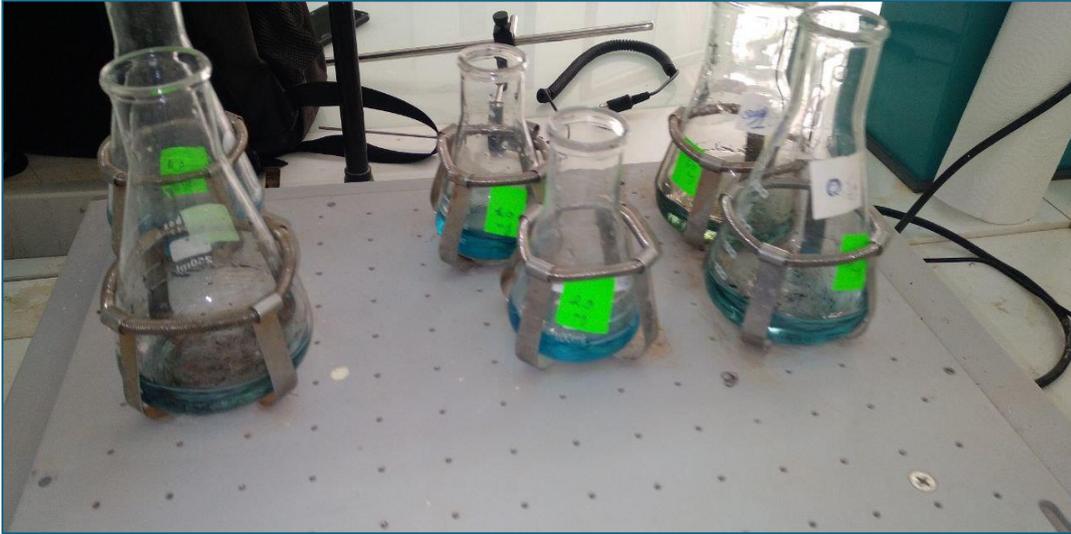


Image II-6: Procédure expérimentale d'adsorption pour la détermination de la quantité de matière adsorbée.

II.2.3.2.2 Effet de la concentration initiale du colorant

L'étude a été réalisée en faisant varier la concentration initiale de Bleu de méthylène selon les valeurs suivantes : 5, 10, 15, 20, 25 et 30 mg/L, avec un volume constant de 25 ml pour chaque solution. Les masses d'adsorbant utilisées étaient de 40 mg pour l'échantillon CAF_{c1} et 50 mg pour CAF_{c2}, conformément aux quantités optimales déterminées précédemment. Les essais ont été effectués à 25 °C, sous agitation à 250 tr/min pendant 1 heures, afin d'assurer un contact suffisant entre la solution et les fibres adsorbants.

II.2.3.2.3 Effet du temps de contact sur l'adsorption

L'expérience a été réalisée en maintenant la concentration initiale du Bleu de méthylène à 10 mg/L, pour un volume fixe de 25 ml. Les masses optimales d'adsorbant ont été utilisées : 40 mg pour CAF_{c1} et 50 mg pour CAF_{c2}. Les temps de contact étudiés ont été : 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 65, 70, 75 minutes. L'agitation a été maintenue à 250 tr/min, à 25 °C, pour garantir un bon mélange et favoriser le contact entre les molécules de colorant et les fibres adsorbants.

II.2.3.2.4 Effet de pH

Dans cette expérience, l'effet du pH a été étudié en ajustant la valeur du pH de la solution de Bleu de méthylène à l'aide de solutions de NaOH et de HCl . Les valeurs de pH testées étaient : 2, 4, 6, 8, 10 et 12. Les expériences ont été réalisées avec une concentration initiale de 10 mg/L de colorant, un volume de 25 ml, et des masses d'adsorbant de 40 mg pour

l'échantillon CAF_{c1} et 50 mg pour CAF_{c2}. Le temps de contact utilisé était celui optimal déterminé pour chaque échantillon et L'agitation a été maintenue à 250 tr/min à 25 °C.

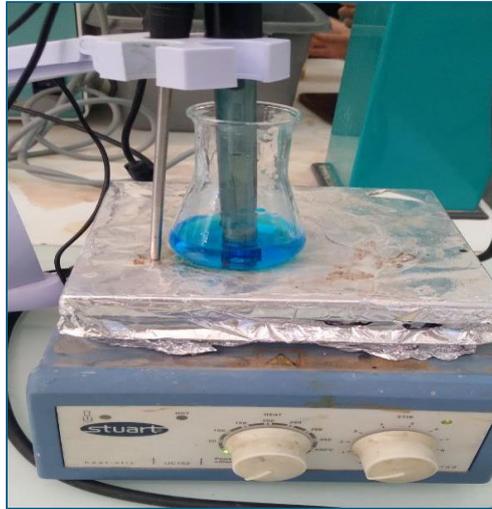


Image II-7: Procédure expérimentale d'adsorption pour l'analyse de l'effet du pH.

II.2.3.2.5 Effet de température

La température est un paramètre thermodynamique qui peut influencer à la fois la vitesse et le mécanisme d'adsorption. Elle agit sur la mobilité des molécules en solution, la diffusion vers la surface de l'adsorbant, et la nature des interactions physico-chimiques impliquées.

L'effet de la température sur l'adsorption du Bleu de méthylène a été étudié à cinq températures différentes : 25, 30, 35, 40 et 45 °C. Les autres conditions expérimentales ont été maintenues constantes.

Chapitre III : Résultats et discussion

III.1 Caractérisation

III.1.1 Burn off de charbon actif

Tableau III-1: Les valeurs de Burn-off pour les deux charbons actifs

Charbon actif	CAF _{c1}	CAF _{c2}
Burn off %	78.77	80.52

Ce Burn-off important suggère une dégradation thermique plus prononcée de la biomasse d'origine, ce qui peut affecter négativement la structure poreuse et l'efficacité du matériau adsorbant

III.1.2 Infrarouge (IR)

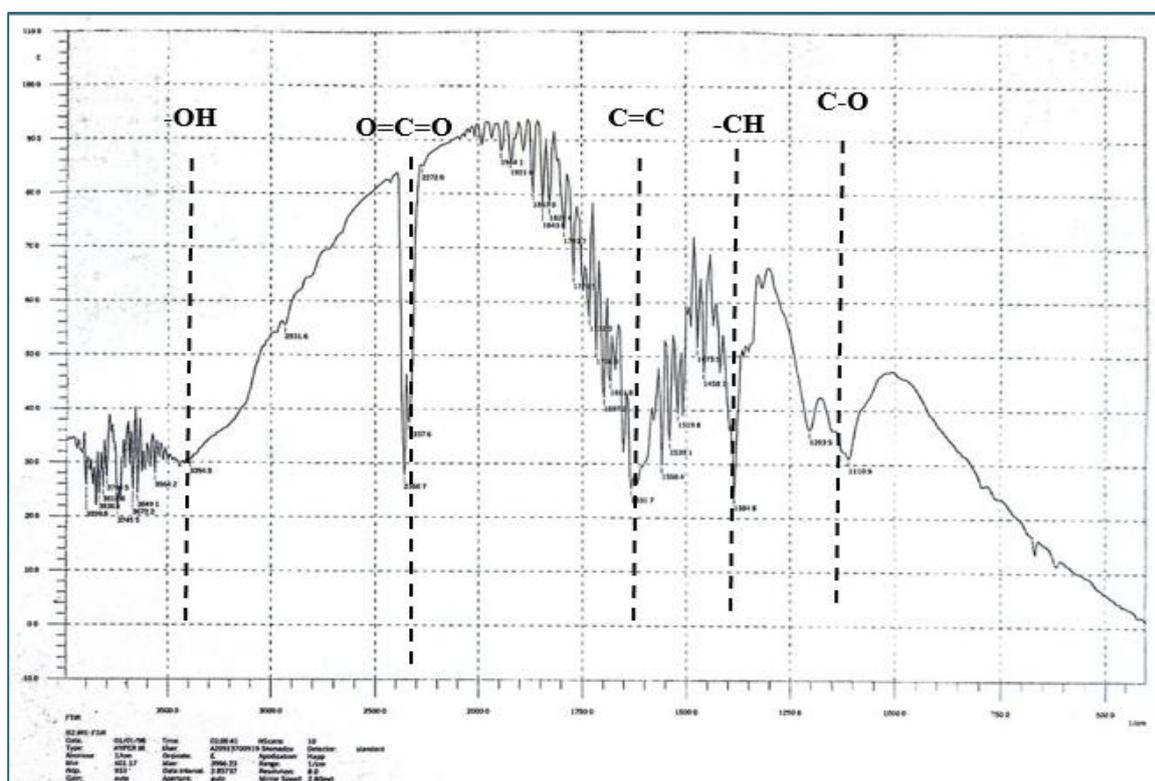


Figure III-1: Le FT-IR du charbon actif issu de fibres de palme.

Analyse des résultats

Le spectre infrarouge (IR) du charbon actif issu de fibres de palme révèle plusieurs bandes caractéristiques permettant d'identifier les groupes fonctionnels présents à la surface du matériau.

- Une large bande autour de 3400 cm^{-1} correspond à la vibration des liaisons O-H, indiquant la présence probable de groupes hydroxyles, liés à des alcools ou acides carboxyliques.
- Une bande visible vers 2350 cm^{-1} est attribuée au dioxyde de carbone (CO_2), généralement dû à une contamination atmosphérique.
- La bande autour de 1600 cm^{-1} correspond aux vibrations des liaisons C=C, suggérant la présence de structures aromatiques ou de liaisons doubles dans le réseau carboné.
- La bande située près de 1450 cm^{-1} est due aux vibrations de liaisons C-H, typiques des groupes alkyles résiduels.
- Une bande intense aux environs de 1100 cm^{-1} est associée à la liaison C-O, indiquant la présence de groupes fonctionnels oxygénés tels qu'alcools, phénols ou esters.

Le spectre montre que le charbon actif obtenu à partir des fibres de palme contient divers groupes oxygénés (OH, C=O, C-O), ainsi que des structures aromatiques, ce qui est typique d'un matériau carboné ayant subi une activation thermique ou chimique. Ces groupes fonctionnels jouent un rôle important dans les propriétés d'adsorption du charbon actif.

III.2 Tests d'adsorption

III.2.1 Courbe d'étalonnage

Tableau III-2 : L'absorbance des différentes concentrations de BM

Échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8
C (ppm)	0	1	2	4	6	10	20	30
Abs (nm)	0	0.127	0.331	0.454	0.739	1.543	2.336	3.003

On trace la courbe d'étalonnage $f(C) = \text{abs}$

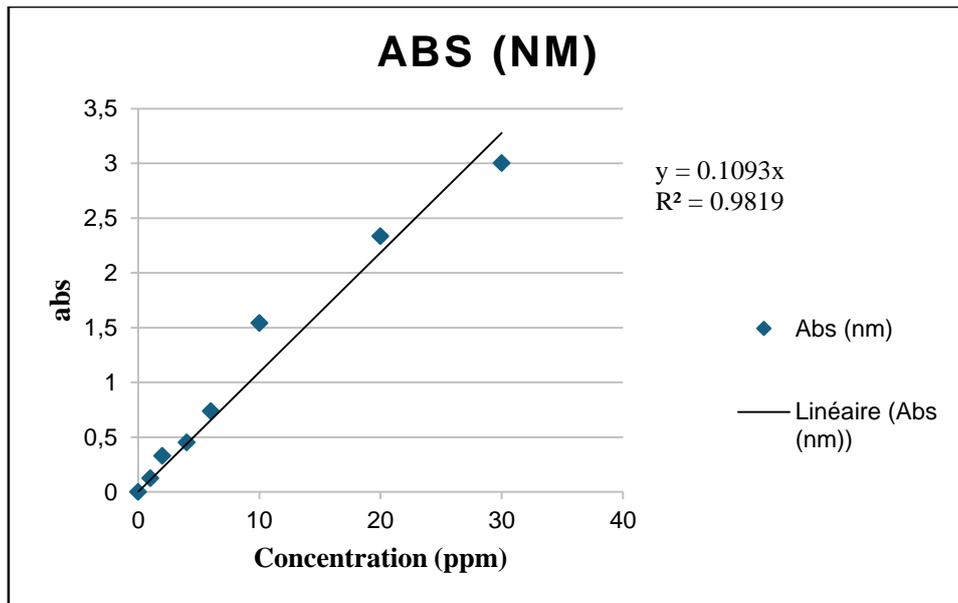


Figure III-2: La courbe d'étalonnage du bleu de méthylène.

L'équation de la droite d'étalonnage représentant l'absorbance en fonction de la concentration du Bleu de méthylène est : $A = 0.1093 \times C$, avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0.9819$, indiquant un bon ajustement linéaire des données expérimentales.

Cette équation permet de déterminer la concentration en Bleu de méthylène (C), à partir de l'absorbance mesurée (A), selon la relation suivante :

$$C_e = \frac{\text{abs}}{0.1093}$$

où :

- C_e : concentration en Bleu de méthylène (ppm),
- A : absorbance mesurée à la longueur d'onde d'analyse (nm).

La capacité d'adsorption du colorant bleu de méthylène a été calculée en utilisant la formule suivante :

$$q_t = \frac{(C_0 - C_e)}{m} \times V$$

Où :

- q_t : Capacité d'adsorption à l'équilibre en (mg/g) ;
- C_0 et C_e sont les concentrations en phase liquide (mg/l) de BM au début et à l'équilibre, respectivement ;
- V : Volume de la solution en (mL) ;

- **m** : Masse de l'adsorbant en (g).

Ou encore par la détermination du taux d'élimination du colorant, noté R et exprimé en pourcentage (%), il est défini par :

$$R(\%) = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100$$

Où :

- **R (%)** : Rendement d'adsorption ou taux d'élimination du colorant (BM) en (%) ;
- **C₀** : Concentration initiale de l'adsorbat en (mg/L) ;
- **C_t** : Concentration de l'adsorbat au temps t en (mg/L) ;

III.2.2 Effet de la masse de l'adsorbant

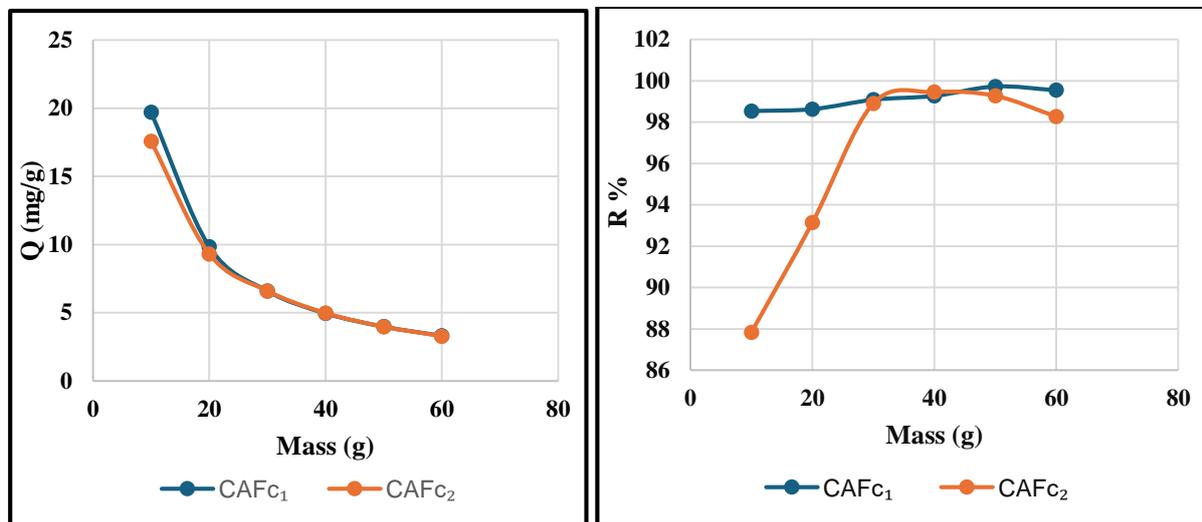


Figure III-3: L'effet de masse sur l'adsorption du bleu de méthylène.

Analyse des résultats

Les résultats montrent que pour l'échantillon CAF_{c1}, la quantité optimale d'adsorbant est de 40 mg, tandis que pour l'échantillon CAF_{c2}, une meilleure performance d'adsorption est atteinte à 50 mg. Ces différences peuvent être attribuées aux propriétés physiques des fibres, telles que leur porosité et la taille des pores, qui influencent directement la capacité d'adsorption.

Les résultats expérimentaux montrent que l'efficacité d'adsorption augmente avec la masse d'adsorbant, jusqu'à atteindre une valeur optimale au-delà de laquelle l'adsorption se stabilise. Cette tendance peut être attribuée à une augmentation du nombre de sites actifs disponibles pour l'adsorption du colorant. Toutefois, au-delà d'une certaine masse,

l'augmentation de l'efficacité devient négligeable, probablement en raison d'un phénomène de saturation ou d'un chevauchement des particules.

III.2.3 Effet de la concentration initiale du colorant

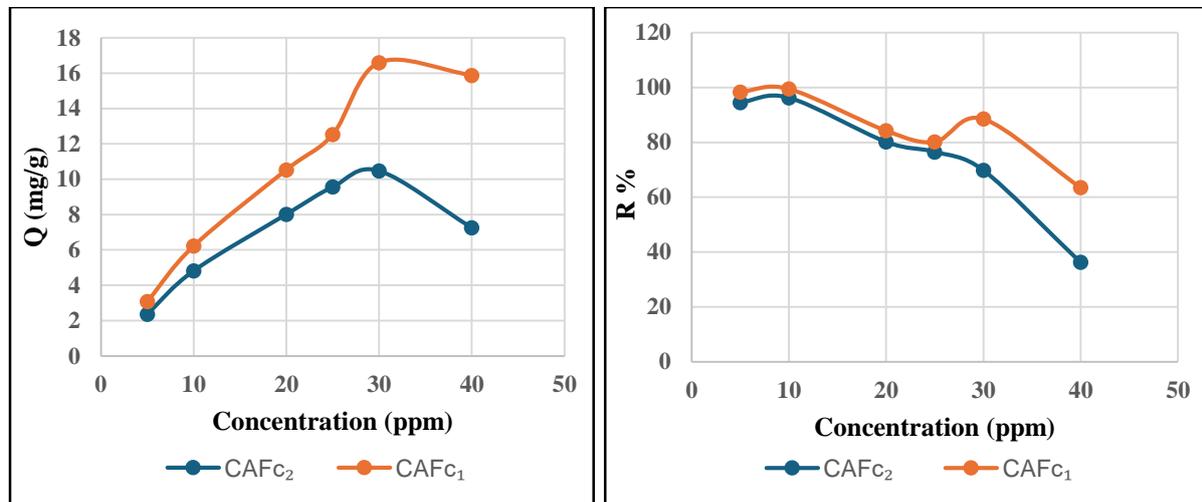


Figure III-4: L'effet de concentration sur l'adsorption du bleu de méthylène.

La concentration initiale du colorant (notée C_0) représente la quantité de polluant présente dans la solution avant le processus d'adsorption. Ce paramètre est crucial car il influence le gradient de concentration entre la phase liquide et la surface de l'adsorbant.

Analyse des résultats

L'analyse des résultats montre que le charbon activé présente un bon rendement d'adsorption aux faibles concentrations du colorant, atteignant un maximum à 10 ppm. Cette concentration correspond au point où la majorité des sites actifs en surface sont encore disponibles pour interagir avec les molécules de Bleu de méthylène. Au-delà de cette concentration, une diminution progressive du taux d'adsorption est observée, ce qui s'explique probablement par la saturation des sites actifs.

Cette tendance est visible pour les deux échantillons, mais le CAF_{c1} affiche une efficacité supérieure, notamment à faible concentration, ce qui souligne sa meilleure capacité d'interaction avec le colorant

III.2.4 Effet du temps de contact sur l'adsorption

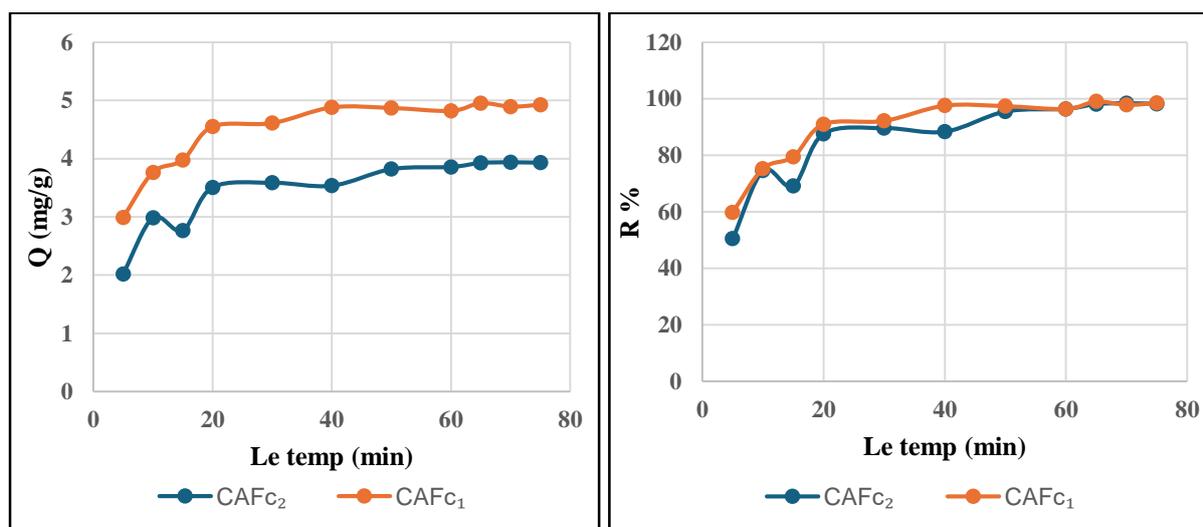


Figure III-5: L'effet du temps de contact sur l'adsorption du bleu de méthylène.

Le temps de contact correspond à la durée pendant laquelle l'adsorbant est mis en contact avec la solution contenant le polluant. Ce paramètre permet d'évaluer la cinétique d'adsorption, c'est-à-dire la vitesse à laquelle le système atteint l'équilibre entre le colorant en solution et celui adsorbé sur le matériau.

Analyse des résultats

Les résultats montrent une augmentation progressive de la capacité d'adsorption en fonction du temps, jusqu'à atteindre un plateau, signe que l'équilibre est atteint. Pour l'échantillon CAF_{c1} , la meilleure adsorption a été observée à 40 minutes, au-delà de laquelle la quantité adsorbée se stabilise. Pour l'échantillon CAF_{c2} , l'équilibre est atteint plus tardivement, vers 65 minutes.

Cette différence de temps d'équilibre peut s'expliquer par la structure interne des deux adsorbants.

III.2.5 Effet de pH

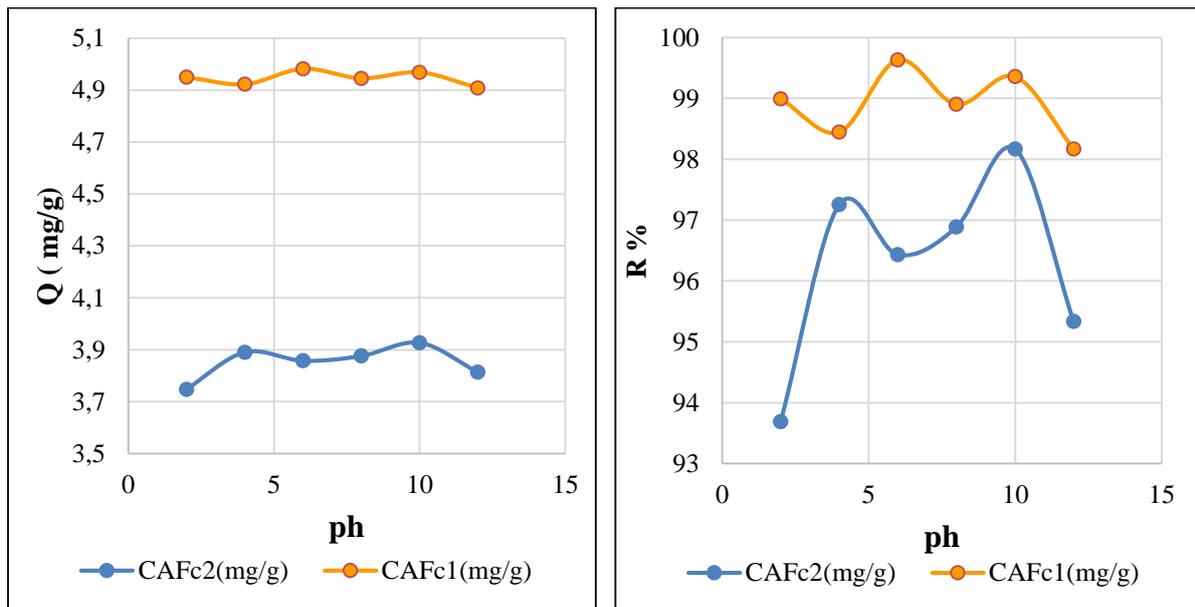


Figure III-6: L'effet de pH sur l'adsorption du bleu de méthylène.

Analyse des résultats

L'analyse des courbes montre que : Pour CAF_{c1}, la capacité d'adsorption maximale a été atteinte à un pH de 6. Et Pour CAF_{c2}, l'adsorption optimale a été observée à un pH de 10.

Les courbes montrent que l'effet du pH sur l'adsorption était faible pour les deux matériaux, car la quantité d'adsorption (Q) restait presque constante avec le changement de pH, le CAF_{c1} surpassant clairement le CAF_{c2} à toutes les valeurs. En ce qui concerne le taux d'élimination (R %), une certaine fluctuation a été observée, en particulier pour CAF_{c2}, qui a obtenu les meilleures performances dans la plage de pH 6 à 10, tandis que CAF_{c1} a maintenu une efficacité d'élimination élevée et constante dépassant 98% sur différentes valeurs de pH. Dans l'ensemble, ces résultats indiquent que le CAF_{c1} présente une stabilité et une efficacité d'adsorption élevées vis-à-vis du bleu de méthylène, quel que soit le changement d'acidité, ce qui le rend plus adapté à diverses applications.

III.2.6 Effet de température

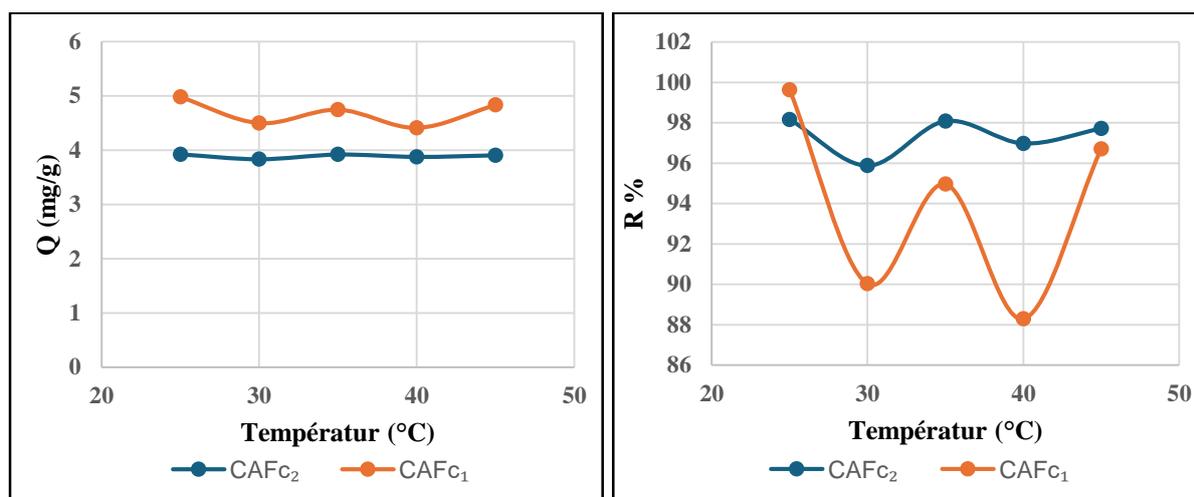


Figure III-7: L'effet de T sur l'adsorption du bleu de méthylène.

Analyse des résultats

Les résultats montrent que la capacité d'adsorption est maximale à 25 °C pour les deux échantillons, puis diminue progressivement avec l'augmentation de la température.

Cette tendance suggère que le processus d'adsorption est exothermique, c'est-à-dire qu'il libère de la chaleur. Lorsque la température augmente, les interactions entre le colorant et les sites actifs de l'adsorbant deviennent moins favorables.

III.2.7 Modèles d'adsorption

Afin d'interpréter les résultats expérimentaux, deux modèles isothermes d'adsorption, ceux de Langmuir et de Freundlich, ont été appliqués. L'adéquation de ces modèles au processus d'adsorption étudié a été évaluée à partir des valeurs du coefficient de corrélation (R^2).

III.2.7.1 Modèle de Langmuir

Le diagramme de Langmuir pour l'adsorption BM sur le charbon actif CAF_{c1} et CAF_{c2} à 25°C est présenté dans la figure III-9.

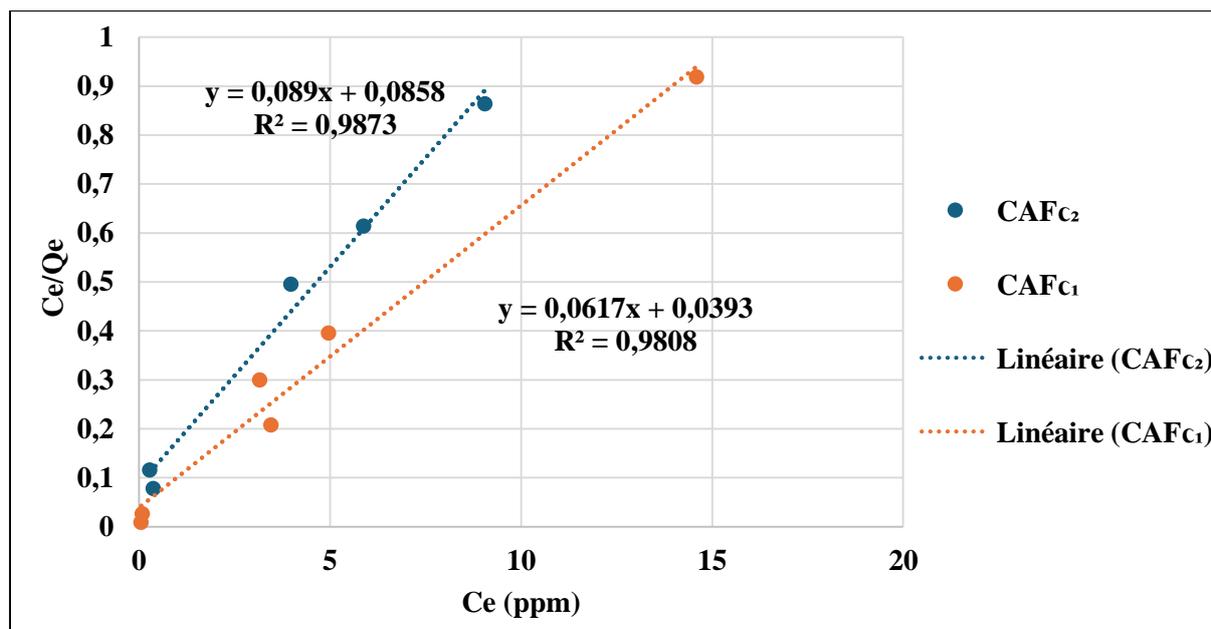


Figure III-8: Diagramme de Langmuir pour l'adsorption de BM sur charbon actif CAF_{c1} et CAF_{c2} à 25°C.

Les résultats obtenus pour les équations isothermes de Langmuir de BM sont répertoriés dans le tableau III-5.

Tableau III-3: Paramètres obtenus à partir de l'isotherme de Langmuir du bleu de méthylène sur CAF_{c1} et CAF_{c2} à 25°C.

Adsorbant	Isothermes de Langmuir			
	q_{\max} (mg/g)	b (l/mg)	K_L	R^2
CAF _{c1}	16.20746	0.0393	1.569975	0.9808
CAF _{c2}	11.23596	0.0858	1.037296	0.9873

Le modèle de Langmuir fournit des paramètres essentiels tels que K_L , la constante d'équilibre d'adsorption, liée à l'énergie libre d'adsorption et reflétant l'affinité entre la surface adsorbant et le bleu de méthyle (BM). Il permet également de déterminer la capacité maximale d'adsorption (q_{\max}), correspondant à la quantité de bleu de méthyle nécessaire pour former une monocouche à la surface du matériau. Une couverture complète est atteinte lorsque tous les sites d'adsorption disponibles sont occupés.

Les valeurs de q_{\max} , obtenues à partir du modèle de Langmuir pour l'adsorption du bleu de méthyle (BM), sont de 16,20746 mg·g⁻¹ pour CAF_{c1} et de 11,23596 mg·g⁻¹ pour CAF_{c2}.

Les constantes d'équilibre K_L , également issues du modèle de Langmuir, sont respectivement de 1,569975 pour CAF_{c1} et de 1,037296 pour CAF_{c2} . Étant toutes deux supérieures à 1 ($K_L > 1$), ces valeurs indiquent une adsorption défavorable.

III.2.7.2 Modèle de Freundlich

Le diagramme de Freundlich pour l'adsorption BM sur le charbon actif CAF_{c1} et CAF_{c2} à 25°C est présenté dans la figure III.

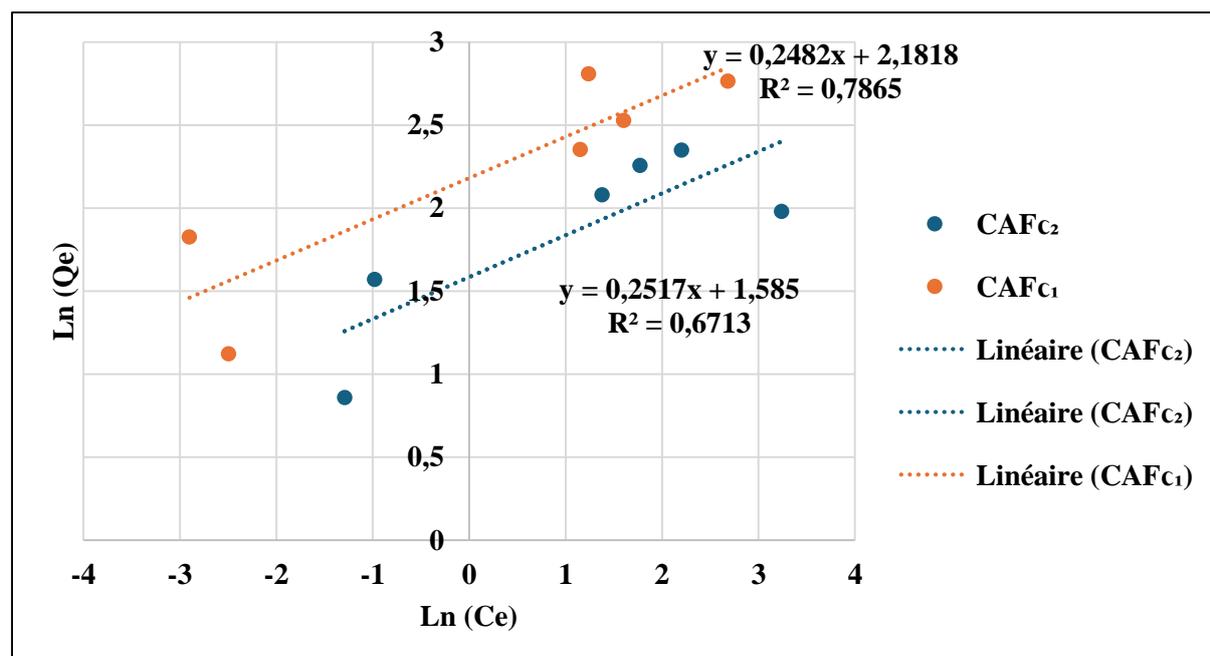


Figure III-9: Diagramme de Freundlich pour l'adsorption de BM sur charbon actif CAF_{c1} et CAF_{c2} à 25°C.

Les résultats obtenus pour les équations isothermes de Freundlich de BM sont répertoriés dans le tableau III.

Tableau III-4: Paramètres obtenus à partir de l'isotherme de Freundlich du bleu de méthylène sur CAF_{c1} et CAF_{c2} à 25°C.

Adsorbant	Isothermes de Freundlich		
	n	$K_f [(mg/g) (l/mg)^{1/n}]$	R^2
CAF_{c1}	4.029009	8.862244	0.7865
CAF_{c2}	3.972984	4.879291	0.6713

De manière générale, pour qu'un adsorbant soit considéré comme efficace selon le modèle de Freundlich, la valeur du paramètre n doit se situer entre 1 et 10. Dans le cas du bleu

de méthyle (BM), les valeurs de n obtenues sont de 4,029009 pour CAF_{c1} et de 3,972984 pour CAF_{c2}. Ces résultats, avec $n > 1$, indiquent que l'adsorption du BM sur les deux types de charbon actif est favorable.

Les résultats obtenus montrent que le modèle de Freundlich est le plus favorable pour décrire l'adsorption du bleu de méthylène, contrairement au modèle de Langmuir, qui s'est avéré moins adapté. Cela indique que l'adsorption ne se déroule pas en monocouche sur une surface homogène, comme le suppose Langmuir, mais plutôt sur une surface hétérogène, avec des sites d'adsorption de différentes énergies, conformément au modèle de Freundlich. Ainsi, dans les conditions expérimentales, l'adsorption est influencée par la variabilité énergétique et la distribution non uniforme des sites actifs à la surface du charbon actif.

III.2.8 Cinétique d'adsorption

Afin d'analyser le taux d'adsorption et le mécanisme d'adsorption possible du MB sur des échantillons de charbon actif, les modèles « pseudo-premier ordre et pseudo-second ordre » ont été appliqués aux données d'adsorption.

III.2.8.1 Le modèle du pseudo-premier ordre

Diagramme de pseudo-premier ordre pour l'adsorption du bleu de méthylène sur le charbon actif CAF_{c1} et CAF_{c2} à 25°C sont présentées dans la figure III, et leurs constantes sont données dans le tableau III.

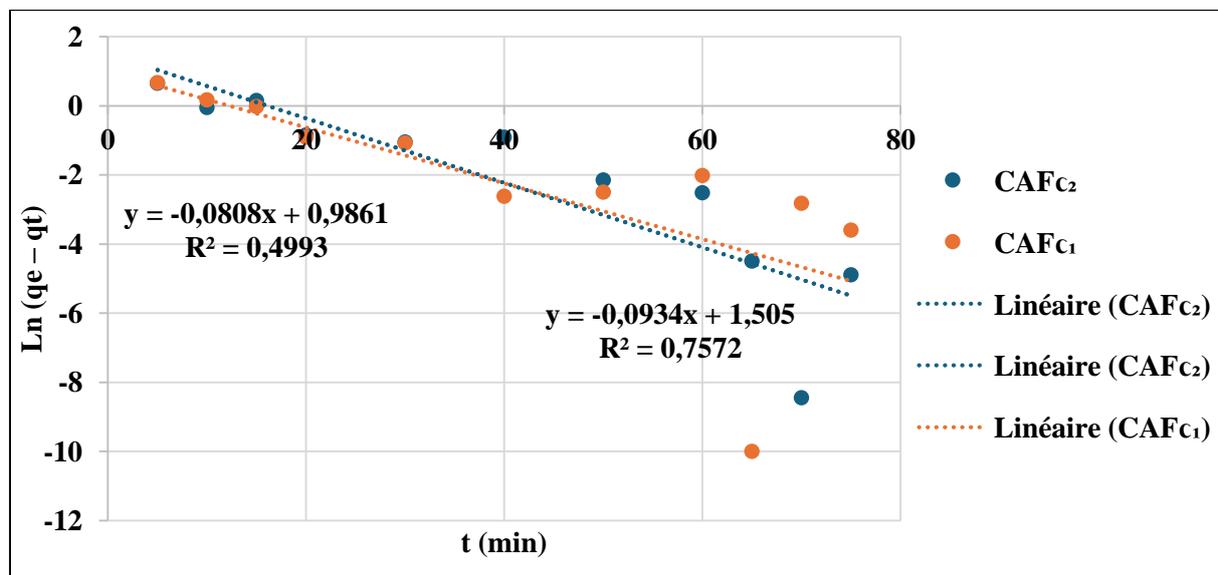


Figure III-10: Diagramme de pseudo-premier ordre pour l'adsorption du BM sur CAF_{c1} et CAF_{c2} à 25 °C

Les résultats obtenus pour les Constantes d'adsorption de pseudo-premier ordre du bleu de méthylène répertorié dans le Tableau III.

Tableau III-5: Constantes d'adsorption de pseudo-premier ordre du BM sur des CAFc1, CAFc2 à 25°C.

Adsorbant	Pseudo-premier ordre			
	$Q_{e,exp}$ (mg/g)	$Q_{e,cal}$ (mg/g)	K_1	R^2
CAF _{c1}	4.9543	2.680759	0.0808	0.4993
CAF _{c2}	3.938	4.504154	0.0934	0.7572

D'après les données du tableau III, l'ajustement au modèle cinétique du pseudo-premier ordre a été évalué pour les échantillons CAF_{c1} et CAF_{c2}. Pour CAF_{c1}, la capacité d'adsorption expérimentale ($Q_{e,exp}$) est nettement inférieure à la capacité calculée ($Q_{e,cal}$), avec un coefficient de corrélation R^2 de seulement 0,4993. En ce qui concerne CAF_{c2}, un R^2 de 0,7572 a été obtenu, bien que les résultats pour CAF_{c2} indiquent un meilleur ajustement que pour CAF_{c1}, les valeurs de R^2 restent insuffisantes pour conclure à une bonne concordance avec ce modèle. Ces résultats suggèrent que le modèle du pseudo-premier ordre ne décrit pas de manière satisfaisante le mécanisme d'adsorption du bleu de méthylène, notamment pour CAF_{c1}.

III.2.8.2 Le modèle du pseudo-second ordre

Diagramme de pseudo-second ordre pour l'adsorption du bleu de méthylène sur le charbon actif CAF_{c1} et CAF_{c2} à 25°C sont présentées dans la figure III, et leurs constantes sont données dans le tableau III.

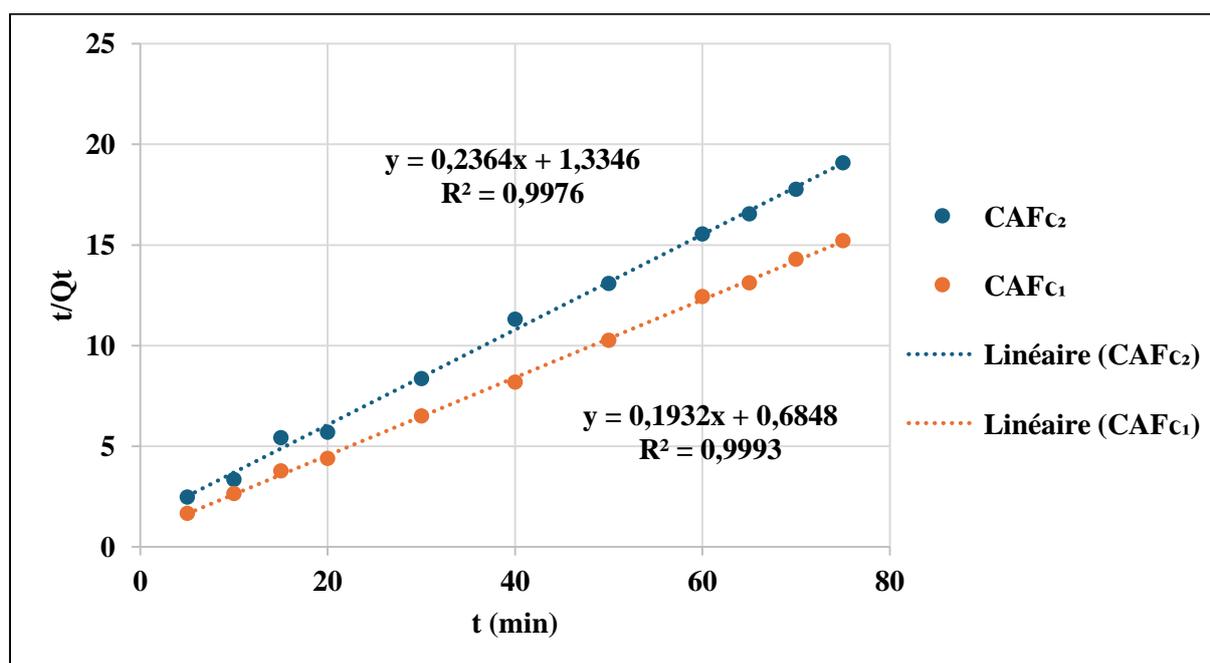


Figure III-11: Diagramme de pseudo-second ordre pour l'adsorption du BM sur CAF_{c1} et CAF_{c2} à 25 °C.

Les résultats obtenus pour les Constantes d'adsorption de pseudo-seconde ordre du bleu de méthylène répertorié dans le Tableau III.

Tableau III-6: Constantes d'adsorption de pseudo-second ordre du BM sur des CAF_{c1}, CAF_{c2} à 25°C.

Adsorbant	Pseudo-second ordre			
	Q _{e.exp} (mg/g)	Q _{e.cal} (mg/g)	K ₂	R ²
CAF _{c1}	4.9543	5.175983	0.054507	0.9993
CAF _{c2}	3.938	4.230118	0.041874	0.9976

D'après le tableau III, l'ajustement au modèle cinétique du pseudo-second ordre a été évalué pour les échantillons CAF_{c1} et CAF_{c2}, avec des résultats très satisfaisants, le coefficient de corrélation R² des CAF_{c1} et CAF_{c2}, est respectivement de 0.9993 et 0.9976 pour le bleu de méthylène. Il convient de noter qu'il s'agit d'excellentes valeurs souhaitables. Ces valeurs élevées de R² et la faible différence entre les capacités calculées et expérimentales confirment que le modèle du pseudo-second ordre décrit de manière très satisfaisante le processus d'adsorption bleu de méthylène sur les deux types de charbon actif.

Ces observations renforcent également le constat selon lequel le modèle du pseudo-premier ordre n'est pas adapté à ce système, contrairement au modèle du pseudo-second ordre, qui semble refléter fidèlement le mécanisme cinétique impliqué.

III.2.9 Thermodynamique de l'adsorption

Tableau III-7: Constantes thermodynamiques d'adsorption pour l'adsorption du bleu de méthylène (MB) sur des charbons actifs

	Ln(K _a) (L/g)	T en K	ΔH° (kJ·mol ⁻¹)	ΔS° (J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹)	ΔG° (kJ·mol ⁻¹)
CAF _{c1}	3,07	298,15	-2372,78	15,08742	-6871,1
	2,23	303,15			-6946,53
	3,02	308,15			-7097,41
	2,55	313,15			-7097,41
	2,84	318,15			-7172,84
CAF _{c2}	4,91	298,15	-75109,5	-222,786	-8685,88
	1,51	303,15			-7571,95
	2,24	308,15			-6458,02
	1,33	313,15			-5344,09

	2,69	318,15			-4230,16
--	------	--------	--	--	----------

Analyse des résultats

Les résultats thermodynamiques montrent que l'adsorption du bleu de méthylène sur les deux charbons activés, ACFc1 et ACFc2, est spontanée à toutes les températures étudiées, comme en témoignent les valeurs négatives de ΔG° .

Pour ACFc1, l'adsorption est modérément exothermique ($\Delta H^\circ < 0$) avec un ΔS° positif, ce qui suggère une augmentation du désordre à l'interface solide/liquide.

En revanche, ACFc2 présente une adsorption fortement exothermique avec un ΔH° très négatif et un ΔS° négatif, traduisant un processus plus ordonné. Ainsi, bien que les deux matériaux soient efficaces, les mécanismes d'interaction avec le colorant diffèrent selon leur structure de surface.

III.2.10 Étude comparative

L'objectif de cette section est d'évaluer l'efficacité comparative des différents échantillons de charbon actif obtenus à partir de matières premières végétales, notamment des fibres de palmier et de Rhamnacées, avant et après carbonisation, ainsi que selon différents diamètres. Cela se fait en comparant les résultats de nos échantillons avec des échantillons obtenus dans des études précédentes. Les résultats sont exprimés en termes de rendement d'adsorption (R%) du bleu de méthylène, mesuré à température ambiante (25 °C), pH 6 ou 10 selon les essais, à différentes tailles de particules et temps de contact.

- **Présentation des échantillons étudiés**

Les échantillons ont été classés en deux groupes selon leur diamètre :

Série 1:

- BF_{c1} : Fibre palmier brut (500 < D < 1000 μm)
- CAF_{c1} : Fibre palmier carbonisé (500 < D < 1000 μm)
- RB_P : Rhamnacées brutes (200 < D < 500 μm)
- RC_P : Rhamnacées carbonisées (200 < D < 500 μm)
- CAF_{ph4} : Fibres de palmier activées physiquement et carbonisées (45 < D < 125 μm)

Le tableau ci-dessous représente les conditions opératoires et les résultats obtenus :

Tableau III-8: Résultats de la comparaison entre les différents échantillons – Série 1

	T °C	PH	t	C ₀	m	V	abs	Q	R
--	------	----	---	----------------	---	---	-----	---	---

BF _{c1}	25	6	40	10	40	20	0.173	4.2086	84.172
CAF _{c1}	25	6	40	10	40	20	0.004	4.981702	99.63403
RB _P	25	6	40	10	40	20	0.139	4.364135	87.28271
RC _P	25	6	40	10	40	20	0.014	4.935956	98.71912
CAF _{ph4}	25	6	40	10	40	20	0.248	3.865508	77.31016

Les résultats sont donnant le rendement sous forme de courbe :

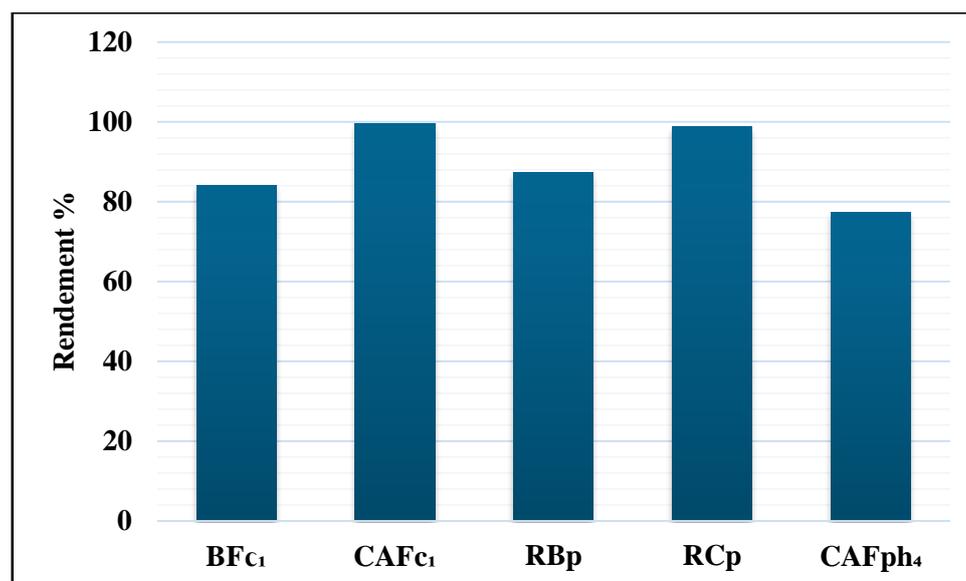


Figure III-12: Comparaison des rendement % de différentes échantillons - Série 1

Série 2 :

- BF_{c2} : fibre de palmier brut (D = 1 mm)
- CAF_{c2} : palmier carbonisé (D = 1 mm)
- RB_G : Rhamnacées brutes (1 < D < 2 mm)
- RC_G : Rhamnacées carbonisées (1 < D < 2 mm)
- CAF_{ph2} : fibres de palmier activées physiquement et carbonisées (250 < D < 500 μm)

Le tableau ci-dessous représente les conditions opératoires et les résultats obtenus :

Tableau III-9: Résultats de la comparaison entre les différents échantillons – Série 2

	T °C	pH	t	c0	m	V	abs	Q	R
BF _{c2}	25	10	65	10	50	20	0.199	3.271729	81.79323
CAF _{c2}	25	10	65	10	50	20	0.02	3.926807	98.17017
RB _G	25	10	65	10	50	20	0.722	1.357731	33.94328
RC _G	25	10	65	10	50	20	0.565	1.932296	48.30741

ACF _{ph2}	25	10	65	10	50	20	0.39	2.572736	64.31839
--------------------	----	----	----	----	----	----	------	----------	----------

Les résultats sont donnant le rendement sous forme de courbe :

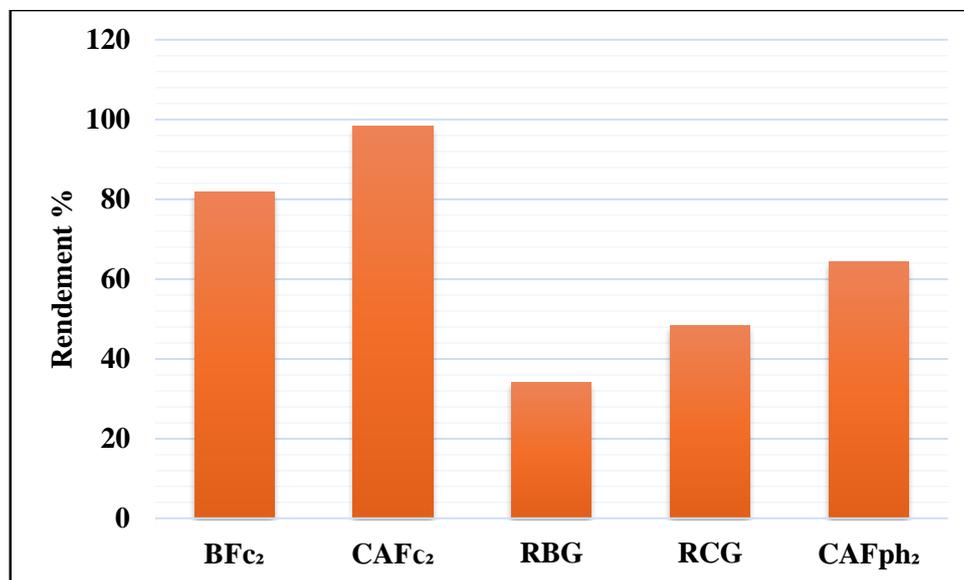


Figure III-13: Comparaison des rendement % de différentes échantillons - Série 2

Analyse des performances d'adsorption

- Dans la série 1 (temps de contact de 40 minutes) :

Le rendement le plus élevé est observé avec CAF_{c1} (99.63 %), suivi de RC_P (98.71 %) et RB_P (87.28 %).

BF_{c1} affiche un rendement respectable de 84.17 %, tandis que CAF_{ph4}, malgré sa fine granulométrie, montre un rendement plus faible (77.31 %). Cela peut être dû à un effet de diffusion limité ou à une saturation rapide des sites actifs à cette échelle.

- Dans la série 2 (temps de contact de 65 minutes) :

CAF_{c2} reste le plus performant avec un rendement de 98.17 %, suivi de BF_{c2} (81.79 %). En revanche, les échantillons issus des Rhamnacées (RB_G et RC_G) présentent des rendements significativement plus faibles, respectivement 33.94 % et 43.86 %. CAF_{ph2}, avec une granulométrie intermédiaire, affiche un rendement modéré de 64.31 %.

Les résultats montrent une nette amélioration du rendement d'adsorption suite à la carbonisation des matériaux bruts. Dans les deux séries, les charbons activés (CAF_{c1}, CAF_{c2}, RC_P, RC_G) présentent des rendements plus élevés que leurs équivalents bruts (BF_{c1}, BF_{c2}, RB_P, RB_G, RC_G).

RB_G). Cela s'explique par l'augmentation de la surface spécifique et du nombre de sites actifs générés au cours de la carbonisation.

En outre, les résultats ont révélé que le charbon activé chimiquement à partir de fibres de palmier présente une efficacité d'adsorption supérieure à celle du charbon activé physiquement.

Par ailleurs, il a été observé que les échantillons présentant un diamètre de particules plus petit montrent une efficacité d'adsorption plus élevée que ceux à diamètre plus grand. Cette différence de performance peut s'expliquer par le fait que la réduction de la taille des particules augmente la surface spécifique disponible pour l'adsorption, favorise une meilleure diffusion du colorant vers les sites actifs internes, et réduit la résistance au transfert de masse.

✦ **Interprétation globale**

L'analyse spectroscopique infrarouge (FTIR) des échantillons de charbon a révélé la présence de groupes fonctionnels variés tels que $-\text{OH}$, $\text{C}=\text{O}$, $\text{C}=\text{C}$, $-\text{CH}$ et CO_2 .

Après avoir étudié plusieurs paramètres tels que la masse de l'adsorbant, le pH, la température et le temps de contact, on peut conclure que le charbon préparé dans cette étude montre une efficacité remarquable, ce qui en fait un matériau prometteur pour les applications d'élimination des colorants en milieu aqueux par adsorption

L'étude des isothermes a montré que le modèle de Freundlich s'ajuste le mieux aux résultats expérimentaux, indiquant une adsorption favorable, de nature hétérogène et multicouches. En parallèle, les données cinétiques concordent avec le modèle du pseudo-deuxième ordre, ce qui implique que le processus d'adsorption est principalement contrôlé par des interactions chimiques (chimisorption) entre le colorant et les sites actifs.

De plus, l'étude thermodynamique a révélé que l'adsorption est spontanée, endothermique, et accompagnée d'une augmentation du désordre, confirmant que le processus est favorisé à haute température.

Les résultats expérimentaux ont également démontré que la carbonisation des biomasses améliore considérablement la performance d'adsorption par rapport aux matériaux bruts. Cette amélioration est attribuée à une augmentation de la surface spécifique, une porosité développée et une génération de nouveaux sites actifs favorisant l'interaction avec les molécules de colorant.

L'effet de la granulométrie a été manifeste, puisque les échantillons de plus petit diamètre ont présenté une capacité d'adsorption supérieure, due à une meilleure accessibilité aux pores, une surface de contact accrue, et une diffusion facilitée.

Enfin, en comparant les différentes méthodes d'activation, il a été constaté que le charbon activé chimiquement possède une efficacité d'adsorption nettement meilleure que celui activé physiquement. Ceci est dû à une structure poreuse plus développée et à une concentration plus élevée en groupes fonctionnels actifs.

Conclusion général

Dans cette étude, nous avons élaboré du charbon actif à partir de fibres de palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*, variété *Ghars*), activé chimiquement à l'acide phosphorique (H_3PO_4) puis carbonisé à 500 °C. Ce matériau a été évalué pour son efficacité à adsorber le Bleu de Méthylène en solution aqueuse. Les échantillons ont été caractérisés par spectroscopie infrarouge (FT-IR) et étudiés sous divers paramètres opératoires afin de mieux comprendre les mécanismes d'adsorption.

La caractérisation des échantillons à travers plusieurs méthodes nous a donné les résultats suivants :

- L'analyse FTIR a révélé la présence de groupes fonctionnels $-OH$, $C=O$, $C=C$, $-CH$ et CO_2 , favorables à l'adsorption du colorant.
- Le taux de burn-off est élevé pour les deux échantillons, atteignant 78,77 % pour CAF_{c1} et 80,52 % pour CAF_{c2} , traduisant une carbonisation efficace et un développement important de la porosité.
- La masse optimale d'adsorbant est de 40 mg pour CAF_{c1} et de 50 mg pour CAF_{c2} , ce qui s'explique par les différences de porosité et de surface spécifique.
- L'adsorption maximale a été observée à une faible concentration de 10 ppm pour les deux échantillons.
- La capacité d'adsorption augmente avec le temps de contact jusqu'à atteindre un plateau, traduisant l'établissement de l'équilibre. Cet équilibre est atteint après 40 minutes pour CAF_{c1} et après 65 minutes pour CAF_{c2} .
- Le pH optimal est de 6 pour CAF_{c1} et de 10 pour CAF_{c2} .
- La température optimale pour l'adsorption est de 25 °C pour les deux échantillons, avec une diminution de rendement à des températures plus élevées.
- Le modèle cinétique du pseudo-second ordre décrit le mieux les données expérimentales, suggérant un mécanisme d'adsorption chimique.
- Le modèle d'isotherme de Freundlich s'ajuste également bien aux résultats, indiquant une adsorption favorable, multi-couche et sur surface hétérogène.
- Globalement, l'échantillon CAF_{c1} a montré une performance d'adsorption supérieure à celle de CAF_{c2} , confirmant son efficacité accrue.

En termes de structure, la carbonisation a significativement amélioré la capacité d'adsorption. Il a été observé que les échantillons de plus petite taille présentent une efficacité

d'adsorption plus élevée, grâce à une meilleure accessibilité aux sites actifs internes. Par ailleurs, l'activation chimique des fibres s'est révélée plus efficace que l'activation physique.

Les résultats obtenus confirment que le charbon actif préparé à partir de fibres de palmier présente une efficacité remarquable dans l'adsorption du Bleu de Méthylène, ce qui en fait un matériau prometteur pour des applications environnementales.

Sa haute performance, sa disponibilité naturelle et son faible coût en font un adsorbant durable, adapté au traitement des eaux usées, à la dépollution industrielle, à la filtration de l'air, ainsi qu'à des usages biomédicaux après validation.

Il est donc recommandé de poursuivre les recherches en optimisant les conditions de préparation, d'évaluer sa régénération, et de réaliser des essais à plus grande échelle afin de valider son potentiel d'application à l'échelle industrielle.

Références bibliographiques

- [1] T. Rana *et al.*, “Toxic effects of pulp and paper-mill effluents on male reproductive organs and some systemic parameters in rats,” *Environ. Toxicol. Pharmacol.*, vol. 18, no. 1, pp. 1–7, Sep. 2004, doi: 10.1016/J.ETAP.2004.04.005.
- [2] A. Sennaoui *et al.*, “Étude de l’adsorption du Bleu de Méthylène sur un biomatériau à base de Cactus (Adsorption study of Methylene Blue on biomaterial using cactus),” *Artic. J. Mater. Environ. Sci.*, vol. 6, no. 2, pp. 397–406, 2015, Accessed: May 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/282050335>
- [3] S. Rangabhashiyam, N. Anu, and N. Selvaraju, “Sequestration of dye from textile industry wastewater using agricultural waste products as adsorbents,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 1, no. 4, pp. 629–641, Dec. 2013, doi: 10.1016/J.JECE.2013.07.014.
- [4] H. M. Al-Swaidan and A. Ahmad, “Synthesis and Characterization of Activated Carbon from Saudi Arabian Dates Tree’s Fronds Wastes”.
- [5] N. Bouguedoura, M. Bennaceur, S. Babahani, and S. E. Benziouche, “Date palm status and perspective in Algeria,” *Date Palm Genet. Resour. Util. Vol. 1 Africa Am.*, pp. 125–168, Jan. 2015, doi: 10.1007/978-94-017-9694-1_4.
- [6] D. Chapman, “Water Quality Assessments : A guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring, Second Edition,” *Water Qual. Assessments*, Dec. 2021, doi: 10.1201/9781003062103.
- [7] J. Albaigés, “Environmental organic chemistry , 3rd edition,” *Int. J. Environ. Anal. Chem.*, vol. 97, no. 4, pp. 398–399, 2017, Accessed: Mar. 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.wiley.com/en-us/Environmental+Organic+Chemistry%2C+3rd+Edition-p-9781118767238>
- [8] K. C. Jones and P. De Voogt, “Persistent organic pollutants (POPs): state of the science,” *Environ. Pollut.*, vol. 100, no. 1–3, pp. 209–221, Jan. 1999, doi: 10.1016/S0269-7491(99)00098-6.
- [9] N. Kania, “Utilisations de charbons actifs dans des procédés d’adsorption de Composés Organiques Volatils et des procédés de catalyse dans l’eau .,” *Thèse de l’Université d’Artois*, pp. 1–152, 2010.
- [10] T. Hytef, “Adsorption de trichlorophénol par une dolomie modifiée,” p. 76, 2019.
- [11] G. CRINI, P.-M. BADOT, and N. MORIN-CRINI, “Traitement des eaux par du chitosane : intérêts et méthodes,” *Innov. Technol.*, Feb. 2019, doi: 10.51257/A-V2-RE126.
- [12] “T. Daoud, Bio sorption Simultanée du Plomb et du... - Google Scholar.” Accessed: Mar. 09, 2025. [Online]. Available: https://scholar.google.fr/scholar?hl=fr&as_sdt=0%2C5&q=T.+Daoud%2C+Bio+sorption+Simultanée+du+Plomb+et+du+Fer+sur+une+Biomasse+Morte+«+La+Streptomyces+Rimosus+»%2C+Ecole+nationale+polytechnique+-ENP-+10+avenue+Hassan+Badi%2C+El-Harrach+-Alger%2C+2007.&btnG=
- [13] K. Mohanty, D. Das, and M. N. Biswas, “Adsorption of phenol from aqueous solutions using activated carbons prepared from *Tectona grandis* sawdust by ZnCl₂ activation,” *Chem. Eng. J.*, vol. 115, no. 1–2, pp. 121–131, Dec. 2005, doi: 10.1016/J.CEJ.2005.09.016.
- [14] R. Calvet, M. Tercé, and J. C. Arvieu, “Mise au point bibliographique - Adsorption des pesticides par les sols et leurs constituants,” *Ann. Agron.*, vol. 31, no. 4, pp. 385–427, 1980, doi: 10.34894/VQ1DJA.

- [15] N. Mahmood Aljamali, D. Abdul Baqi Aldujaili, and I. Obaid Alfatlawi, "Physical and Chemical Adsorption and its Applications," *Int. J.*, vol. 7, no. 2, pp. 1–8, 2021, doi: 10.37628/IJTCK.
- [16] "Repository | Ecole Nationale Polytechnique: Elimination du bleu de méthylène par adsorption sur des coquilles de noix et de cacahuètes activées par voie chimique." Accessed: Mar. 10, 2025. [Online]. Available: <https://repository.enp.edu.dz/jspui/handle/123456789/9556>
- [17] O. Nourah, "Decontamination des eaux contenant les colorants textiles et les adjuvants par des matériaux naturels et synthétique," *Mem. magister, Univ. Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou*, p. 151, 2011.
- [18] I. Suffet and M. McGuire, "Activated carbon adsorption of organics from the aqueous phase," 1980.
- [19] A. Ramesh, D. J. Lee, and J. W. C. Wong, "Thermodynamic parameters for adsorption equilibrium of heavy metals and dyes from wastewater with low-cost adsorbents," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 291, no. 2, pp. 588–592, Nov. 2005, doi: 10.1016/J.JCIS.2005.04.084.
- [20] "Etude De La Cinétique Et Isotherme D'adsorption De Bleu De Méthylène Sur Les Nanotubes D'halloysites." Accessed: Mar. 11, 2025. [Online]. Available: <https://theses-algerie.com/2825842014445378/memoire-de-master/universite-djilali-bounaama-khemismiliana/etude-de-la-cinetique-et-isotherme-dadsorption-de-bleu-de-methylene-sur-les-nanotubes-dhalloysites>
- [21] M. De L' and E. Supérieur, "REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE MAGISTER EN CHIMIE".
- [22] E. Roberts Alley *et al.*, *Water Quality Control Handbook*. Avignon, France: McGraw-Hill Education, 2007. doi: 10.1036/0071467602.
- [23] D. Sidiras, F. Batzias, E. Schroeder, R. Ranjan, and M. Tsapatsis, "Dye adsorption on autohydrolyzed pine sawdust in batch and fixed-bed systems," *Chem. Eng. J.*, vol. 171, no. 3, pp. 883–896, Jul. 2011, doi: 10.1016/J.CEJ.2011.04.029.
- [24] J. H. de Boer and B. C. Lippens, "Studies on pore systems in catalysts II. The shapes of pores in aluminum oxide systems," *J. Catal.*, vol. 3, no. 1, pp. 38–43, Feb. 1964, doi: 10.1016/0021-9517(64)90090-9.
- [25] N. H. S. H. Salah, "Etude de la dégradation photocatalytique de polluants organiques en présence de dioxyde de titane, en suspension aqueuse et en lit fixe," Jun. 2012, doi: 10.34894/VQ1DJA.
- [26] "Zur Theorie der sogenannten Adsorption gelöster Stoffe - Lagergreen, S., (Bihang A. K. Svenske Vet. Ak. Handl. 24, II. Nr. 4, S. 49; 1899; Z. physik. Ch. 32, 174-75; 1900.)," *Zeitschrift für Chemie und Ind. der Kolloide*, vol. 2, no. 1, p. 15, Jul. 1907, doi: 10.1007/BF01501332/METRICS.
- [27] Y. S. Ho and G. McKay, "Pseudo-second order model for sorption processes," *Process Biochem.*, vol. 34, no. 5, pp. 451–465, Jul. 1999, doi: 10.1016/S0032-9592(98)00112-5.
- [28] W. J. Weber Jr. and J. C. Morris, "Kinetics of Adsorption on Carbon from Solution," *J. Sanit. Eng. Div.*, vol. 89, no. 2, pp. 31–59, Apr. 1963, doi: 10.1061/JSEDAI.0000430.
- [29] R. Baccar Ep Yanguï, M. Sarrà i Adroguer, and P. Blánquez Cano, "Removal of water pollutants by adsorption on activated carbon prepared from olive-waste cakes and by biological treatment using ligninolytic fungi," 2014, Accessed: May 21, 2025. [Online]. Available: <https://ddd.uab.cat/record/126934>
- [30] F. EDELINÉ, "L'épuration physico-chimique des eaux. Théorie et technologie. I," *Trib. du*

- CEBEDEAU*, vol. 37, no. 486, pp. 217–226, 1984.
- [31] A. Bonilla-Petriciolet, D. I. Mendoza-Castillo, and H. E. Reynel-Ávila, “Adsorption processes for water treatment and purification,” *Adsorpt. Process. Water Treat. Purif.*, pp. 1–256, Jul. 2017, doi: 10.1007/978-3-319-58136-1.
- [32] R. Qadeer Abdul Hameed Rehan, R. Qadeer, and A. Hameed REHAN, “A Study of the Adsorption of Phenol by Activated Carbon from Aqueous Solutions,” *Turkish J. Chem.*, vol. 26, no. 3, pp. 357–362, Jan. 2002, doi: -.
- [33] A. NEFZAOU, “Contribution à la rentabilité de l’oléiculture par la valorisation optimale des sous-produits,” *Olivae (Ed. Fr.)*, vol. 4, no. 19, pp. 17–28, 1987.
- [34] S. M. Lamine, “Étude des propriétés adsorbantes des charbons activés issus des noyaux de dattes. Application au traitement d’effluent aqueux,” p. 98, 2013.
- [35] A. E. H. BENARIMA and M. R. KOUADRI, “Préparation et caractérisation d’un charbon actif à partir de coquilles d’œufs,” 2017, Accessed: Mar. 13, 2025. [Online]. Available: <http://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/15319>
- [36] B. Roufaida, C. Samiha, M. Ahmed, L. Habiba, and O. Amira, “Etude de l’efficacité adsorbante du charbon actif issue des déchets,” 2021.
- [37] B. Khalaoui, “Adsorption des polluants organiques par les charbons actifs,” *Mem. Master*, 2020.
- [38] F. Rodríguez-Reinoso and M. Molina-Sabio, “Activated carbons from lignocellulosic materials by chemical and/or physical activation: an overview,” *Carbon N. Y.*, vol. 30, no. 7, pp. 1111–1118, Jan. 1992, doi: 10.1016/0008-6223(92)90143-K.
- [39] F. Rodríguez-Reinoso and M. Molina-Sabio, “Textural and chemical characterization of microporous carbons,” *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 76–77, pp. 271–294, Jul. 1998, doi: 10.1016/S0001-8686(98)00049-9.
- [40] J. Wu and D. D. L. Chung, “Increasing the electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon fiber polymer-matrix composite by using activated carbon fibers,” *Carbon N. Y.*, vol. 40, pp. 445–467, 2002.
- [41] “Activated Carbon.” Accessed: Mar. 15, 2025. [Online]. Available: <https://www.lenntech.fr/produits/charbon-actif.htm>
- [42] D. Tadjia, “Étude de la préparation d’un charbon actif a partir des grains d’olives et application sur des rejets industriels,” 2011.
- [43] F. Stüber, J. Font, A. Fortuny, C. Bengoa, A. Eftaxias, and A. Fabregat, “Carbon materials and catalytic wet air oxidation of organic pollutants in wastewater,” *Top. Catal.*, vol. 33, no. 1–4, pp. 3–50, Apr. 2005, doi: 10.1007/S11244-005-2497-1/METRICS.
- [44] R. C. Mackenzie, “Nomenclature in Thermal Analysis,” *J. Macromol. Sci. Part A - Chem.*, vol. 4, no. 4, pp. 1015–1020, 1970, doi: 10.1080/00222337008060995/ASSET//CMS/ASSET/C95284A1-C570-4778-9191-169DB400BEDE/00222337008060995.FP.PNG.
- [45] “Élimination du colorant orange II en solution aqueuse, par voie photochimique et par adsorption.” Accessed: Mar. 15, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/361004370_Elimination_du_colorant_orange_II_en_solution_aqueuse_par_voie_photochimique_et_par_adsorption
- [46] U. Mohamed Khider -biskra, “REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTERE DE L’ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE Spécialité : Génie Civil Présentée par : TAALLAH Bachir ETUDE DU

COMPORTEMENT PHYSICO-MECANIQUE DU BLOC DE TERRE COMPRIMÉE AVEC FIBRES”.

- [47] K. Al-Kaabi, A. Al-Khanbashi, and A. Hammami, “NATURAL FIBER REINFORCED COMPOSITES FROM DATE PALM FIBERS,” 2004.
- [48] S. Fadlaoui, “Application de la technique de modélisation de l’architecture du palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) pour la caractérisation des cultivars.,” 2017.
- [49] “Rowell, R.M., Han, J.S. and Rowell, J.S. (2000) Characterization and Factors Effecting Fiber Properties. In Frollini, E., Leo, A.L. and Mattoso, L.H.C., Eds., *Natural Polymers and Agrofibers Composites*, Sn Carlos, Brazil, 115-134. - References - Scientific Research Publishing.” Accessed: Apr. 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2688396>
- [50] “Taallah, B., Guettala, A. and Kriker, A. (2014) Effet de la Teneur en Fibres de Palmier Dattier et de la Contrainte de Compactage sur les Propriétés des Blocs de Terre Comprimée. *Materials Science, Courrier du Savoir*, 18, 45-51. - References - Scientific Research Publishing.” Accessed: Apr. 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2773626>
- [51] C. Louis and J. Bessière, “Étude physico-chimique des solutions concentrées en acide phosphorique par voie électrochimique. Propriétés acido-basiques et oxydo-réductrices,” <https://doi.org/10.1139/v85-151>, vol. 63, no. 4, pp. 908–916, Apr. 2011, doi: 10.1139/V85-151.
- [52] S. Ouikene and N. Chemeur, “Etude comparative entre un adsorbant utilisé à la station de traitement des eaux de Taksebt et des adsorbants préparés à base de grignon d’olive,” 2015. Accessed: Jun. 30, 2025. [Online]. Available: <https://dspace.ummo.dz/handle/ummo/2607>
- [53] A. Achour, “Etude des performances des mortiers renforcés de fibres naturelles : valorisation des plantes locales,” p. 116, 2017.
- [54] A. Solutions *et al.*, “Etude de l’adsorption du bleu de methylene (bm) a partir des solutions aqueuses sur un biosorbant prepare a partir des noyaux de datte algerienne,” pp. 135–148, 2016.

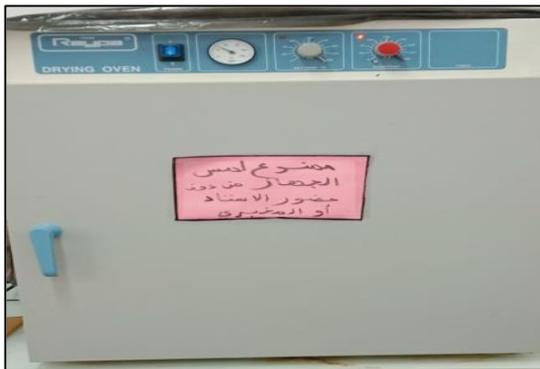
Annexe



Annexe 1: broyeur



Annexe 2: Tamiseur



Annexe 3: Etuve



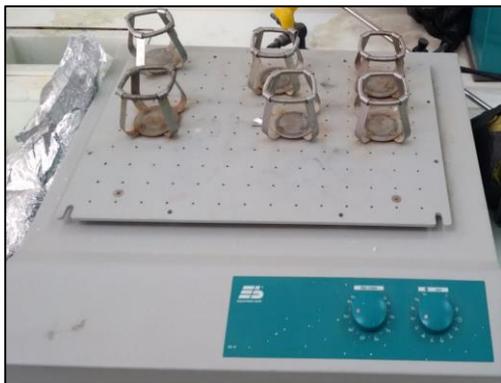
Annexe 4: Balance



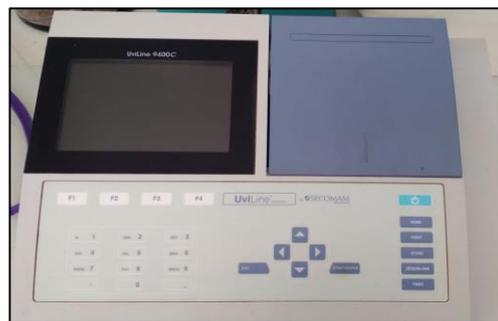
Annexe 5: Four



Annexe 6: centrifugation



Annexe 7: incubateur



Annexe 8: UV-visible



Annexe 9: Plaque chauffante



Annexe 10: Infrarouge a transformé de Fourier (FTIR) spectromètre



Annexe 11: pH-mètre

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique
جامعة غرداية

Faculté des sciences et Technologie
Département génie Des procédés



كلية العلوم والتكنولوجيا قسم
هندسة الطرائق

Université de Ghardaïa

Autorisation d'impression finale d'un mémoire de master

	Nom et prénom	Signature
Examineur 1	FENNICHE Fares	
Examineur 2	BENCHIEKH Salah Eddine	 Dr: BENCHEIKH Salaheddine
Encadreur	BEN TARFA Djehad	
Co-encadreur	//	//

Soussigne Mr : RAACHE Imane

Président de jury des étudiant (s) : DJEBRIT Ikram

BOUDJERADA Bouchra

Filière : Génie des procédés ; Spécialité : Génie chimique

**Thème : Élimination d'un polluant organique par adsorption sur charbon actif
préparé à partir des fibres de palmier dattier**

Autorise-le (s) étudiant (s) mentionné (s) ci-dessus à imprimer et déposer leur (s) manuscrit final
au niveau du département.

Ghardaïa le :01/07/2025

Le président de jury

Le chef de département