

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

People's Democratic Republic of Algeria

Ministry of Higher Education And Scientific Research
University Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم

Faculty of Sciences and Technology
Department of Process Engineering
Ref :...../U.M/F.S.T/2026

كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم هندسة الطرائق
رقم :..... / ج.م.ك.ع.ت // 2026

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : INDUSTRIES PÉTROCHIMIQUES

Option: GÉNIE PÉTROCHIMIQUE

THÈME

Élaboration et caractérisation d'un nanoadsorbant pour l'élimination
d'un polluant organique en vue de la protection de l'environnement

Présenté par

- 1- M^r EL KARACHI Mouhamed Moustaph
- 2- M^{elle} ELY BRAHIM Soukeina

Soutenu le 09 /06/ 2026 devant le jury composé de :

Présidente :	Mme MEKIBES Zohra	MCB	Université de Mostaganem
Examinatrice :	Mme DOUARA Nadia	MCA	Université de Mostaganem
Rapporteur :	Mr TERMOUL Mourad	MCA	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2025/2026

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents,

Pour leur amour, leur patience, leurs sacrifices et leurs encouragements constants tout au long de mon parcours. Aucun mot ne saurait exprimer ma profonde gratitude et ma reconnaissance envers eux. Que Dieu les protège et les récompense pour tout ce qu'ils ont fait pour moi.

À ma famille,

Pour son soutien moral, sa confiance et ses précieux conseils qui m'ont accompagné durant toutes mes années d'études.

À mes amis,

Pour leur aide, leur présence et les moments de partage qui ont rendu ce parcours plus agréable.

À tous mes enseignants,

Qui ont contribué à ma formation et à l'acquisition de mes connaissances.

Enfin, à toute personne ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

**Je dédie ce mémoire avec respect, gratitude et
reconnaissance**

Remerciements

Remerciements

Avant tout, nous remercions Allah le Tout-Puissant de nous avoir donné la santé, la patience et le courage nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadrant, Dr TERMOUL Mourad, pour son accompagnement, sa disponibilité, ses conseils précieux et ses orientations scientifiques tout au long de la réalisation de ce mémoire. Ses remarques constructives et son soutien constant ont grandement contribué à l'aboutissement de ce travail.

Nous adressons également nos sincères remerciements aux membres du jury Dr MEKIBES Zohra et DOUARA Nadia pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer ce travail et pour l'intérêt qu'ils lui portent.

Nous remercions chaleureusement l'ensemble du personnel du Laboratoire de Génie Chimique pour leur accueil, leur aide et leur disponibilité durant la période expérimentale.

Nous exprimons une reconnaissance particulière à M^{elle} K. Khadidja pour son aide précieuse, sa gentillesse et ses conseils qui nous ont été d'un grand soutien tout au long de ce travail.

Nous adressons également nos sincères remerciements à Melle Khaled Ikram et Melle Djaâfri Yasmine pour leur disponibilité, leur soutien, leur aide précieuse et leur contribution durant la réalisation de ce travail.

Nos remerciements les plus sincères vont également à M. Yeslem Saleh, que nous considérons comme un grand frère, pour son soutien, son encouragement permanent et son aide précieuse durant la réalisation de la partie expérimentale.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

À tous, nous adressons nos plus sincères remerciements et notre profonde gratitude.

الملخص

تتناول هذه الدراسة إزالة صبغة الأخضر المالاكيت من المحاليل المائية باستعمال تقنية الامتزاز على الفحم المنشط التجاري (CAC) والفحم المنشط المعدل بجسيمات الفضة النانوية (CAM). تم تحضير الفحم المنشط المعدل عن طريق تشريبه بنترات الفضة ثم اختزال أيونات الفضة باستعمال بوروهيدريد الصوديوم. تم تقييم أداء المادتين من خلال دراسة تأثير عدة عوامل تشغيلية تشمل زمن التماس، وكتلة الممتز، ودرجة الحموضة، والتركيز الابتدائي للصبغة، ودرجة الحرارة. أظهرت النتائج أن الفحم المنشط المعدل يمتلك قدرة امتزاز أعلى مقارنة بالفحم المنشط التجاري. كما ساهمت الدراسات الحركية ونماذج الاتزان في فهم آلية امتزاز صبغة الأخضر المالاكيت على المواد المدروسة.

الكلمات المفتاحية: الامتزاز، الأخضر المالاكيت، الفحم المنشط التجاري، جسيمات الفضة النانوية، معالجة المياه.

Abstract

This study focuses on the removal of malachite green from aqueous solutions by adsorption using commercial activated carbon (CAC) and silver nanoparticle-modified activated carbon (CAM). The modified activated carbon was prepared by silver nitrate impregnation followed by chemical reduction using sodium borohydride. The adsorption performance of both materials was evaluated by studying the effects of contact time, adsorbent dosage, pH, initial dye concentration, and temperature. The results showed that the modified activated carbon exhibited a higher adsorption capacity than the commercial activated carbon. Kinetic and adsorption isotherm studies provided a better understanding of the adsorption mechanism of malachite green on the investigated materials.

Keywords: Adsorption, Malachite green, Activated carbon, Silver nanoparticles, Water treatment.

Résumé

Cette étude porte sur l'élimination du vert de malachite en solution aqueuse par adsorption sur un charbon actif commercial (CAC) et un charbon actif modifié par des nanoparticules d'argent (CAM). Le charbon actif modifié a été préparé par imprégnation au nitrate d'argent suivie d'une réduction chimique au borohydrure de sodium. Les performances adsorbantes des deux matériaux ont été évaluées en étudiant l'influence de plusieurs paramètres opératoires tels que le temps de contact, la masse d'adsorbant, le pH, la concentration initiale du colorant et la température. Les résultats obtenus ont montré que le charbon actif modifié présente une meilleure capacité d'adsorption que le charbon actif commercial. Les études cinétiques et d'isothermes ont permis de mieux comprendre le mécanisme d'adsorption du vert de malachite sur les matériaux étudiés.

Mots-clés. Adsorption, Vert de malachite, Charbon actif commercial, Nanoparticules d'argent, Traitement des eaux.

Nomenclature des symboles et abréviations

Symbole	Désignation	Unité
C_O	Concentration initiale	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
C_t	Concentration à l'instant t	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
C_e	Concentration à l'équilibre	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
q_t	Quantité adsorbée à l'instant t	$\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$
q_e	Quantité adsorbée à l'équilibre	$\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$
Q_{max}	Capacité maximale d'adsorption	$\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$
m	Masse de l'adsorbant	g
V	Volume de la solution	L
t	Temps de contact	min
T	Température	K
A	Absorbance	—
λ_{max}	Longueur d'onde maximale	nm
R	Rendement d'élimination	%
PH_i	pH initial	—
PH_f	pH final	—
pH_{PZC}	Point de charge zéro	—
ΔpH	Variation du pH	—
K_L	Constante de Langmuir	$\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$
R_L	Facteur de séparation de Langmuir	—
K_F	Constante de Freundlich	$(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})(\text{L}\cdot\text{mg}^{-1})^{1/n}$
n	Facteur de Freundlich	—
A_T	Constante de Temkin	$\text{L}\cdot\text{g}^{-1}$
B_T	Constante de Temkin	$\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$
K_1	Constante du pseudo-premier ordre	min^{-1}
K_2	Constante du pseudo-deuxième ordre	$\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$
K_{id}	Constante de diffusion intra-particulaire	$\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1/2}$
C	Constante de couche limite	$\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$
R^2	Coefficient de corrélation	—
N	Normalité	$\text{eq}\cdot\text{L}^{-1}$
M	Molarité	$\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$
II	Indice d'iode	$\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$
V_i	Volume initial d'iode	mL
V_f	Volume final titré	mL

Nomenclature des symboles et abréviations

K_c	Constante d'équilibre	—
ΔG°	Énergie libre de Gibbs	$\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$
ΔH°	Enthalpie standard	$\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$
ΔS°	Entropie standard	$\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
R_g	Constante universelle des gaz	$\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Abréviations et sigles

Abréviation	Signification
CAC	Charbon Actif Commercial
CAM	Charbon Actif Modifié
AgNPs	Nanoparticules d'Argent
AgNO ₃	Nitrate d'Argent
NaBH ₃	Borohydrure de Sodium
HCl	Acide Chlorhydrique
NaOH	Hydroxyde de Sodium
NaCl	Chlorure de Sodium
UV-Vis	Ultra-Violet Visible
MG	Vert de Malachite
CAP	Charbon Actif en Poudre
CAG	Charbon Actif Granulé
SEM	Microscopie Électronique à Balayage (Scanning)
FTIR	Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier
BET	Méthode de Brunauer, Emmett et Teller
DRX	Diffraction des Rayons X
MET	Microscopie Électronique en Transmission

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
Figure I.1 : Phénomène d'adsorption	3
Figure I.2 : Comparaison entre adsorption physique et adsorption chimique	4
Figure I.3 : Schéma explicatif du phénomène et du mécanisme de l'adsorption	7
Figure I.4 : Structure d'un charbon actif	10
Figure I.5 : Structure d'une zéolithe	11
Figure I.6 : SEM du charbon actif et du charbon actif modifié par nanoparticules d'argent	11
Figure I.7 : Charbon actif modifié par nanoparticules d'argent et activité fonctionnelle associée	13
Figure II.1 : Charbon actif granulé et charbon actif en poudre	15
Figure II.2 : Représentation schématique de la microstructure du charbon actif	16
Figure II.3 : Colorants	16
Figure II.4 : Conséquences de la bioaccumulation après déversement de substances toxiques dans un cours d'eau	17
Figure III.1 : Structure chimique du vert de malachite	22
Figure III.2 : Balance analytique utilisée dans les expériences	24
Figure III.3 : Agitateur magnétique monoplace et Agitateur magnétique multiplace	25
Figure III.4 : Centrifugeuse utilisée dans les expériences	25
Figure III.5 : Étuve de séchage utilisés pour le séchage des adsorbants	26
Figure III.6 : Broyeur et Tamis utilisés pour la préparation des adsorbants	26
Figure III.7 : pH-mètre utilisé pour les mesures de pH	27
Figure III.8 : Spectrophotomètre UV-Visible	28
Figure IV.1 : Détermination du pH_{PCZ} du CAC	36
Figure IV.2 : Détermination du pH_{PCZ} du CAM.	37
Figure IV.3 : Effet du temps de contact sur l'adsorption du vert de malachite par CAC et CAM	39
Figure IV.4 : Effet de la masse de l'adsorbant sur l'adsorption du vert de malachite par CAC et CAM	40
Figure IV.5 : Effet du pH sur l'adsorption du vert de malachite par CAC et CAM	41
Figure IV.6 : Effet de la température sur l'adsorption du vert de malachite par CAC et CAM	42
Figure IV.7 : Modèle du pseudo-premier ordre pour CAC et CAM	43
Figure IV.8 : Modèle du pseudo-deuxième ordre pour CAC et CAM	44
Figure IV.9 : Modèle de diffusion intra-particulaire pour CAC et CAM	45
Figure IV.10 : Décrire la relation entre la quantité adsorbée à l'équilibre q_e et la concentration résiduelle C_e	47
Figure IV.11 : Modèle de Langmuir pour CAC et CAM	48
Figure IV.12 : Modèle de Freundlich pour CAC et CAM	49
Figure IV.13 : Modèle de Temkin pour CAC et CAM	50

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
Tableau I.1 : Comparaison entre adsorption physique et adsorption chimique.	5
Tableau II.1 : des principaux polluants organiques	19
Tableau III.1 : Caractéristiques physico-chimiques du vert de malachite	22
Tableau III.2 : Caractéristiques des solutions chimiques utilisées dans les essais expérimentaux	31
Tableau III.3 : Conditions expérimentales appliquées aux essais d'adsorption sur le CAC et le CAM	34
Tableau IV.1 : Résultats de l'indice d'iode du CAC et du CAM	35
Tableau IV.2 : Résultats du <i>pHPCZ</i> du CAC	36
Tableau IV.3 : Résultats du <i>pHPCZ</i> du CAM	37
Tableau IV.4 : Effet du temps de contact sur l'adsorption du vert de malachite par CAC et CAM	38
Tableau IV.5 : Effet de la masse de l'adsorbant sur l'adsorption du vert de malachite	40
Tableau IV.6 : Effet du pH sur l'adsorption du vert de malachite	41
Tableau IV.7 : Paramètres de la température sur l'adsorption du vert de malachite	42
Tableau IV.8 : Paramètres du modèle du pseudo-premier ordre	44
Tableau IV.9 : Paramètres du modèle du pseudo-deuxième ordre	45
Tableau IV.10 : Paramètres du modèle de diffusion intra-particulaire	46
Tableau IV.11 : Comparaison des modèles cinétiques	46
Tableau IV.12 : Paramètres du modèle de Langmuir	48
Tableau IV.13 : Paramètres du modèle de Freundlich	49
Tableau IV.14 : Paramètres du modèle de Temkin	50
Tableau IV.15 : Résultats des modèles d'isothermes	51

SOMMAIRE

Dédicace	ii
Remerciements	iii
Résumé	Erreur ! Signet non défini.
Nomenclature des symboles et abréviations.....	v
LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES TABLEAUX	viii
SOMMAIRE	ix
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Adsorption, Adsorbants et Nanoadsorbants	3
I.1.1 Introduction.....	3
I.1.2 Définition de l'adsorption	3
I.1.3 Les types d'adsorption	3
I.1.3.1 Adsorption physique ou physisorption.....	4
I.1.3.2 Adsorption chimique ou chimisorption.....	4
I.1.4 Les facteurs influençant les paramètres d'adsorption	5
I.1.6 Le mécanisme d'adsorption	6
I.1.7 Modèles d'isothermes d'adsorption	7
I.1.8 La cinétique d'adsorption.....	8
I.2 Classification des adsorbants	10
I.3 Les Nanoadsorbants	11
I.3.2 Intérêt des matériaux nanostructurés.....	12
I.3.3 Méthodes de préparation des nanoparticules	12
I.3.4 Avantages des nanoadsorbants.....	13
Chapitre II : Charbon actif et colorant.....	14
II.1 Généralités sur le Charbon actif.....	14
II.1.1 Définition.....	14
II.1.2 Caractéristiques du charbon actif.....	14
II.1.3 Différents types de charbon actif	15
II.1.4 Les matériaux carbonés	15
II.2 Généralités sur les colorants	16
II.2.1 Définition des colorants	16
II.2.2 Les types des colorants	17
II.2.3 Vert de malachite.....	18
II.2.3 Types de polluants organiques.....	18

SOMMAIRE

II.2.4 Toxicité des colorants	19
Chapitre III : Matériels et méthodes.....	21
III.1 Matériaux.....	21
III.1.1 Produits chimiques	21
III.1.1 Charbon actif commercial (CAC)	21
III.1.2 Charbon actif modifié par nanoparticules d'argent (CAM)	21
III.1.3 Vert de malachite.....	21
III.1.3.2 Utilisation	22
III.1.3.3 Toxicité.....	23
III.1.4 Eau distillée	23
III.1.5 Hydroxyde de sodium (NaOH)	23
III.1.6 Acide chlorhydrique (HCl).....	23
III.1.7 Iode.....	23
III.1.2 Appareillage	24
III.1.3 Verrerie.....	28
III.1.4. Solutions préparées.....	30
III.2. Méthodes	30
III.2.1 Préparation des solutions.....	30
III.2.2 Préparation des adsorbants	31
III.2.4. Conditions expérimentales étudiées	33
Chapitre IV : Résultats Expérimentaux et Discussions	35
IV.1 Caractérisation des adsorbants	35
IV.1.1 Résultats de l'indice d'iode.....	35
IV.1.2 Résultats du pH_{PZC}	35
IV.2 Étude de l'adsorption du vert de malachite	38
IV.2.1 Effet du temps de contact	38
IV.2.2. Effet de la dose de l'adsorbant	39
IV.2.3. Effet du pH.....	41
IV.2.4. Effet de la température	42
IV.3 Étude cinétique de l'adsorption.....	43
IV.4 Étude des isothermes d'adsorption.....	47
IV.6 Discussion générale des résultats	52
Conclusion générale	54
Perspectives	55
Références bibliographiques	55
Annexe	58

Introduction générale

La pollution des eaux par les rejets industriels représente un problème environnemental important, notamment en raison de la présence de colorants synthétiques dans les effluents des industries textiles, du papier et du cuir. Ces composés sont souvent difficiles à éliminer en raison de leur stabilité chimique et de leur faible biodégradabilité, ce qui peut engendrer des effets néfastes sur les écosystèmes aquatiques et la santé humaine [5].

Parmi les polluants organiques présents dans les eaux usées industrielles, le vert de malachite occupe une place importante en raison de sa large utilisation et de sa toxicité potentielle. Sa stabilité chimique et sa faible biodégradabilité rendent son élimination difficile par les méthodes conventionnelles. Parmi les différentes techniques de traitement, l'adsorption est reconnue comme l'une des plus efficaces grâce à sa simplicité de mise en œuvre, son rendement élevé et son faible coût. Le charbon actif est largement utilisé comme adsorbant en raison de sa grande surface spécifique et de sa porosité développée [13].

Dans ce contexte, ce travail vise à comparer les performances d'un charbon actif commercial (CAC) et d'un charbon actif modifié par des nanoparticules d'argent (CAM) pour l'adsorption du vert de malachite en solution aqueuse. L'influence de différents paramètres opératoires ainsi que les études cinétiques et d'équilibre ont été réalisées afin d'évaluer l'efficacité des matériaux étudiés et de mieux comprendre le mécanisme d'adsorption [17].

Le présent mémoire est organisé en quatre chapitres :

Chapitre I : Généralités sur l'adsorption

Ce chapitre présente les concepts fondamentaux de l'adsorption, les mécanismes mis en jeu ainsi que les principaux modèles cinétiques et isothermes.

Chapitre II : Charbon actif et vert de malachite

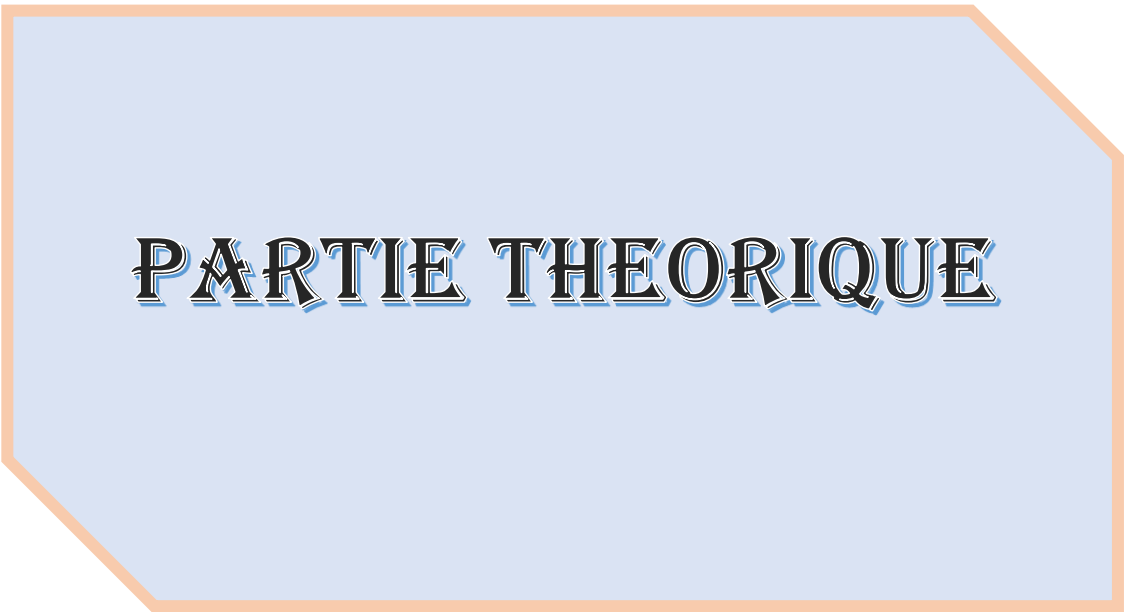
Ce chapitre est consacré à l'étude bibliographique du charbon actif, des matériaux carbonés, des nanoadsorbants et du vert de malachite.

Chapitre III : Matériels et méthodes

Ce chapitre décrit les matériaux utilisés, les méthodes expérimentales, la préparation des adsorbants et les protocoles d'adsorption.

Chapitre IV : Résultats et discussion

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus ainsi que leur interprétation et leur discussion. Enfin, ce travail se termine par une conclusion générale suivie de perspectives pour des travaux futurs.



PARTIE THEORIQUE

Chapitre I : Adsorption, Adsorbants et Nanoadsorbants

I.1.1 Introduction

L'adsorption est une méthode efficace utilisée dans le traitement des eaux pour éliminer les colorants, les métaux lourds et les composés organiques. Elle se caractérise par sa simplicité, son efficacité et l'utilisation de différents adsorbants naturels ou modifiés [1].

Avec le développement des matériaux poreux et nanostructurés, les nanoadsorbants présentent une grande surface spécifique, une forte réactivité et une meilleure accessibilité aux sites actifs, améliorant ainsi les performances d'adsorption [2].

I.1.2 Définition de l'adsorption

L'adsorption est un phénomène de surface où des molécules ou ions se fixent à la surface d'un adsorbant sans pénétrer dans son volume. Les espèces fixées sont appelées adsorbats [3].

Dans le traitement des eaux, l'adsorption permet d'éliminer les polluants dissous. Son efficacité dépend de plusieurs paramètres comme le pH, la température, le temps de contact, la concentration initiale et la nature de l'adsorbant [4].

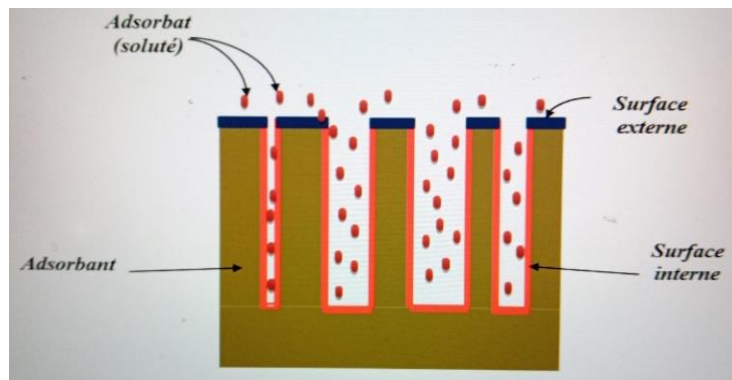


Figure 1.1 : Phénomène d'adsorption [5].

I.1.3 Les types d'adsorption

Il existe deux types principaux d'adsorption : la physisorption et la chimisorption. Elles se distinguent par la nature des interactions, l'énergie d'adsorption et la réversibilité du phénomène [6].

I.1.3.1 Adsorption physique ou physisorption

La physisorption est due à des forces faibles comme les forces de Van der Waals. Elle est rapide, réversible et favorisée à basse température [7].

Elle peut former plusieurs couches moléculaires et dépend fortement de la surface spécifique et de la porosité de l'adsorbant [8].

I.1.3.2 Adsorption chimique ou chimisorption

La chimisorption implique la formation de liaisons chimiques entre l'adsorbat et l'adsorbant. Elle est plus spécifique et généralement limitée à une seule couche moléculaire [9].

Ce type d'adsorption est souvent moins réversible et peut être favorisé par l'augmentation de la température.

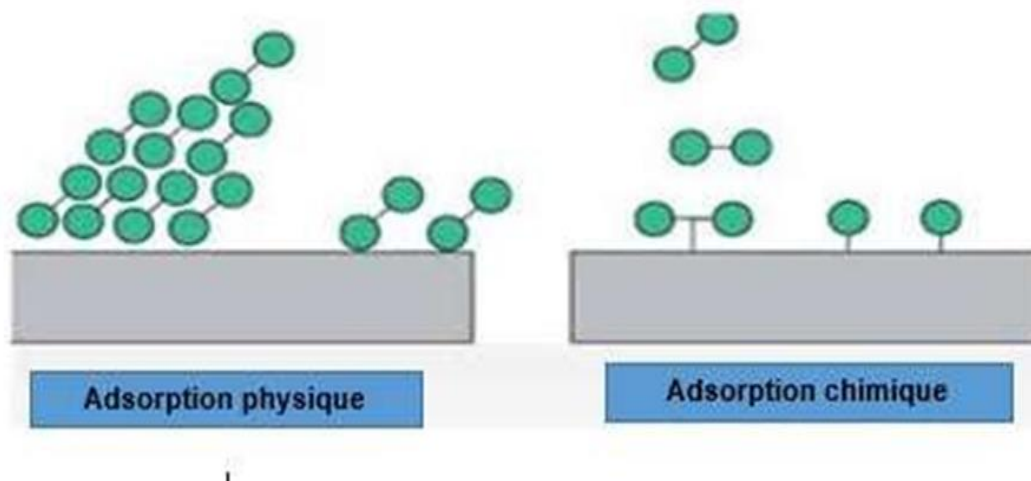


Figure I.2 : Comparaison entre adsorption physique et adsorption chimique [8].

Tableau I.1 : Comparaison entre adsorption physique et adsorption chimique.

Caractéristique	Physisorption	Chimisorption
Nature des interactions	Forces faibles de Van der Waals	Liaisons chimiques fortes
Énergie mise en jeu	Faible	Élevée
Réversibilité	Généralement réversible	Souvent irréversible
Vitesse	Rapide	Plus lente
Température favorable	Basse température	Température plus élevée
Nombre de couches	Multicouches possibles	Monocouche
Spécificité	Faible	Élevée

I.1.4 Les facteurs influençant les paramètres d'adsorption

L'efficacité de l'adsorption dépend de plusieurs paramètres liés aux conditions opératoires, à la nature de l'adsorbant et aux propriétés de l'adsorbat. Ces paramètres influencent la capacité d'adsorption, le rendement d'élimination et le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre. [8]

Facteurs influençant l'adsorption

I.1.4.1 Temps de contact

L'adsorption est rapide au début grâce aux sites actifs disponibles, puis ralentit progressivement jusqu'à l'équilibre [9],[10].

I.1.4.2 pH de la solution

Le pH influence la charge de surface de l'adsorbant et les interactions électrostatiques avec l'adsorbat [11],[12].

I.1.4.3 Température

La température agit sur la mobilité des molécules et le mécanisme d'adsorption [3],[14].

I.1.4.4 Masse de l'adsorbant

L'augmentation de la masse améliore généralement le rendement d'élimination grâce au nombre plus élevé de sites actifs [15],[7].

I.1.4.5 Concentration initiale

Une concentration élevée favorise le transfert des molécules vers la surface de l'adsorbant, mais peut entraîner la saturation des sites actifs [9],[17].

I.1.4.6 Nature de l'adsorbant

La surface spécifique, la porosité et les groupements fonctionnels influencent fortement la capacité d'adsorption [18],[16].

I.1.4.7 Nature de l'adsorbat

La taille moléculaire, la polarité et la solubilité du polluant influencent son affinité avec l'adsorbant [20],[19].

I.1.6 Le mécanisme d'adsorption

Le mécanisme d'adsorption correspond au transfert des molécules de l'adsorbat vers la surface de l'adsorbant. Il comprend principalement la diffusion externe, la diffusion dans les pores et la fixation sur les sites actifs du matériau [21].

I.1.6.1 Diffusion externe

Transfert des molécules depuis la solution vers la surface externe de l'adsorbant [10].

I.1.6.2 Diffusion intra-particulaire

Diffusion des molécules à l'intérieur des pores de l'adsorbant [19].

I.1.6.3 Fixation sur les sites actifs

Fixation des molécules par des interactions physiques, chimiques ou électrostatiques [3].

I.1.6.4 Équilibre adsorption/désorption

Établissement d'un équilibre entre adsorption et désorption lorsque les sites actifs deviennent occupés [22].

I.1.6.5 Étape limitante

La vitesse d'adsorption peut être contrôlée par la diffusion externe, la diffusion intra-particulaire ou la fixation sur les sites actifs [17].

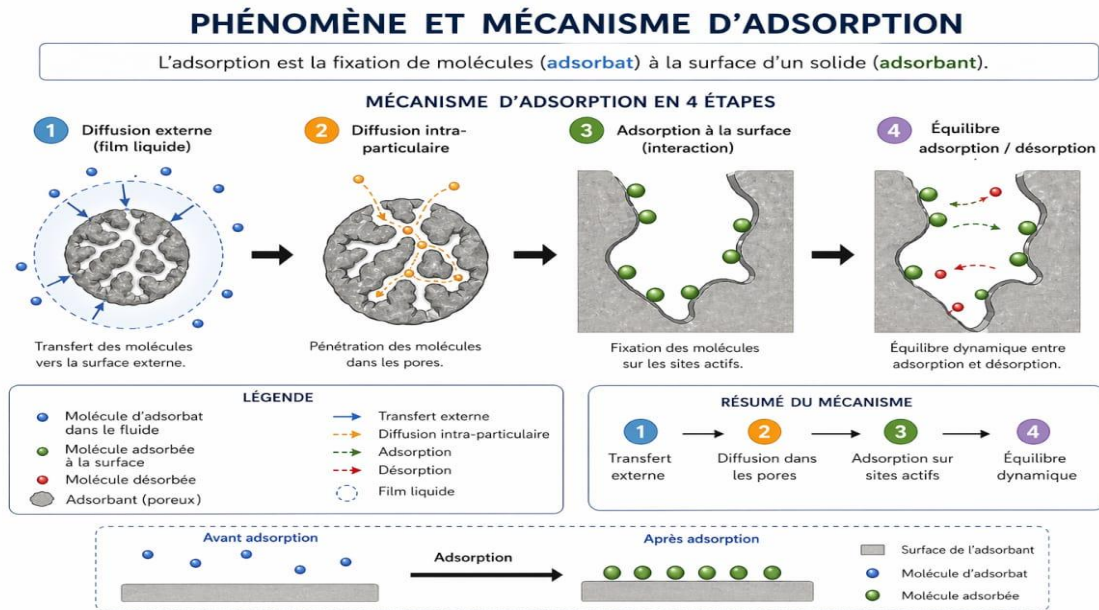


Figure I.3 : Schéma explicatif du phénomène et du mécanisme de l'adsorption

I.1.7 Modèles d'isothermes d'adsorption

Les modèles d'isothermes décrivent la relation entre la quantité adsorbée et la concentration du soluté à l'équilibre. Ils permettent d'évaluer la capacité d'adsorption et de comprendre les interactions entre l'adsorbant et l'adsorbat [3].

I.1.7.1 Modèle de Langmuir

Le modèle de Langmuir décrit une adsorption en monocouche sur une surface homogène contenant des sites actifs identiques, sans interaction entre les molécules adsorbées [22].

L'équation non linéaire du modèle de Langmuir s'écrit :

$$q_e = \frac{q_{\max} K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad \text{I.1}$$

La forme linéaire la plus utilisée est :

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{\max} K_L} + \frac{C_e}{q_{\max}} \quad \text{I.2}$$

Cette forme permet de déterminer $q_{\max}$ et K_L à partir de la pente et de l'ordonnée à l'origine de la droite $C_e/q_e = f(C_e)$. [23]

I.1.7.2 Modèle de Freundlich

Le modèle de Freundlich décrit l'adsorption sur des surfaces hétérogènes où les sites actifs possèdent des affinités et des énergies d'adsorption différentes [24].

L'équation non linéaire du modèle de Freundlich est :

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad \text{I.3}$$

La forme linéaire est :

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad \text{I.4}$$

Lorsque la valeur de $1/n$ est comprise entre 0 et 1, l'adsorption est considérée comme favorable. Le modèle de Freundlich est souvent utilisé pour les adsorbants à surface hétérogène, comme les charbons actifs [6].

I.1.7.3 Modèle de Temkin

Le modèle de Temkin prend en compte les interactions entre les molécules adsorbées et suppose que la chaleur d'adsorption diminue progressivement avec le recouvrement de la surface [5].

L'équation du modèle de Temkin s'écrit généralement :

$$q_e = B_T \ln(A_T C_e) \quad \text{I.5}$$

Avec :

$$B_T = \frac{RT}{b_T} \quad \text{I.6}$$

La forme linéaire du modèle de Temkin est :

$$q_e = B_T \ln A_T + B_T \ln C_e \quad \text{I.7}$$

Le tracé de q_e en fonction de $\ln C_e$ permet de déterminer les constantes du modèle de Temkin à partir de la pente et de l'ordonnée à l'origine [6].

Le choix du modèle d'isotherme dépend principalement du coefficient de corrélation R^2 et de l'accord entre les valeurs expérimentales et théoriques [23].

I.1.8 La cinétique d'adsorption

I.1.8.1 Définition

La cinétique d'adsorption étudie l'évolution de la quantité adsorbée en fonction du temps. Elle permet de déterminer la vitesse d'adsorption et le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre, avec une phase rapide suivie d'une phase plus lente liée à la diffusion dans les pores [10]

I.1.8.2 Modèle du pseudo-premier ordre

Le modèle du pseudo-premier ordre suppose que la vitesse d'adsorption dépend de la différence entre la quantité adsorbée à l'équilibre et celle adsorbée à un instant donné. Il est généralement utilisé pour décrire les premières étapes de l'adsorption [26].

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad \text{I.8}$$

Après intégration, l'équation linéaire s'écrit :

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 t \quad \text{I.9}$$

La représentation de $\ln(q_e - q_t)$ en fonction du temps permet de déterminer la constante cinétique k_1 à partir de la pente de la droite. Un coefficient de corrélation élevé et une valeur de q_e calculée proche de la valeur expérimentale indiquent que le modèle est adapté [21].

I.1.8.3 Modèle du pseudo-deuxième ordre

Le modèle du pseudo-deuxième ordre suppose que la vitesse dépend du carré de la différence entre q_e et q_t . Il est souvent plus adapté lorsque les interactions entre l'adsorbant et l'adsorbat sont importantes. [17]

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad \text{I.10}$$

Après intégration, la forme linéaire devient :

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad \text{I.11}$$

La représentation de t/q_t en fonction du temps permet de déterminer les paramètres q_e et k_2 . Le modèle du pseudo-deuxième ordre donne souvent un meilleur ajustement lorsque les valeurs calculées sont proches des valeurs expérimentales [23].

I.1.8.4 Modèle de diffusion intra-particulaire

Le modèle de diffusion intra-particulaire permet de déterminer si la diffusion des molécules dans les pores contrôle la vitesse d'adsorption. Il est particulièrement adapté aux adsorbants poreux comme le charbon actif [10].

L'équation du modèle s'écrit généralement :

$$q_t = k_{id} t^{1/2} + C \quad \text{I.12}$$

Lorsque la droite $q_t = f(t^{1/2})$ passe par l'origine, la diffusion intra-particulaire est considérée comme l'étape principale contrôlant l'adsorption. Sinon, d'autres phénomènes interviennent, comme la diffusion externe ou la résistance du film liquide [19].

Le modèle cinétique le plus adapté est choisi à partir du coefficient de corrélation R^2 , de la cohérence des constantes obtenues et de la comparaison entre les valeurs expérimentales et calculées de q_e [17].

I.2 Classification des adsorbants

I.2.1 Charbons actifs

Les charbons actifs sont des adsorbants largement utilisés grâce à leur grande surface spécifique, leur forte porosité et leur capacité à fixer les molécules organiques et certains ions métalliques. Ils peuvent être préparés à partir de différentes matières carbonées, notamment des déchets agricoles et des biomasses [1].



Figure I.4 : Structure d'un charbon actif

I.2.2 Argiles

Les argiles sont des adsorbants naturels peu coûteux possédant une structure lamellaire et des propriétés d'échange ionique favorisant l'adsorption des métaux lourds et des colorants [27].

I.2.3 Zéolithes

Les zéolithes sont des aluminosilicates microporeux utilisés pour la séparation, le séchage et la purification grâce à leur structure régulière et leur sélectivité moléculaire [4].

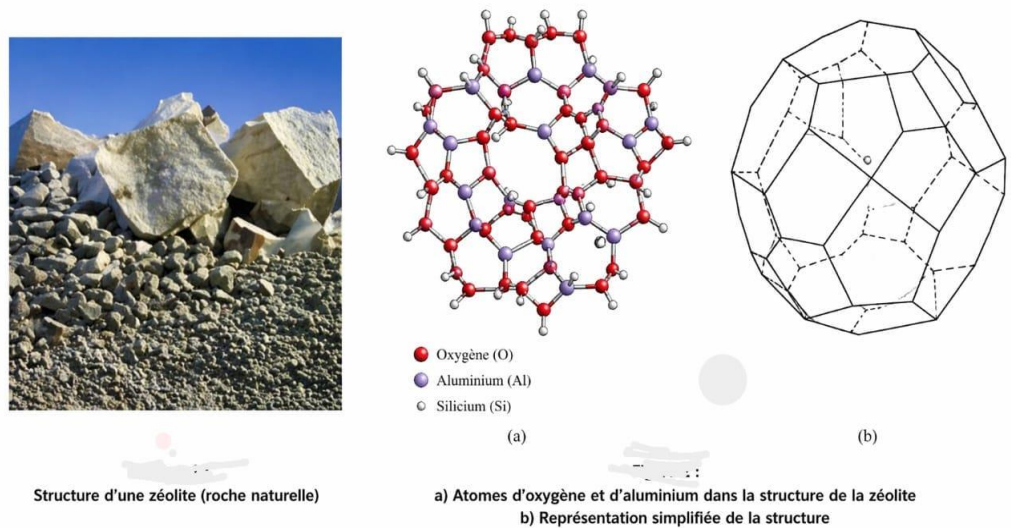


Figure I.5: Structure d'une zéolith

I.2.4 Bioadsorbants

Les bioadsorbants sont des matériaux d'origine biologique issus de résidus agricoles, d'algues ou de déchets végétaux. Ils représentent une alternative économique et écologique aux adsorbants conventionnels pour le traitement des eaux contaminées [4].

I.3 Les Nanoadsorbants

I.3.1 Définition :

Les nanoadsorbants sont des matériaux de taille nanométrique utilisés pour retenir les polluants. Leur faible dimension leur confère une grande surface spécifique et un nombre élevé de sites actifs favorisant l'adsorption [2].

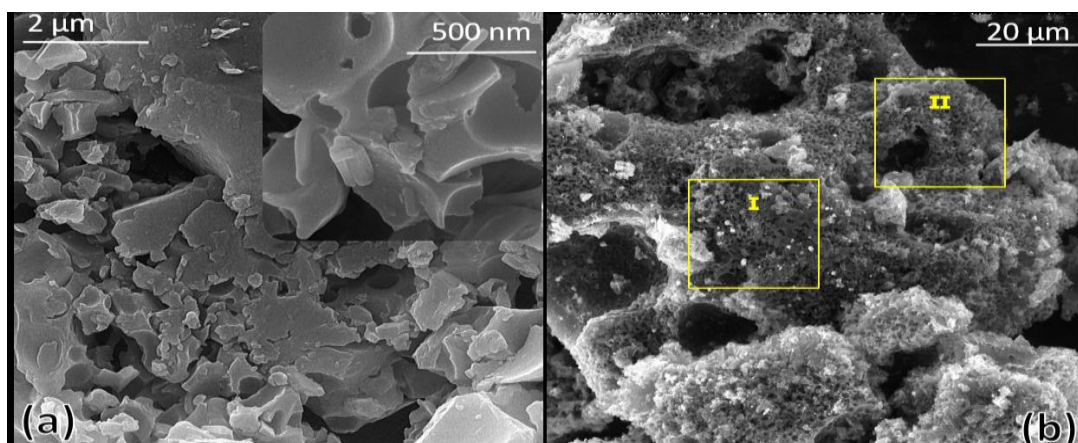


Figure I.6 : SEM du charbon actif et du charbon actif modifié par nanoparticules d'argent [28]

I.3.2 Intérêt des matériaux nanostructurés

Les matériaux nanostructurés présentent une grande surface active favorisant les interactions avec les polluants et améliorant ainsi la capacité d'adsorption [2].

La fonctionnalisation de surface permet de modifier la charge, la polarité et la sélectivité du matériau, notamment dans le cas des nanoparticules métalliques où les interactions dépendent des groupements chimiques présents à la surface [29].

I.3.3 Méthodes de préparation des nanoparticules

Les nanoparticules peuvent être préparées par différentes méthodes physiques, chimiques ou biologiques. Le choix de la méthode influence les propriétés du matériau obtenu, comme la taille et la morphologie des nanoparticules [2].

I.3.3.1 Sol-gel

Méthode basée sur l'hydrolyse et la condensation de précurseurs métalliques pour obtenir des matériaux poreux et homogènes [2].

I.3.3.2 Précipitation chimique

Méthode simple permettant de préparer des nanoparticules par formation de précipités à partir d'ions métalliques [2].

I.3.3.3 Méthode hydrothermale

Méthode réalisée sous haute température et pression pour obtenir des nanoparticules bien cristallisées [6].

I.3.3.4 Microémulsion

Technique utilisant des gouttelettes eau/huile pour contrôler la taille des nanoparticules [1].

I.3.3.5 Réduction chimique

Méthode utilisée pour préparer des nanoparticules métalliques comme l'argent ou l'or [2].

I.3.3.6 Synthèse verte

Méthode écologique utilisant des extraits végétaux comme agents réducteurs et stabilisants [2].

I.3.3.7 Co-précipitation

Méthode utilisée pour préparer des oxydes métalliques et des nanoparticules magnétiques [2].

I.3.3.8 Pyrolyse et calcination

Traitements thermiques permettant d'améliorer la stabilité et la cristallinité des nanoparticules [2].

I.3.4 Avantages des nanoadsorbants

I.3.4.1 Grande surface spécifique

Les nanoadsorbants possèdent une grande surface spécifique offrant un nombre élevé de sites actifs pour l'adsorption des polluants [2].

I.3.4.2 Forte réactivité de surface

Leur forte réactivité favorise les interactions avec les molécules adsorbées et peut être améliorée par des nanoparticules métalliques ou des groupements fonctionnels [29].

I.3.4.3 Cinétique d'adsorption rapide

La faible taille des particules facilite la diffusion des polluants vers les sites actifs et accélère l'adsorption [5].

I.3.4.4 Propriétés fonctionnelles supplémentaires

Certains nanocomposites, comme les charbons actifs modifiés par nanoparticules d'argent, possèdent également une activité antibactérienne [28].

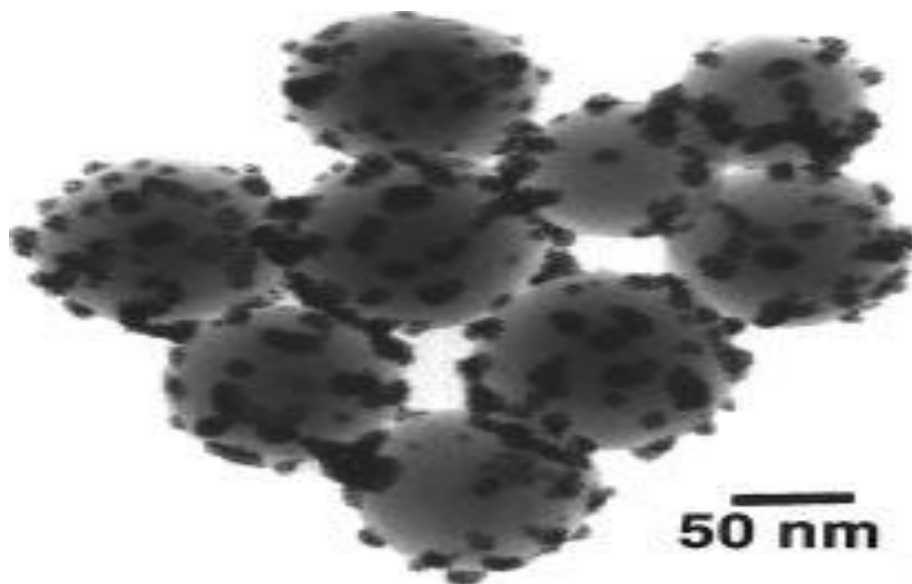


Figure I.7 :Charbon actif modifié par nanoparticules d'argent et activité fonctionnelle associée [28].

Chapitre II : Charbon actif et colorant

II.1 Généralités sur le Charbon actif

II.1.1 Définition

Le charbon actif est un matériau carboné poreux possédant une grande surface spécifique et une structure interne développée, favorisant la rétention des molécules présentes dans les liquides ou les gaz [30].

Il peut être préparé à partir de différentes matières riches en carbone, comme les biomasses et les déchets agricoles, dont le choix influence les propriétés du matériau obtenu [31].

Le pouvoir adsorbant du charbon actif dépend principalement de sa surface spécifique, de sa porosité et de la nature chimique de sa surface [31].

II.1.2 Caractéristiques du charbon actif

Les principales caractéristiques du charbon actif peuvent être résumées en plusieurs étapes :

II.1.2.1 Surface spécifique élevée

Le charbon actif possède une grande surface spécifique favorisant la fixation des polluants sur les sites actifs [31].

II.1.2.2 Porosité développée

Sa structure poreuse facilite l'accès des molécules aux sites internes. Les pores sont classés en micropores, mésopores et macropores [21].

II.1.2.3 Volume poreux

Un volume poreux élevé permet de retenir une plus grande quantité de polluants [21].

II.1.2.4 Chimie de surface

Les groupements fonctionnels présents à la surface influencent la polarité et les interactions avec les molécules adsorbées [20].

II.1.2.5 pH_{PZC}

Le pH_{PZC} correspond au pH où la surface du charbon actif est électriquement neutre [23].

II.1.2.6 Granulométrie

La taille des particules influence la vitesse d'adsorption et les conditions d'utilisation du charbon actif [21].

II.1.3 Différents types de charbon actif

II.1.3.1 Charbon actif en poudre (CAP)

Le charbon actif en poudre possède une granulométrie fine favorisant une adsorption rapide. Il est principalement utilisé dans les traitements en batch et la décoloration des solutions [32].

II.1.3.2 Charbon actif granulé (CAG)

Le charbon actif granulé possède des particules plus grandes et une structure interne développée. Il est utilisé dans les procédés continus comme les colonnes et les lits fixes [7].

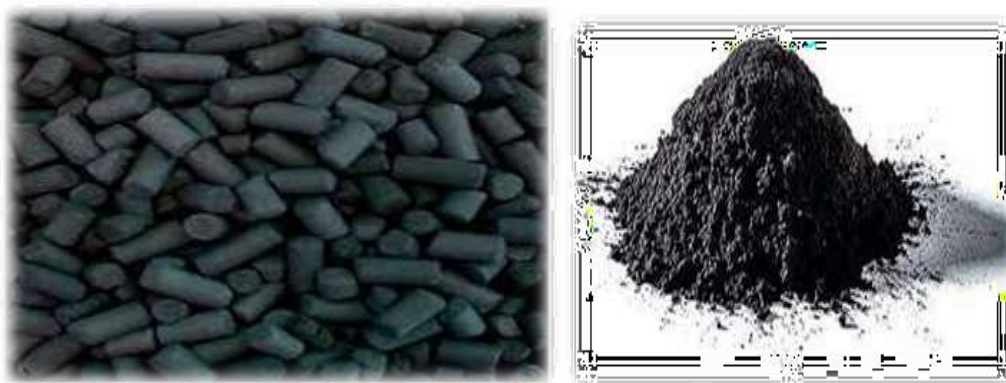


Figure II.1 : charbon actif granulé et charbon actif en poudre [32],[7].

II.1.4 Les matériaux carbonés

II.1.4.1 Définition

Les matériaux carbonés sont des matériaux riches en carbone pouvant être naturels, synthétiques ou issus de biomasses [31].

II.1.4.2 Structure

Leur structure peut être organisée, comme le graphite, ou poreuse et désordonnée, comme le charbon actif [30].

II.1.4.3 Intérêt dans l'adsorption

Ils sont largement utilisés grâce à leur grande surface spécifique, leur porosité et leur stabilité chimique [5].

II.1.4.4 Origine à partir de biomasse

Les déchets agricoles et biomasses peuvent être transformés en charbon actif par carbonisation et activation [32].

II.1.4.5 Intérêt environnemental

La valorisation des déchets naturels permet de produire des adsorbants efficaces et peu coûteux pour le traitement des eaux [34].



Figure II.2 : Représentation schématique de la microstructure du charbon actif [30].

II.2 Généralités sur les colorants

II.2.1 Définition des colorants

Les colorants sont des substances organiques utilisées pour donner une couleur durable à différents supports grâce à la présence de groupements chromophores et auxochromes [30].

Ils sont largement utilisés dans plusieurs industries, notamment le textile, le papier et la cosmétique, ce qui entraîne le rejet d'effluents colorés difficiles à traiter en raison de leur stabilité chimique et de leur faible biodégradabilité [13].



Figure II.3 : Colorants [13].

II.2.2 Les types des colorants

II.2.2.1 Classification selon l'origine

Les colorants peuvent être naturels ou synthétiques, ces derniers étant les plus utilisés dans l'industrie [23].

II.2.2.2 Classification selon la structure chimique

Les colorants sont classés en plusieurs familles selon leur groupement chromophore : azoïques, anthraquinoniques, xanthènes, triphénylméthanes, etc[21].

II.2.2.3 Classification selon l'application

Selon leur utilisation, les colorants peuvent être acides, basiques, directs, dispersés ou réactifs [4].

II.2.2.4 Colorants comme polluants

Les colorants rejetés dans les eaux peuvent perturber les organismes aquatiques et réduire la pénétration de la lumière [23].

II.2.2.5 Difficulté de traitement

Leur structure chimique complexe rend les colorants stables et parfois résistants à la biodégradation [34].

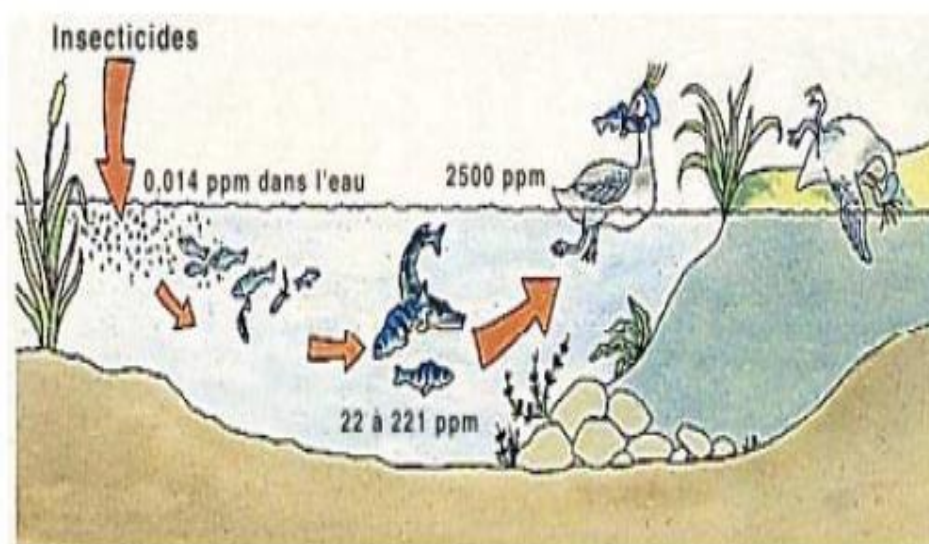


Figure II.4 : Conséquences de la bioaccumulation après déversement de substances toxiques dans un cours d'eau[23].

II.2.3 Vert de malachite

Le vert de malachite est un colorant synthétique cationique appartenant à la famille des triphénylméthanes. Sa structure aromatique lui confère une grande stabilité dans le milieu aqueux, rendant son élimination difficile [23],[21].

Grâce à sa nature cationique, son adsorption est favorisée sur les surfaces chargées négativement, notamment à un pH supérieur au pHPZC [3].

Le vert de malachite est considéré comme un polluant toxique et persistant, ce qui rend son élimination par adsorption particulièrement importante pour la protection des eaux naturelles [6].

II.2.3 Types de polluants organiques

II.2.3.1 Définition

Les polluants organiques sont des substances riches en carbone provenant des activités industrielles, agricoles ou domestiques [31].

II.2.3.2 Principales familles

Ils comprennent les colorants, les phénols, les pesticides, les hydrocarbures, les détergents et certains produits pharmaceutiques [31].

II.2.3.3 Cas des colorants

Les colorants persistants peuvent provoquer des effets toxiques sur les organismes aquatiques et représenter un risque pour la santé humaine [13].

Tableau II.1 : des principaux polluants organiques

Type de polluant organique	Exemples	Origine principale
Colorants	Vert de malachite, bleu de méthylène, colorants azoïques	Industrie textile, cuir, impression
Phénols	Phénol, chlorophénols	Industrie pétrochimique, raffineries
Hydrocarbures	Benzène, toluène, xylène	Industrie pétrolière
Pesticides	Herbicides, insecticides	Agriculture
Détergents	Tensioactifs	Eaux domestiques et industrielles
Solvants organiques	Acétone, éthanol, solvants chlorés	Industrie chimique

II.2.4 Toxicité des colorants

Actuellement de nombreuses stations d'épuration des industries textiles rejettent des quantités importantes d'eau et de boues colorées dans la nature. Ces rejets peuvent se transmettre à l'être humain et à l'environnement par :

Action de vent (poussière en été).

Infiltration du colorant dans les nappes phréatiques.

La chaîne alimentaire (végétaux, animaux).

L'accumulation des doses du colorant sur certains sites de l'organisme provoquant ainsi des cancers.

Cette toxicité, donc pourrait être liée à la diminution de l'oxygène dissout dans ces milieux. Par ailleurs, elle est due à leur très faible biodégradabilité [3].

PARTIE EXPÉRIMENTALE

Chapitre III : Matériels et méthodes

III.1 Matériaux

Cette partie présente les différents matériaux utilisés dans le travail expérimental. Elle regroupe les produits chimiques, l'appareillage, la verrerie ainsi que les solutions préparées pour la modification du charbon actif commercial et son application à l'adsorption du vert de malachite.

III.1.1 Produits chimiques

Les produits chimiques utilisés dans cette étude sont nécessaires à la préparation du charbon actif modifié, à la caractérisation des matériaux et aux essais d'adsorption. Le charbon actif commercial a été utilisé comme adsorbant de référence, tandis que le nitrate d'argent et le borohydrure de sodium ont été employés pour la modification du charbon actif par des nanoparticules d'argent.

III.1.1 Charbon actif commercial (CAC)

Le charbon actif commercial utilisé dans cette étude a été choisi comme adsorbant de référence en raison de sa grande surface spécifique et de sa structure poreuse développée favorisant l'adsorption des molécules organiques [31].

III.1.2 Charbon actif modifié par nanoparticules d'argent (CAM)

Le charbon actif modifié a été préparé par imprégnation du charbon actif commercial avec des nanoparticules d'argent obtenues par réduction chimique des ions Ag^+ . Ce matériau a été utilisé afin d'évaluer l'effet de la modification sur les performances adsorbantes [2].

III.1.3 Vert de malachite

Le vert de malachite est un colorant synthétique cationique appartenant à la famille des triphénylméthanes. Il est largement utilisé dans plusieurs domaines industriels et biologiques en raison de sa forte intensité colorante et de sa bonne stabilité en solution aqueuse.

Tableau III.1 : Caractéristiques physico-chimiques du vert de malachite

Propriété	Description
Nom chimique	Vert de malachite
Famille chimique	Triphénylméthanes
Formule moléculaire	$C_{23}H_{25}ClN_2$
Masse molaire	364,91 g/mol
Aspect physique	Poudre verte cristalline
Nature	Colorant cationique
Solubilité	Soluble dans l'eau
λ_{max}	617 nm
Couleur en solution	Vert intense

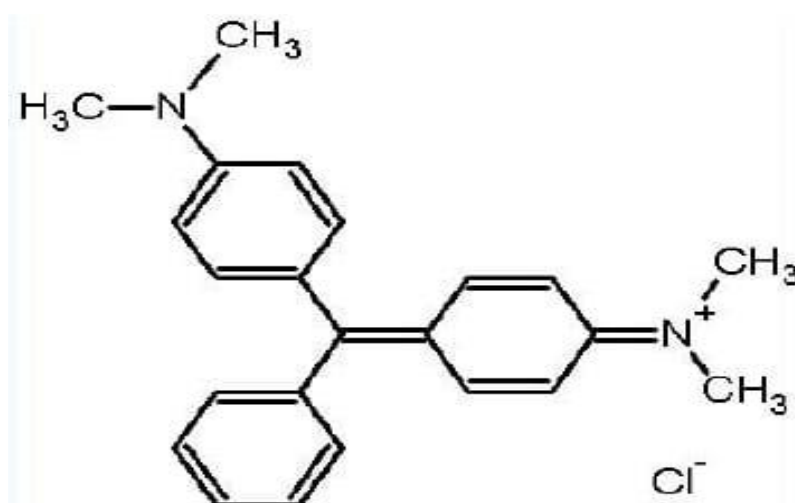


Figure III.1 : Structure chimique du vert de malachite [21].

III.1.3.2 Utilisation

Le vert de malachite est principalement utilisé dans l'industrie textile pour la coloration des fibres et des tissus. Il est également employé dans certains laboratoires biologiques comme colorant microbiologique et dans le domaine de l'aquaculture comme agent antifongique et antiparasitaire pour le traitement des poissons [23].

Grâce à sa stabilité chimique et à son pouvoir colorant élevé, ce colorant est largement utilisé dans plusieurs applications industrielles malgré les risques liés à sa toxicité.

III.1.3.3 Toxicité

Le vert de malachite est considéré comme un polluant organique toxique et persistant dans l'environnement aquatique. Sa présence dans les eaux peut réduire la pénétration de la lumière et perturber les organismes aquatiques.

Plusieurs études ont montré que ce colorant peut présenter des effets toxiques, mutagènes et cancérigènes lorsqu'il s'accumule dans les organismes vivants. Sa faible biodégradabilité rend son élimination difficile par les traitements biologiques classiques, ce qui justifie l'utilisation de procédés d'adsorption pour réduire son impact environnemental [6] [13].

III.1.4 Eau distillée

L'eau distillée a été utilisée pour la préparation de toutes les solutions chimiques ainsi que pour le lavage du matériel expérimental et des adsorbants. Son utilisation permet d'éviter l'influence des ions et des impuretés susceptibles de modifier les résultats expérimentaux.

III.1.5 Hydroxyde de sodium (NaOH)

L'hydroxyde de sodium a été utilisé pour ajuster le pH des solutions lors des essais d'adsorption. Les solutions préparées à partir de NaOH permettent d'augmenter le pH du milieu expérimental.

III.1.6 Acide chlorhydrique (HCl)

L'acide chlorhydrique a été utilisé pour diminuer le pH des solutions étudiées. Les solutions acides obtenues à partir de HCl ont permis d'évaluer l'influence du pH sur les performances adsorbantes des matériaux utilisés.

III.1.7 Iode

L'iode a été utilisé pour la détermination de l'indice d'iode du charbon actif commercial et du charbon actif modifié. Cet essai permet d'évaluer la capacité d'adsorption des matériaux ainsi que le développement de leur microporosité.

La solution iodée utilisée dans cette étude a été préparée à une concentration appropriée puis mise en contact avec une masse déterminée d'adsorbant sous agitation pendant un temps défini.

Après filtration, la concentration résiduelle en iode a été déterminée afin de calculer l'indice d'iode des matériaux étudiés [21].

III.1.2 Appareillage

L'appareillage utilisé dans cette étude permet d'assurer les différentes étapes expérimentales telles que la pesée des réactifs, la préparation des solutions, l'agitation, le séchage, la séparation solide/liquide, la mesure du pH ainsi que l'analyse de l'absorbance du vert de malachite.

III.1.2.1 Balance analytique

La balance analytique a été utilisée pour peser avec précision les différentes masses de charbon actif, de nitrate d'argent (AgNO_3), de borohydrure de sodium (NaBH_4) et de vert de malachite nécessaires aux expériences.



Figure III.2 : Balance analytique utilisée dans cette étude

III.1.2.2 Agitateur magnétique

L'agitateur magnétique monoplace a servi à la préparation des solutions chimiques et à la dissolution homogène des différents réactifs dans l'eau distillée.

L'agitateur magnétique multiplace a été utilisé pour les essais d'adsorption afin d'agiter simultanément plusieurs béchers dans les mêmes conditions expérimentales, ce qui facilite la comparaison entre le charbon actif commercial (CAC) et le charbon actif modifié (CAM).



Figure III.3 : Agitateur magnétique multiplace et agitateur magnétique monoplace

III.1.2.4 Centrifugeuse

La centrifugeuse a été employée après les essais d'adsorption afin de séparer le charbon actif de la solution aqueuse et d'obtenir un surnageant clair avant les analyses spectrophotométriques.



Figure III.4 : Centrifugeuse utilisée pour la séparation solide/liquide

III.1.2.5 Étuve

L'étuve a été utilisée pour le séchage du charbon actif imprégné et du charbon actif modifié après les différentes étapes de lavage et de préparation.



Figure III.5 : Étuve utilisée pour le séchage des adsorbants

III.1.2.6 Broyeur et tamis

Le broyeur a permis de réduire la taille des particules du charbon actif afin d'obtenir une poudre plus homogène favorable aux expériences d'adsorption.

Le tamis a été utilisé pour réaliser une séparation granulométrique du charbon actif et obtenir une taille de particules uniforme.



Figure III.6 : Broyeur et tamis utilisés pour la préparation des adsorbants

III.1.2.7 pH-mètre

Le pH-mètre a servi à mesurer le pH initial et final des solutions ainsi qu'à la détermination du pHPZC des adsorbants étudiés.



Figure III.7 : pH-mètre utilisé pour les mesures de pH

III.1.2.8 Spectrophotométrie UV-Visible

La spectrophotométrie UV-Visible est une technique analytique utilisée pour mesurer l'absorbance d'une solution dans les domaines ultraviolet et visible du spectre électromagnétique. Cette méthode permet de déterminer la concentration d'une substance colorée à partir de l'intensité de la lumière absorbée.

Dans cette étude, la spectrophotométrie UV-Visible a été utilisée pour déterminer les concentrations du vert de malachite avant et après adsorption sur le charbon actif commercial (CAC) et le charbon actif modifié (CAM).

III.1.2.8.1 Principe

Lorsqu'un faisceau lumineux traverse une solution contenant une substance colorée, une partie de la lumière est absorbée par les molécules du soluté, tandis que l'autre partie est transmise. L'absorbance dépend principalement de la concentration de la solution et de la longueur d'onde utilisée.

La mesure de l'absorbance permet ainsi de déterminer la concentration du colorant en solution à l'aide d'une courbe d'étalonnage.

III.1.2.8.2 Loi de Beer-Lambert

La relation entre l'absorbance et la concentration est décrite par la loi de Beer-Lambert :

$$A = \varepsilon l C$$

$$A = \varepsilon cl = 1.2 \times 0.8 \times 1 = 0.96 \text{ absorbance units}$$

Cette loi montre que l'absorbance est proportionnelle à la concentration de la solution analysée.



Figure III.8 : Spectrophotomètre UV-Visible utilisé dans l'étude

III.1.3 Verrerie

La verrerie utilisée dans cette étude permet la préparation des solutions, le transfert des liquides, la filtration ainsi que la réalisation des différents essais expérimentaux. L'ensemble du matériel a été soigneusement nettoyé avant chaque manipulation afin d'éviter toute contamination susceptible d'influencer les résultats expérimentaux.

- **Béchers**

Les béchers ont été utilisés pour la préparation des solutions et la réalisation des essais d'adsorption sous agitation.

- **Fioles jaugées**

Les fioles jaugées ont servi à préparer les solutions à volume précis, notamment les solutions mères et les différentes solutions de dilution du vert de malachite.

- **Pipettes graduées**

Les pipettes graduées ont été utilisées pour prélever des volumes déterminés de solutions lors des différentes manipulations expérimentales.

- **Entonnoirs et papier filtre**

Les entonnoirs ont permis le transfert des solutions ainsi que les opérations de filtration. Le papier filtre a été utilisé pour séparer le charbon actif des solutions après les étapes d'imprégnation, de réduction chimique et d'adsorption.

- **Spatules**

Les spatules ont servi au prélèvement et au transfert des produits solides tels que le charbon actif, le nitrate d'argent et le borohydrure de sodium.

- **Barreaux magnétiques**

Les barreaux magnétiques ont été utilisés afin d'assurer une agitation homogène des solutions dans les béchers pendant les expériences.

- **Flacons**

Les flacons ont permis la conservation temporaire des solutions préparées avant leur utilisation.

- **Erlenmeyers**

Les erlenmeyers ont été utilisés lors du dosage iodométrique réalisé pour la détermination de l'indice d'iode du charbon actif.

- **Burettes graduées**

Les burettes graduées ont servi à l'ajout progressif du thiosulfate de sodium pendant le dosage iodométrique.

III.1.4. Solutions préparées

Plusieurs solutions ont été préparées au cours de cette étude. Elles sont nécessaires à la modification du charbon actif, à la caractérisation du matériau et aux essais d'adsorption du vert de malachite.

Tableau III.2 : Caractéristiques des solutions chimiques utilisées dans les essais expérimentaux.

Solution préparée	Concentration	Volume	Utilisation
Solution de nitrate d'argent	0,2 M	150 mL	Imprégnation du charbon actif
Solution de borohydrure de sodium	0,4 M	100 mL	Réduction des ions Ag^+
Solution de vert de malachite	500 mg/L	25 mL par essai	Adsorption
Eau distillée	—		Dissolution, dilution et lavage
Solution d'iode	0,1 N	100mL	Indice d'iode
Solution de $\text{Na}_2 \text{S}_2 \text{O}_3$	0,1 N	50mL	Titration de l'iode restant
Acide chlorhydrique	0,1 N ou 5 %	-----	Ajustement du pH et indice d'iode
Hydroxyde de sodium	0,1 N	-----	Ajustement du pH
Chlorure de sodium	0,01 M	600mL	Détermination du pH_{PCZ}

III.2. Méthodes

Cette partie décrit les méthodes expérimentales utilisées pour préparer les solutions, modifier le charbon actif commercial et réaliser les essais d'adsorption du vert de malachite. Elle présente également les conditions retenues pour l'étude des paramètres influençant l'adsorption.

III.2.1 Préparation des solutions

III.2.1.1 Solution mère

La solution mère du vert de malachite a été préparée en dissolvant une masse déterminée du colorant dans de l'eau distillée.

Pour préparer une solution mère de concentration 1000 mg/L, une masse de 1 g de vert de malachite a été pesée à l'aide d'une balance analytique puis introduite dans une fiole jaugée de 1000 mL. Le colorant a ensuite été dissous dans une faible quantité d'eau distillée sous agitation, puis le volume a été complété jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée [21].

La solution obtenue a été conservée à l'abri de la lumière afin d'éviter toute dégradation du colorant.

III.2.1.2 Solutions de dilution

Les solutions de différentes concentrations utilisées lors des essais d'adsorption ont été préparées à partir de la solution mère par dilution avec de l'eau distillée.

À titre d'exemple, pour préparer une solution de concentration 500 mg/L, un volume de 50 mL de la solution mère de concentration 1000 mg/L a été prélevé puis introduit dans une fiole jaugée de 100 mL. Le volume a ensuite été complété avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge.

Les autres concentrations ont été préparées selon le même principe de dilution.

III.2.2 Préparation des adsorbants

III.2.2.1 Préparation du charbon actif commercial (CAC)

Le charbon actif commercial utilisé dans cette étude a été utilisé comme adsorbant de référence pour l'élimination du vert de malachite en solution aqueuse.

Avant utilisation, le charbon actif a été séché dans une étuve à 105 °C pendant 24 heures jusqu'à obtention d'une masse constante.

Le charbon actif séché a ensuite été broyé pendant 15 minutes afin de réduire la taille des particules et d'obtenir une poudre homogène. Après broyage, le matériau a été tamisé pendant 30 minutes à l'aide d'un tamis de diamètre 0,14 mm afin d'obtenir une granulométrie uniforme.

Le charbon actif préparé a finalement été conservé dans des flacons hermétiques à l'abri de l'humidité jusqu'à son utilisation dans les expériences d'adsorption.

III.2.2.2 Préparation du charbon actif modifié par nanoparticules d'argent (CAM)

La modification du charbon actif commercial a été réalisée par imprégnation des ions argent suivie d'une réduction chimique afin d'obtenir des nanoparticules d'argent déposées à la surface du matériau [2].

Dans un premier temps, une solution de nitrate d'argent (AgNO_3) de concentration $0,2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ a été préparée par dissolution de 17 g de AgNO_3 dans 500 mL d'eau distillée jusqu'à dissolution complète.

Ensuite, 200 mL de cette solution ont été mis en contact avec 10 g de charbon actif commercial dans un bécher sous agitation continue pendant 72 heures à l'abri de la lumière afin d'éviter la photoréduction des ions argent et de favoriser leur imprégnation à la surface du charbon actif.

Après imprégnation, le mélange a été filtré afin de récupérer le charbon actif imprégné. Le matériau obtenu a ensuite été lavé plusieurs fois à l'eau distillée tiède afin d'éliminer l'excès de nitrate d'argent non adsorbé ainsi que les impuretés résiduelles.

Le charbon actif imprégné a ensuite été séché pendant 20 heures jusqu'à élimination de l'humidité résiduelle.

Après séchage, 6 g du charbon actif imprégné ont été prélevés pour l'étape de réduction chimique.

Par ailleurs, une solution de borohydrure de sodium (NaBH_4) de concentration $0,4 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ a été préparée en dissolvant 0,91 g de NaBH_4 dans de l'eau distillée froide, puis le volume final a été ajusté à 60 mL. Cette solution a été préparée juste avant utilisation en raison de l'instabilité du NaBH_4 en milieu aqueux.

La solution de NaBH_4 a ensuite été ajoutée progressivement au charbon actif imprégné sous agitation continue afin de réduire les ions Ag^+ adsorbés en argent métallique Ag^0 et former les nanoparticules d'argent à la surface du charbon actif [29].

Après réduction chimique, le matériau obtenu a été filtré, lavé plusieurs fois à l'eau distillée tiède puis séché afin d'obtenir le charbon actif modifié par nanoparticules d'argent.

Avant les essais d'adsorption, le charbon actif modifié a été broyé pendant 15 minutes puis tamisé pendant 30 minutes à l'aide d'un tamis de diamètre 0,14 mm afin d'obtenir une granulométrie homogène favorable aux expériences d'adsorption.

III.2.3 Calcul de la quantité adsorbée

La quantité adsorbée à l'équilibre est calculée par la relation suivante :

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad \text{III.1}$$

III.2.3.1 Calcul du rendement d'élimination

Le rendement d'élimination du vert de malachite est calculé par la relation :

$$R(\%) = \frac{c_0 - c_e}{c_0} \times 100 \quad \text{III.2}$$

Un rendement élevé indique une bonne efficacité d'adsorption du matériau étudié.

III.2.4. Conditions expérimentales étudiées

Afin d'évaluer l'influence des principaux paramètres opératoires sur l'adsorption du vert de malachite par le charbon actif commercial (CAC) et le charbon actif modifié (CAM), plusieurs essais ont été réalisés en faisant varier le temps de contact, la masse d'adsorbant, le pH et la température. Les différentes conditions expérimentales étudiées sont regroupées dans le Tableau III.3.

Tableau III.3 : Conditions expérimentales appliquées aux essais d'adsorption sur le CAC et le CAM.

Paramètre étudié	Valeurs étudiées	Objectif
Temps de contact	30, 60, 90, 120, 180 min	Déterminer le temps optimal
Masse d'adsorbant	0,05 ; 0,10 ; 0,15 ; 0,20 g	Déterminer la masse optimale
pH	Domaine acide à basique	Étudier l'effet de la charge de surface
Température	25, 30, 40, 45 °C	Étudier l'effet thermique

Chapitre IV : Résultats Expérimentaux et Discussions

IV.1 Caractérisation des adsorbants

IV.1.1 Résultats de l'indice d'iode

L'indice d'iode permet d'évaluer la microporosité du charbon actif. Il donne une indication sur la capacité du matériau à adsorber les petites molécules, car l'iode est une molécule de petite taille qui peut accéder aux micropores du charbon actif [21].

La formule utilisée pour le calcul est :

$$\text{Indice D'iode} = \frac{(V-V') \times N \times 126,69}{m} \quad \text{IV.1}$$

Tableau IV.1 : Résultats de l'indice d'iode du CAC et du CAM

Échantillon	V(mL)	V'(mL)	Indice D'iode (mg/g)
CAC	54	42,25	745,714
CAM	54	40	888,51

Les résultats montrent que l'indice d'iode du **CAM** est supérieur à celui du **CAC**. Le charbon actif commercial présente une valeur de **745,714 mg/g**, tandis que le charbon actif modifié atteint **888,51 mg/g**.

Cette augmentation indique que la modification du charbon actif par les nanoparticules d'argent améliore la capacité d'adsorption de l'iode. Cela peut être lié à une meilleure accessibilité des sites actifs ou à une amélioration de la microporosité après modification.

Ainsi, le **CAM** présente une meilleure aptitude à adsorber les petites molécules que le **CAC**, ce qui peut contribuer à améliorer ses performances dans l'adsorption du vert de malachite.

IV.1.2 Résultats du pH_{PZC}

Le pH_{PCZ} correspond au pH pour lequel la surface du charbon actif ne porte globalement ni charge positive ni charge négative [23]. Il est déterminé à partir de la variation :

$$\Delta pH = pH_f - pH_i \quad \text{IV.2}$$

Le pH_{PCZ} correspond au point où :

$$\Delta pH = 0$$

Dans cette étude, **50 mL de NaCl 0,01 M** ont été ajustés à différents pH initiaux. Ensuite, **0,15 g** de CAC ou CAM ont été ajoutés, puis les mélanges ont été agités pendant **72 h** avant mesure du pH final.

Tableau IV.2 : Résultats du pH_{PCZ} du CAC

pH_i	pH_f	ΔpH
2,10	2,21	0,11
4,06	7,36	3,30
6,12	7,75	1,63
8,08	8,14	0,06
10,09	8,23	-1,86
12,04	8,10	-3,94

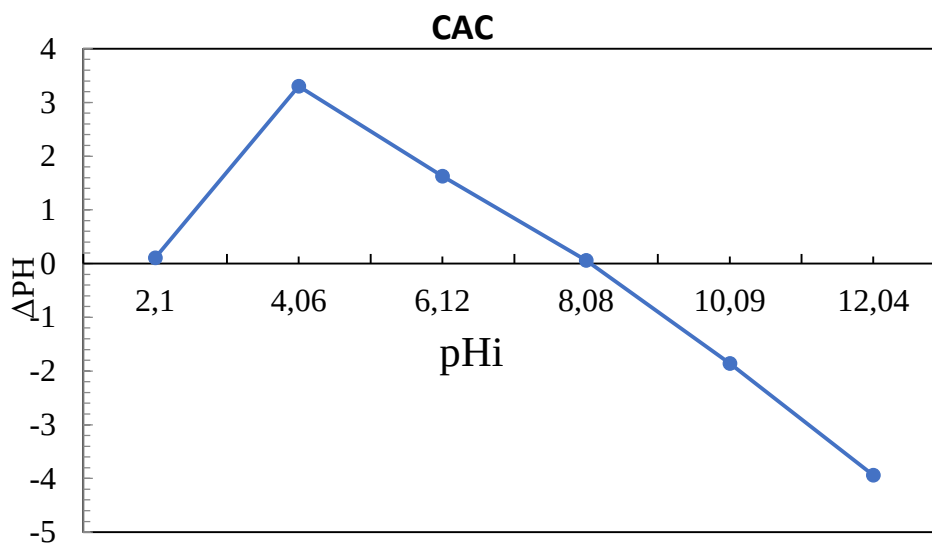


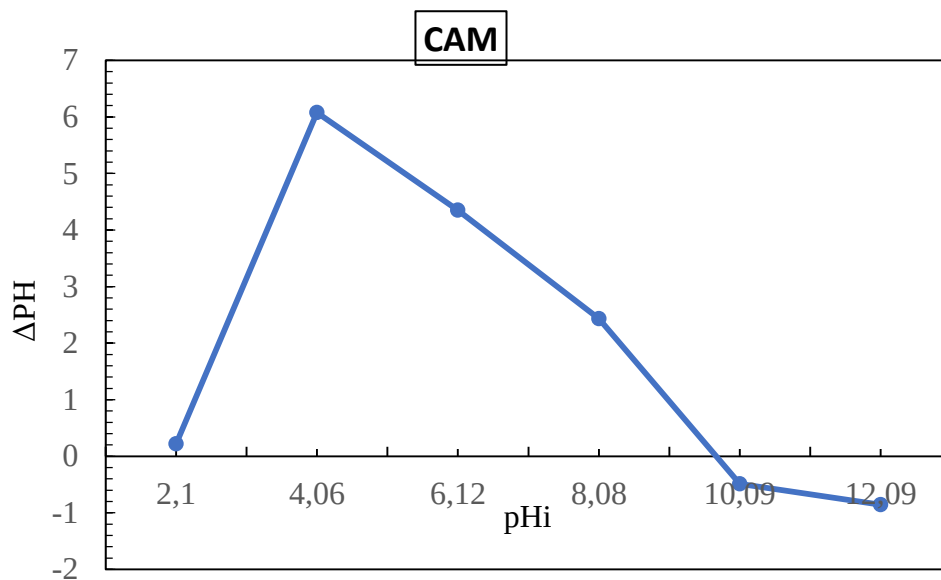
Figure IV.1 : Détermination du pH_{PCZ} du CAC.

D'après ces résultats, le pH_{PCZ} du CAC est proche de :

$$pH_{PCZ}(CAC) \approx 8,1$$

Tableau IV.3 : Résultats du pH_{PCZ} du CAM

pH_i	pH_f	ΔpH
2,10	2,32	0,22
4,06	10,14	6,08
6,12	10,47	4,35
8,08	10,51	2,43
10,09	9,60	-0,49
12,09	11,23	-0,86


Figure IV.2 : Détermination du pH_{PCZ} du CAM.

D'après ces résultats, le pH_{PCZ} du **CAM** est estimé autour de :

$$pH_{PCZ}(CAM) \approx 9,7$$

Le pH_{PCZ} du **CAC** est d'environ **8,1**, tandis que celui du **CAM** est d'environ **9,7**. Cette différence montre que la modification par les nanoparticules d'argent a changé les propriétés de surface du charbon actif.

Lorsque le pH de la solution est inférieur au pH_{PCZ} , la surface du charbon actif est généralement chargée positivement. Lorsque le pH est supérieur au pH_{PCZ} , la surface devient plutôt négative.

Cette propriété est importante pour comprendre l'adsorption du vert de malachite, qui est un colorant cationique

IV.2 Étude de l'adsorption du vert de malachite

Cette partie présente les résultats obtenus lors de l'application du charbon actif commercial **CAC** et du charbon actif modifié **CAM** à l'adsorption du vert de malachite. L'étude commence par l'analyse des paramètres expérimentaux influençant l'adsorption : le temps de contact, la masse de l'adsorbant, le pH et la température.

IV.2.1 Effet du temps de contact

L'effet du temps de contact a été étudié afin de déterminer la durée nécessaire pour atteindre un bon rendement d'adsorption du vert de malachite. Les essais ont été réalisés pour différents temps : **30, 60, 90, 120 et 180 min**, en comparant le charbon actif commercial **CAC** et le charbon actif modifié **CAM**.

Tableau IV.4 : Effet du temps de contact sur l'adsorption du vert de malachite par CAC et CAM

Temps (min)	Taux CAC (%)	Taux CAM (%)
0	0,000	0,000
30	84,315	97,494
60	89,987	99,121
90	95,891	99,289
120	98,204	99,535
180	98,953	99,871

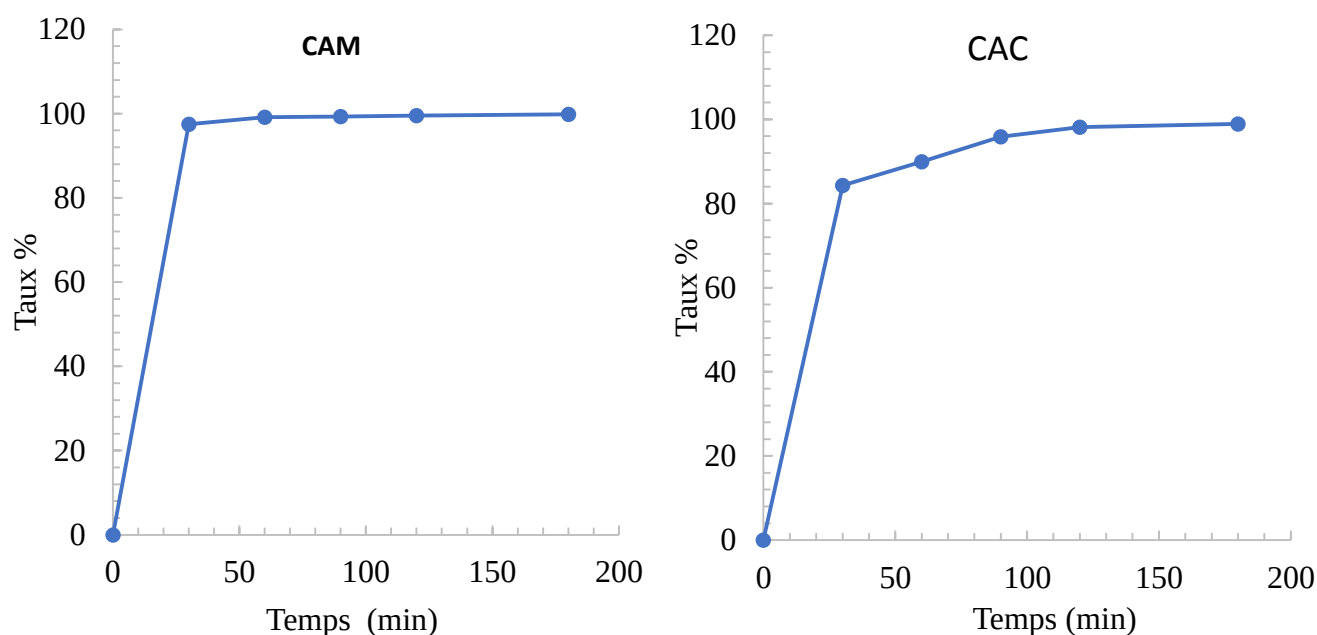


Figure IV.3 : Effet du temps de contact sur l'adsorption du vert de malachite par CAC et CAM.

Les résultats montrent que le rendement d'élimination augmente rapidement au début de l'adsorption. Cette augmentation est due à la disponibilité d'un grand nombre de sites actifs libres sur la surface du charbon actif.

Pour le **CAC**, le rendement atteint **95,891 % à 90 min**, puis l'augmentation devient faible. Pour le **CAM**, le rendement est déjà très élevé dès **30 min**, avec **97,494 %**, puis il reste presque stable.

Ainsi, le temps optimal retenu est :

$$t = 90 \text{ min}$$

Ce temps représente un bon compromis entre l'efficacité d'adsorption et la durée du traitement.

IV.2..2. Effet de la dose de l'adsorbant

L'effet de la dose d'adsorbant a été étudié afin de déterminer la quantité optimale de charbon actif nécessaire pour éliminer le vert de malachite. Les masses étudiées sont : **0,05 ; 0,10 ; 0,15 et 0,20 g**.

Tableau IV.5 : Effet de la dose de l'adsorbant sur l'adsorption du vert de malachite

Masse (g)	Dose (g/L)	Taux CAC (%)	Taux CAM (%)
0,05	2	78,127	90,581
0,10	4	90,181	99,901
0,15	6	99,143	99,952
0,20	8	99,854	99,961

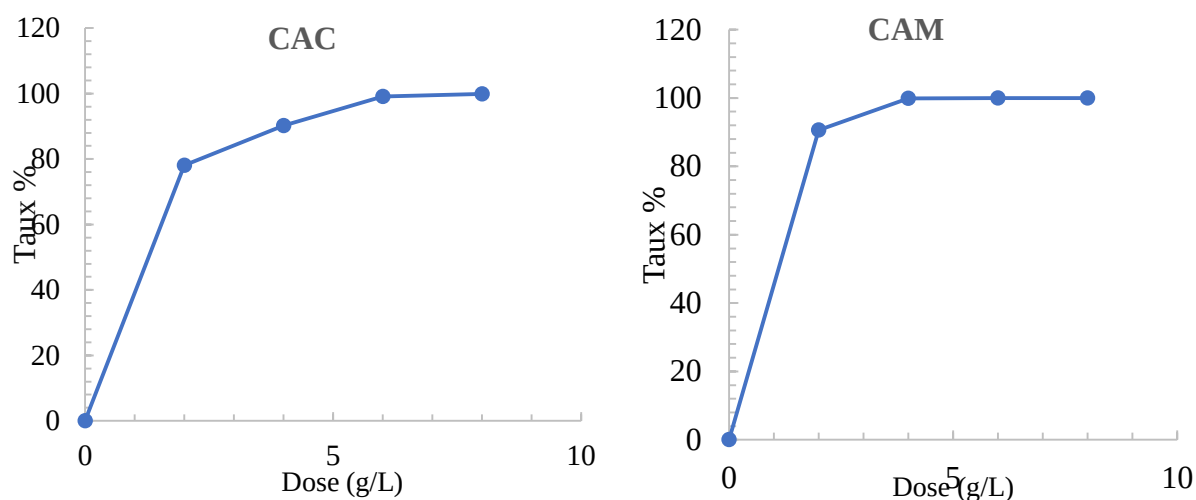


Figure IV.4 : Effet de la dose de l'adsorbant sur l'adsorption du vert de malachite par CAC et CAM.

Les résultats montrent que l'augmentation de la masse d'adsorbant entraîne une augmentation du rendement d'élimination. Cette amélioration s'explique par l'augmentation du nombre de sites actifs disponibles lorsque la masse de charbon actif augmente.

Pour le **CAC**, le rendement passe de **78,127 %** à **99,854 %** lorsque la masse augmente de **0,05 g** à **0,20 g**. Pour le **CAM**, le rendement devient très élevé dès **0,10 g**, avec une valeur de **99,901 %**.

Au-delà de **0,10 g**, l'amélioration devient très faible. Pour cette raison, la masse optimale retenue est :

$$m = 0,10 \text{ g}$$

Cette masse permet d'obtenir un rendement très élevé tout en évitant une consommation excessive d'adsorbant.

IV.2.3. Effet du pH

L'effet du pH a été étudié afin de vérifier l'influence de la charge de surface du charbon actif et de l'état ionique du colorant sur l'adsorption du vert de malachite.

Tableau IV.6 : Effet du pH sur l'adsorption du vert de malachite

pH	Taux CAC (%)	Taux CAM (%)
2,00	98,951	99,894
3,00	98,992	99,964
3,86	98,928	99,893
4,00	98,973	99,981
5,00	99,948	99,948
6,00	98,786	99,891
7,00	98,939	99,729
9,00	99,036	99,941

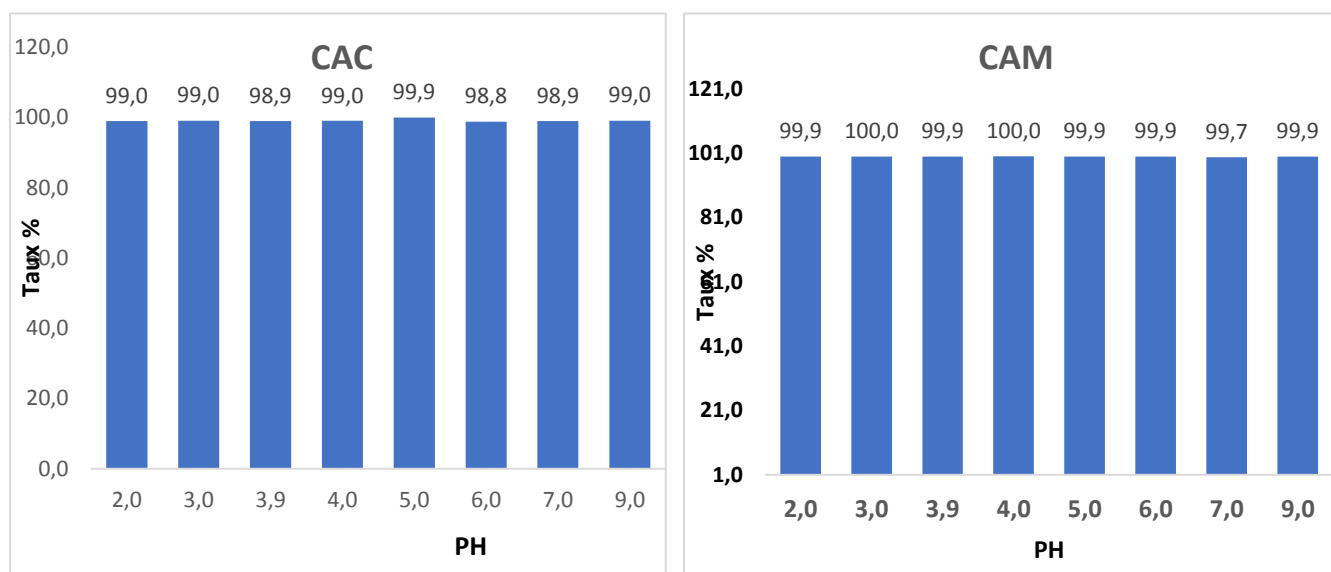


Figure IV.5 : Effet du pH sur l'adsorption du vert de malachite par CAC et CAM.

Les résultats montrent que les rendements restent très élevés dans tout le domaine de pH étudié. Pour le **CAC**, les valeurs sont proches de **99 %**. Pour le **CAM**, les rendements sont également très élevés et proches de **100 %**.

Ces résultats indiquent que le pH n'a pas d'effet significatif sur l'adsorption du vert de malachite dans les conditions expérimentales utilisées. L'adsorption reste donc efficace dans un large domaine de pH.

le pH n'a pas d'effet significatif sur l'adsorption du vert de malachite.

IV.2.4. Effet de la température

L'effet de la température a été étudié à différentes valeurs : **25, 30, 40 et 45 °C**, correspondant respectivement à **298,15 ; 303,15 ; 313,15 et 318,15 K**.

Tableau IV.7 : Paramètres de la température sur l'adsorption du vert de malachite

Paramètres	CAC	CAM
T (K)	298 ; 303 ; 313 ; 318	298 ; 303 ; 313 ; 318
ΔH (kJ·mol ⁻¹)	44,610	-9,391
ΔS (kJ·mol ⁻¹ ·K ⁻¹)	0,177	0,010
ΔG (kJ·mol ⁻¹)	-8,284 ; -9,171 ; -10,940 ; -11,800	-12,281 ; -12,329 ; -12,426 ; -12,475
R ²	0,9758	0,9599
q (mg/g)	123,973 ; 124,155 ; 124,496 ; 124,675	124,784 ; 124,759 ; 124,742 ; 124,719

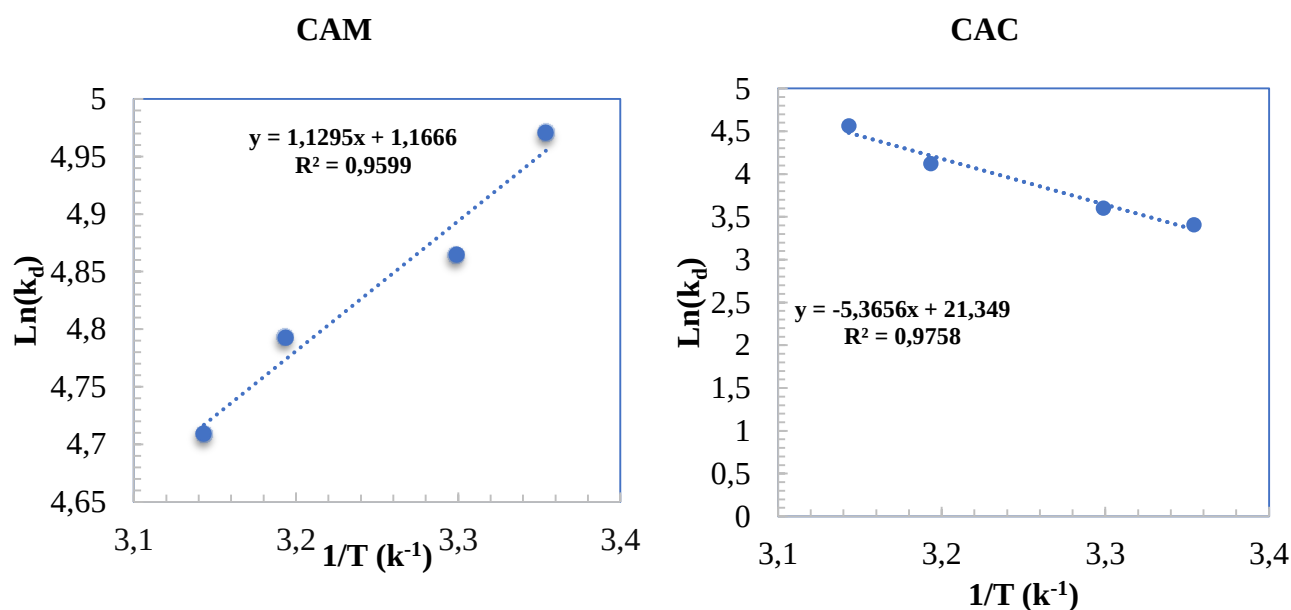


Figure IV.6 : Effet de la température sur l'adsorption du vert de malachite par CAC et CAM.

Les résultats montrent que les quantités adsorbées restent très proches pour toutes les températures étudiées. Pour le **CAC**, on observe une légère augmentation de la quantité adsorbée avec la température. Pour le **CAM**, les valeurs restent presque constantes, avec une très faible diminution.

Ces faibles variations montrent que la température n'a pas d'effet significatif sur l'adsorption du vert de malachite dans l'intervalle étudié. Le procédé peut donc être réalisé à température ambiante sans nécessité de chauffage ou de refroidissement. La température n'a pas d'effet significatif sur l'adsorption du vert de malachite.

IV.3 Étude cinétique de l'adsorption

L'étude cinétique permet de décrire l'évolution de l'adsorption du vert de malachite en fonction du temps. Elle permet aussi d'identifier le modèle qui représente le mieux le mécanisme d'adsorption sur le charbon actif commercial **CAC** et le charbon actif modifié **CAM**.

Les modèles appliqués sont :

- le modèle du pseudo-premier ordre ;
- le modèle du pseudo-deuxième ordre ;
- le modèle de diffusion intra-particulaire.

IV.3.1. Modèle du pseudo-premier ordre

Le modèle du pseudo-premier ordre suppose que la vitesse d'adsorption dépend de la différence entre la quantité adsorbée à l'équilibre q_e et la quantité adsorbée au temps t , notée q_t .

L'équation linéaire du modèle est :

$$\log(q_e - q_t) = \log(q_e) - \frac{k_1}{2,303} t \quad \text{IV.3}$$

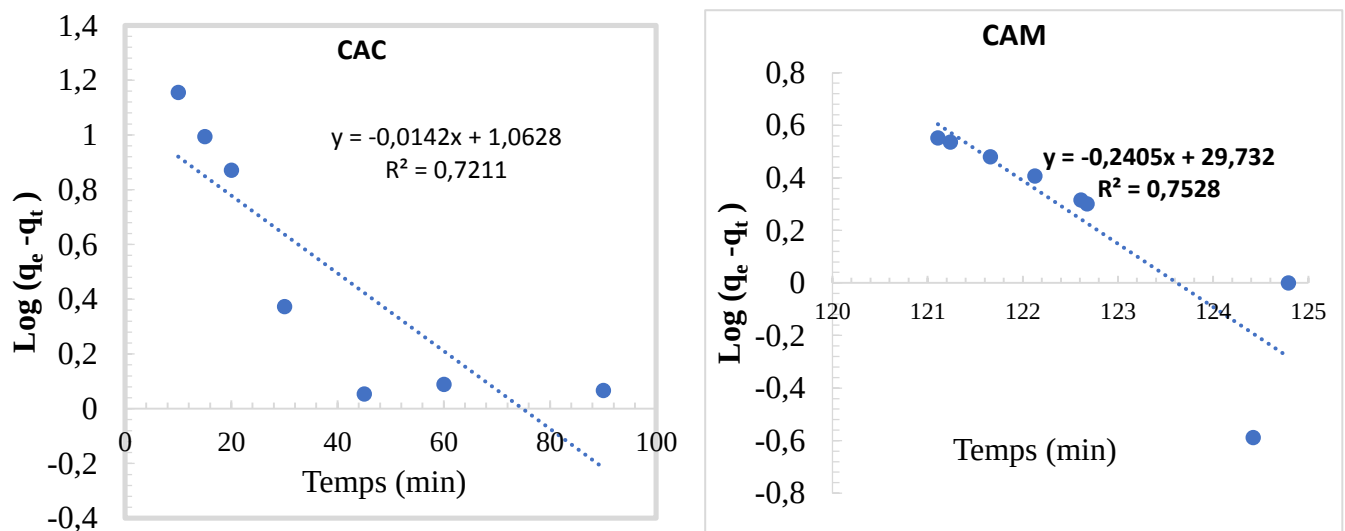


Figure IV.7 : Modèle du pseudo-premier ordre pour CAC et CAM.

Tableau IV.8 : Paramètres du modèle du pseudo-premier ordre

Adsorbant	Équation de la droite	R^2	k_1
CAC	$\log(q_e - q_t) = -0,0142t + 1,0628$	0,7211	0,0142
CAM	$\log(q_e - q_t) = -0,2405t + 29,732$	0,7528	0,2405

Les coefficients de corrélation du pseudo-premier ordre sont relativement faibles : $R^2 = 0,7211$ pour le **CAC** et $R^2 = 0,7528$ pour le **CAM**. Cela montre que ce modèle ne représente pas parfaitement la cinétique d'adsorption du vert de malachite.

IV.3.2. Modèle du pseudo-deuxième ordre

Le modèle du pseudo-deuxième ordre suppose que la vitesse d'adsorption dépend du carré de la différence entre q_e et q_t . Il est souvent utilisé lorsque l'adsorption implique des interactions importantes entre l'adsorbant et l'adsorbat.

L'équation linéaire du modèle est :

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad \text{IV.4}$$

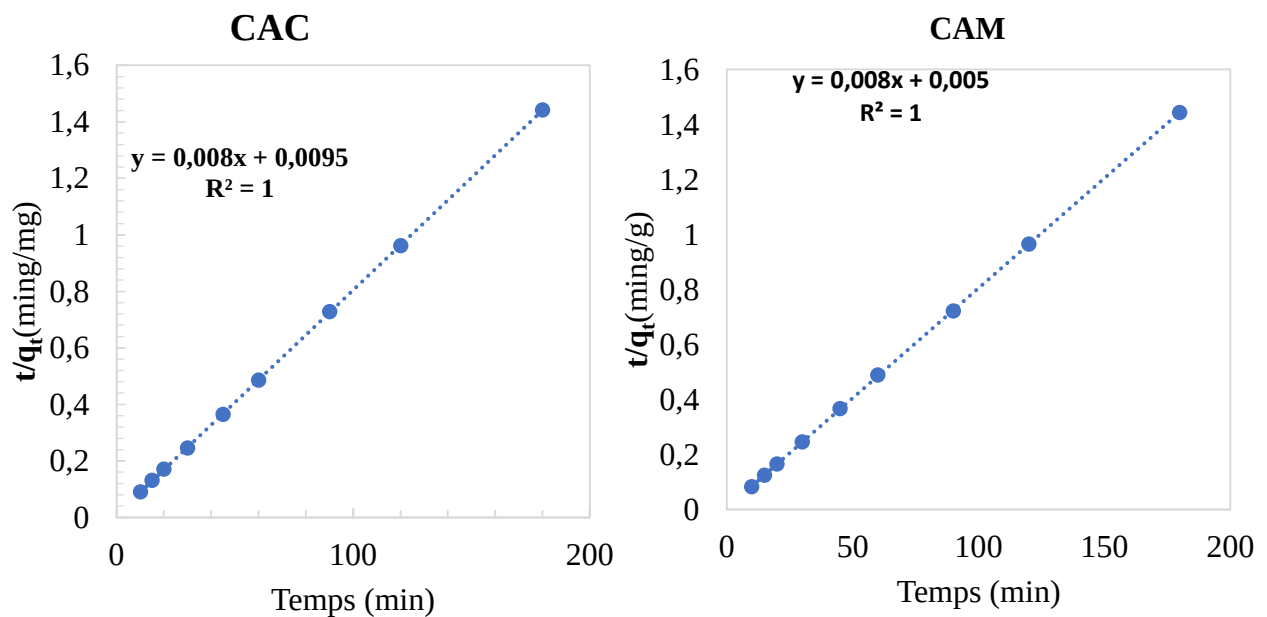


Figure IV.8 : Modèle du pseudo-deuxième ordre pour CAC et CAM

Tableau IV.9 : Paramètres du modèle du pseudo-deuxième ordre

Adsorbant	Équation de la droite	R^2	q_e calculé (mg/g)	k_2 ($\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)
CAC	$\frac{t}{q_t} = 0,008t + 0,0095$	1,000	125	0,006737
CAM	$\frac{t}{q_t} = 0,008t + 0,005$	1,000	125	0,0128

Le modèle du pseudo-deuxième ordre donne un excellent ajustement pour les deux adsorbants, avec :

$$R^2 = 1$$

Pour le **CAC** et le **CAM**.

Cela montre que ce modèle décrit très bien la cinétique d'adsorption du vert de malachite. La constante k_2 du **CAM** est plus élevée que celle du **CAC**, ce qui indique que le charbon actif modifié présente une vitesse d'adsorption plus importante.

IV.3.3. Modèle de diffusion intra-particulaire

Le modèle de diffusion intra-particulaire permet de vérifier si la diffusion du colorant à l'intérieur des pores du charbon actif contrôle la vitesse globale d'adsorption.

L'équation du modèle est :

$$q_t = k_{id}t^{1/2} + C \quad \text{IV.5}$$

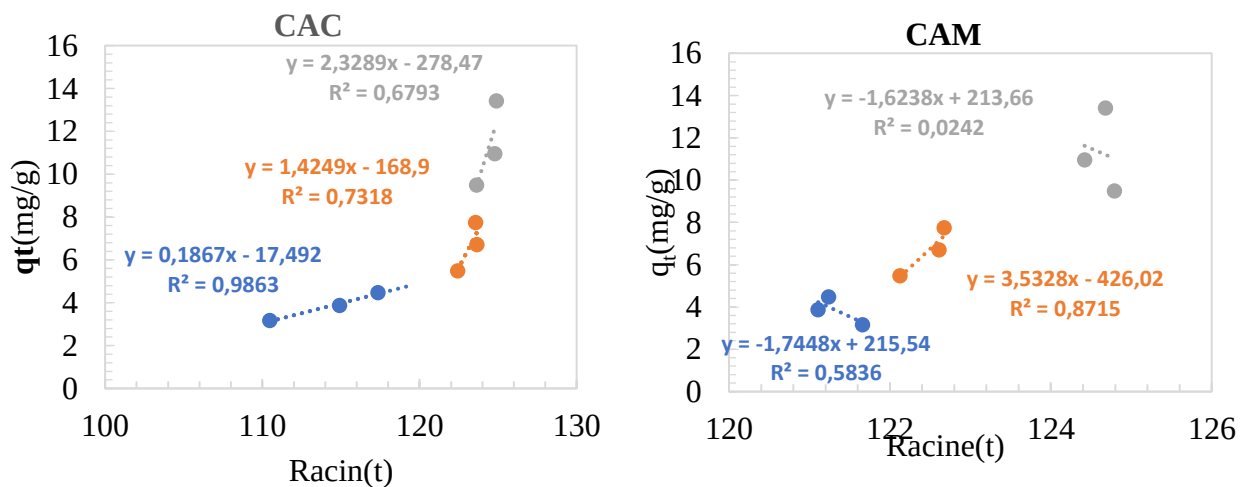


Figure IV.9 : Modèle de diffusion intra-particulaire pour CAC et CAM.

Tableau IV.10 : Paramètres du modèle de diffusion intra-particulaire

Adsorbant	Équation de la droite	R^2	k_{id}	C
CAC	$q_t = 0,253t^{1/2} + 121,44$	0,6689	0,253	121,44
CAM	$q_t = 0,2467t^{1/2} + 120,83$	0,8704	0,2467	120,83

Le coefficient de corrélation du modèle de diffusion intra-particulaire est plus élevé pour le **CAM** que pour le **CAC**. Cela montre que ce modèle représente mieux le comportement du charbon actif modifié.

Cependant, les droites ne passent pas par l'origine, car les valeurs de C sont différentes de zéro. Cela signifie que la diffusion intra-particulaire n'est pas la seule étape contrôlant l'adsorption. D'autres phénomènes interviennent également, comme la diffusion externe et la résistance du film liquide autour des particules.

IV.3.4. Comparaison des modèles cinétiques

Tableau IV.11 : Comparaison des modèles cinétiques

Modèle cinétique	Paramètres	CAC	CAM
Pseudo premier ordre	R^2	0.7211	0.7528
	k_1 (min^{-1})	0.0142	0.2405
	$\log(q_e)$	1.0628	29.732
Pseudo deuxième ordre	R^2	1.000	1.000
	$(k_2 (\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}))$	0.006737	0.0128
	$(q_e) (\text{mg/g})$	125	125
Diffusion intra-particulaire (DIP)	R^2	0.6689	0.8704
	k_{id}	0.253	0.2467
	C	121.44	120.83

La comparaison des coefficients de corrélation montre que le modèle du **pseudo-deuxième ordre** est le plus adapté pour décrire l'adsorption du vert de malachite sur les deux adsorbants. Ce modèle présente le meilleur ajustement avec :

$$R^2 = 1$$

Pour le **CAC** et le **CAM**.

La valeur plus élevée de k_2 pour le **CAM** confirme que la modification du charbon actif par les nanoparticules d'argent améliore la vitesse d'adsorption.

IV.4 Étude des isothermes d'adsorption

Les isothermes d'adsorption permettent de décrire la relation entre la quantité adsorbée à l'équilibre q_e et la concentration résiduelle C_e du vert de malachite en solution. Elles permettent d'évaluer la capacité d'adsorption du **CAC** et du **CAM**.

Les modèles utilisés sont :

- Langmuir ;
- Freundlich ;
- Temkin.

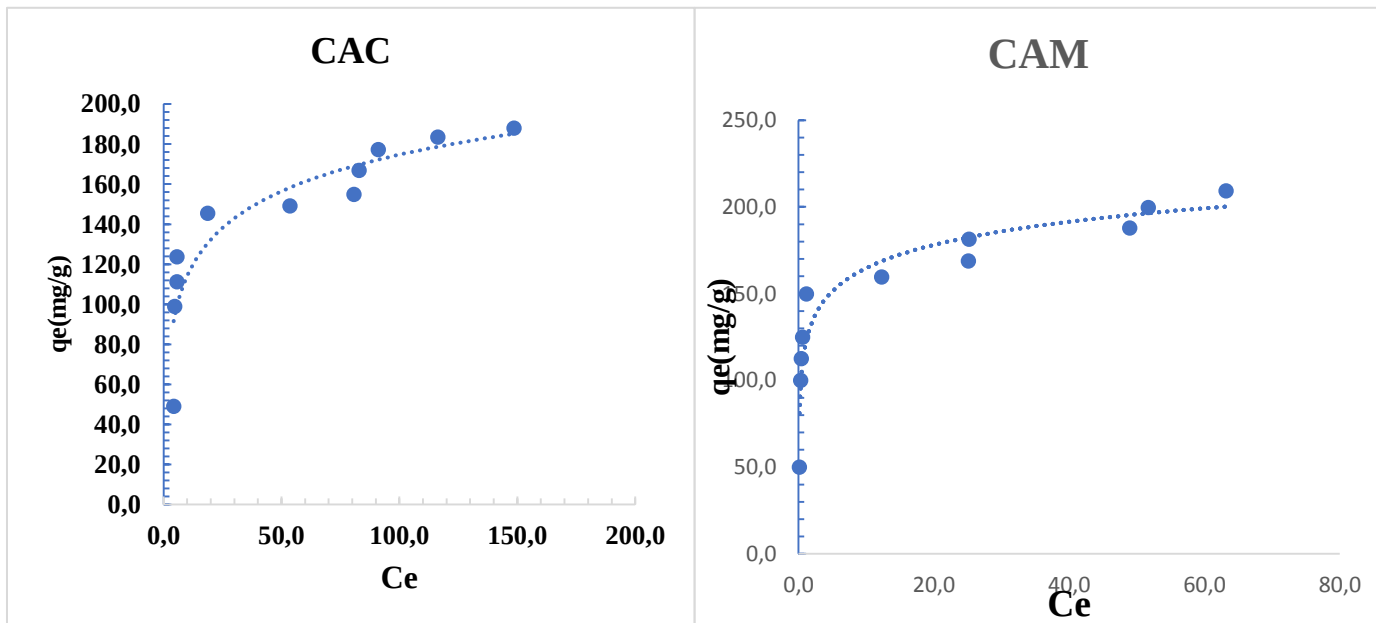


Figure IV.10 : Décrire la relation entre la quantité adsorbée à l'équilibre q_e et la concentration résiduelle C_e

IV.4.1. Modèle de Langmuir

Le modèle de Langmuir suppose que l'adsorption se produit en monocouche sur une surface homogène contenant un nombre limité de sites actifs identiques.

La forme linéaire utilisée est :

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{max}K_L} + \frac{C_e}{q_{max}} \quad \text{IV.6}$$

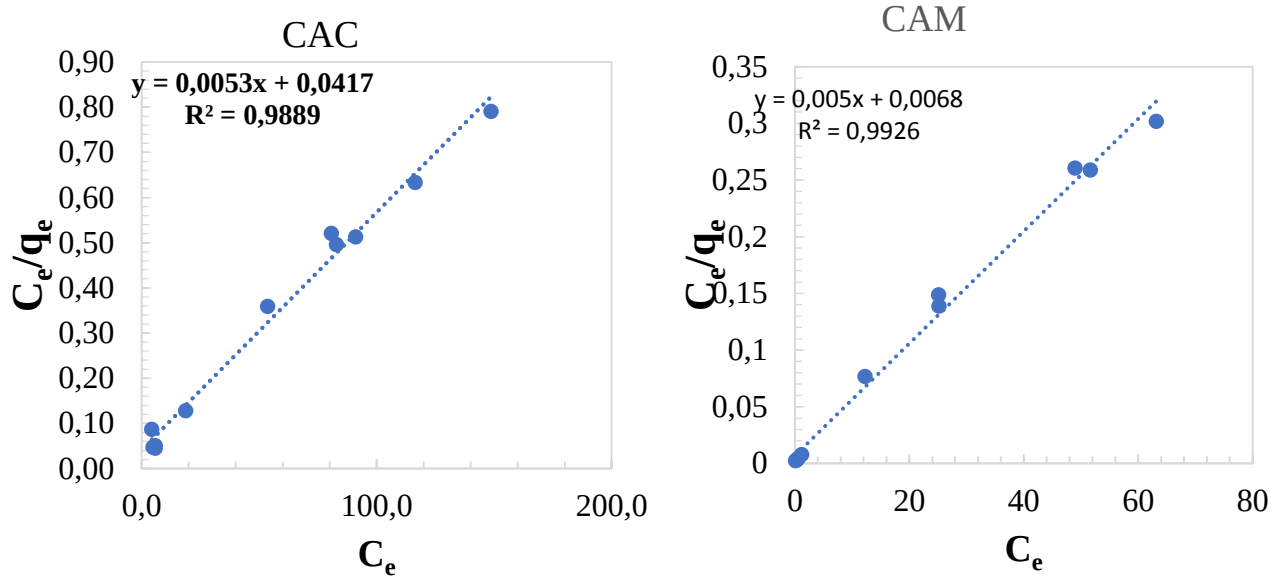


Figure IV.11 : modèle de Langmuir pour CAC et CAM.

Tableau IV.12 : Paramètres du modèle de Langmuir

Adsorbant	Équation de la droite	R^2	$q_{max}(\text{mg/g})$	K_L
CAC	$\frac{C_e}{q_e} = 188,12C_e - 7,2189$	0,9889	188,6	-26,06
CAM	$\frac{C_e}{q_e} = 0,005C_e + 0,0068$	0,9926	200	0,735

Les coefficients de corrélation du modèle de Langmuir sont élevés pour les deux adsorbants : $R^2 = 0,9889$ pour le **CAC** et $R^2 = 0,9926$ pour le **CAM**. Cela montre que ce modèle décrit bien l'adsorption du vert de malachite.

Cependant, la valeur négative de K_L pour le **CAC** n'a pas de signification physique. Cela signifie que les paramètres de Langmuir du CAC doivent être interprétés avec prudence. Pour le **CAM**, les paramètres sont plus cohérents, avec une capacité maximale de :

$$q_{max} = 200 \text{ mg/g}$$

IV.4.2. Modèle de Freundlich

Le modèle de Freundlich est utilisé pour décrire l'adsorption sur une surface hétérogène avec des sites d'énergie différente.

La forme linéaire est :

$$\log(q_e) = \log(K_F) + \frac{1}{n} \log(C_e) \quad \text{IV.7}$$

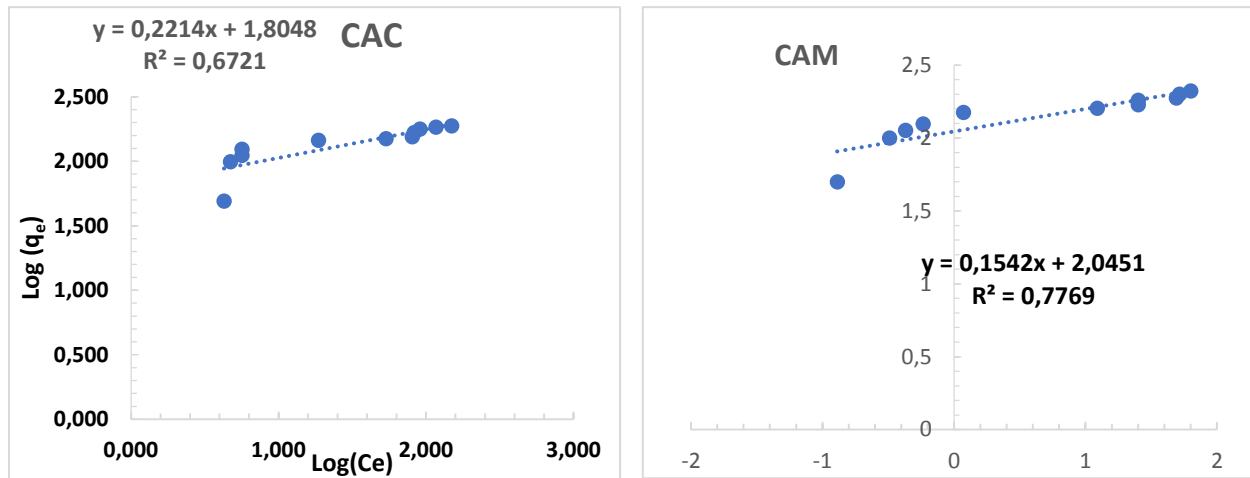


Figure IV.12 : Modèle de Freundlich pour CAC et CAM.

Tableau IV.13 : Paramètres du modèle de Freundlich

Adsorbant	Équation de la droite	R^2	K_F	$1/n$	n
CAC	$\log(q_e) = 0,2214\log(C_e) + 1,8048$	0,6721	63,79	0,2214	4,52
CAM	$\log(q_e) = 0,1542\log(C_e) + 2,0451$	0,7769	110,94	0,1542	6,49

Les valeurs de $1/n$ sont comprises entre 0 et 1 pour les deux adsorbants. Cela indique que l'adsorption du vert de malachite est favorable. Le **CAM** présente une valeur de K_F plus élevée que le **CAC**, ce qui traduit une meilleure capacité d'adsorption.

Cependant, les valeurs de R^2 du modèle de Freundlich sont plus faibles que celles obtenues avec Langmuir. Ce modèle décrit donc moins bien les résultats expérimentaux.

IV.4.3 Modèle de Temkin

Le modèle de Temkin prend en compte les interactions entre les molécules adsorbées. Il suppose que la chaleur d'adsorption diminue avec l'augmentation du recouvrement de la surface.

La forme linéaire utilisée est :

$$q_e = B_T \log(C_e) + B_T \log(A_T) \quad \text{IV.8}$$

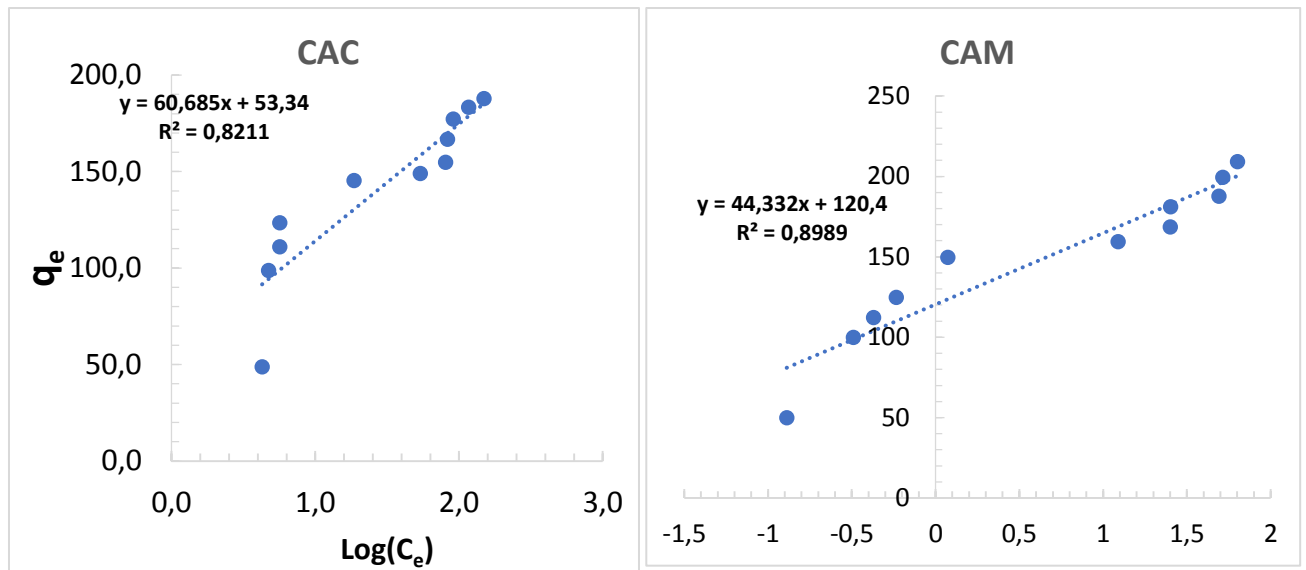


Figure IV.13 : Modèle de Temkin pour CAC et CAM

Tableau IV.14 : Paramètres du modèle de Temkin

Adsorbant	Équation de la droite	R^2	A_T	b_T
CAC	$q_e = 60,685\log(C_e) + 53,34$	0,8211	7,57	94,07
CAM	$q_e = 44,332\log(C_e) + 120,4$	0,8989	519,84	128,78

Le modèle de Temkin donne un ajustement moyen à bon, avec $R^2 = 0,8211$ pour le **CAC** et $R^2 = 0,8989$ pour le **CAM**. Le modèle décrit donc mieux l'adsorption dans le cas du charbon actif modifié.

Cependant, les coefficients de corrélation restent inférieurs à ceux obtenus avec Langmuir. Le modèle de Langmuir reste donc le plus adapté pour représenter l'équilibre d'adsorption dans cette étude.

III.4.2.4. Résultats des modèles d'isothermes

Tableau IV.15 : Résultats des modèles d'isothermes

Modèle	Paramètre	CAC	CAM
Langmuir	R^2	0.9889	0.9926
	$q_{\max}$	0.00531	200
	K_L	-26.06	0.735
Freundlich	R^2	0.6721	0.7769
	K_F	63.79	110.94
	n	4.52	6.49
Temkin	R^2	0.8211	0.8989
	A_T	7.57	519.84
	b_T	94.07	128.78

Les résultats montrent que le modèle de **Langmuir** présente les meilleurs coefficients de corrélation pour les deux adsorbants, avec $R^2 = 0,9889$ pour le **CAC** et $R^2 = 0,9926$ pour le **CAM**. Cela indique que l'adsorption du vert de malachite se rapproche d'un comportement de type monocouche sur des sites actifs relativement homogènes.

Le modèle de **Freundlich** donne des coefficients plus faibles, ce qui montre qu'il décrit moins bien les résultats expérimentaux. Le modèle de **Temkin** présente un ajustement intermédiaire, meilleur que Freundlich mais inférieur à Langmuir.

Ainsi, le modèle de Langmuir est le plus adapté pour décrire l'équilibre d'adsorption du vert de malachite sur le **CAC** et le **CAM**. Le meilleur R^2 obtenu pour le **CAM** confirme que la modification du charbon actif améliore son comportement d'adsorption.

IV.6 Discussion générale des résultats

Les résultats obtenus au cours de cette étude ont permis de mettre en évidence l'efficacité du charbon actif commercial (CAC) et du charbon actif modifié par nanoparticules d'argent (CAM) pour l'élimination du vert de malachite en solution aqueuse. Les essais réalisés ont montré que les performances d'adsorption dépendent fortement des conditions opératoires ainsi que des propriétés physicochimiques des adsorbants utilisés.

Les résultats de caractérisation ont révélé une amélioration des propriétés adsorbantes du charbon actif après modification. En particulier, l'indice d'iode obtenu pour le CAM est supérieur à celui du CAC, ce qui indique une meilleure microporosité et une plus grande accessibilité des sites actifs. Cette amélioration peut être attribuée à la présence des nanoparticules d'argent déposées à la surface du charbon actif, favorisant les interactions entre l'adsorbant et les molécules du colorant.

L'étude des paramètres opératoires a montré que l'augmentation du temps de contact entraîne une augmentation de la quantité adsorbée jusqu'à l'atteinte de l'équilibre. Cette évolution s'explique par la disponibilité initiale d'un grand nombre de sites actifs, suivie d'une saturation progressive de la surface de l'adsorbant. L'augmentation de la masse d'adsorbant améliore également le rendement d'élimination grâce à l'augmentation du nombre de sites d'adsorption disponibles.

Le pH s'est révélé être un paramètre important dans le processus d'adsorption. Les meilleurs résultats ont été obtenus dans les conditions favorisant les interactions électrostatiques entre la surface des adsorbants et le vert de malachite, qui est un colorant cationique. La concentration initiale du colorant influence également le phénomène d'adsorption en modifiant la force motrice du transfert de matière entre la solution et la surface du solide.

L'étude cinétique a permis d'identifier le modèle décrivant le mieux le mécanisme d'adsorption. Les résultats obtenus indiquent que l'adsorption du vert de malachite se déroule en plusieurs étapes successives comprenant la diffusion externe, la diffusion intra-particulaire et la fixation sur les sites actifs. Le modèle cinétique présentant le meilleur coefficient de corrélation a permis de décrire convenablement les données expérimentales.

L'analyse des isothermes d'adsorption a permis de déterminer le modèle le plus adapté à l'équilibre adsorption-désorption. Les paramètres obtenus confirment l'existence d'une forte affinité entre le vert de malachite et les matériaux étudiés. Les capacités d'adsorption calculées

montrent que le charbon actif modifié possède des performances supérieures à celles du charbon actif commercial.

Dans l'ensemble, les résultats obtenus démontrent que la modification du charbon actif par des nanoparticules d'argent améliore ses propriétés adsorbantes et augmente son efficacité pour l'élimination du vert de malachite. Le charbon actif modifié apparaît ainsi comme un adsorbant prometteur pour le traitement des eaux contaminées par les colorants organiques.

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail était d'évaluer l'efficacité du charbon actif commercial (CAC) et du charbon actif modifié par des nanoparticules d'argent (CAM) pour l'élimination du vert de malachite en solution aqueuse par adsorption.

Dans un premier temps, une étude bibliographique a permis de mettre en évidence l'intérêt de l'adsorption comme technique efficace pour le traitement des eaux contaminées par les colorants organiques. Les propriétés du charbon actif ainsi que l'apport des nanomatériaux dans l'amélioration des performances adsorbantes ont également été présentés.

Sur le plan expérimental, le charbon actif modifié a été préparé par imprégnation au nitrate d'argent suivie d'une réduction chimique. Les résultats de caractérisation ont montré une amélioration des propriétés adsorbantes du matériau modifié, notamment à travers l'augmentation de l'indice d'iode, traduisant une meilleure capacité d'adsorption.

L'étude de l'influence des paramètres opératoires a révélé que le temps de contact, le pH, la masse d'adsorbant, la concentration initiale du colorant et la température affectent significativement le processus d'adsorption. Les résultats obtenus ont montré que le charbon actif modifié présente globalement des performances supérieures à celles du charbon actif commercial pour l'élimination du vert de malachite.

Les études cinétiques et les modèles d'isothermes ont permis de mieux comprendre le mécanisme d'adsorption ainsi que les interactions entre le colorant et la surface des adsorbants. Les modèles retenus ont montré une bonne adéquation avec les résultats expérimentaux et ont permis d'estimer les capacités d'adsorption des matériaux étudiés.

En conclusion, la modification du charbon actif par des nanoparticules d'argent constitue une approche prometteuse pour améliorer l'élimination des colorants organiques présents dans les eaux usées. Le charbon actif modifié apparaît ainsi comme un adsorbant performant pouvant contribuer au développement de procédés de traitement des eaux plus efficaces et plus durables.

Perspectives

Dans la continuité de ce travail, plusieurs perspectives peuvent être envisagées :

- Étudier l'adsorption d'autres colorants ou polluants organiques sur le charbon actif modifié.
- Réaliser des analyses de caractérisation complémentaires (MEB, DRX, FTIR, BET MET) afin de mieux comprendre les modifications de surface.
- Évaluer les possibilités de régénération et de réutilisation des adsorbants après adsorption.
- Étendre l'étude à des effluents industriels réels afin de confirmer les performances du matériau dans des conditions pratiques.
- Optimiser les conditions de synthèse des nanoparticules d'argent afin d'améliorer davantage les capacités adsorbantes du matériau.

Références bibliographiques

- [1] **ALI, Imran., GUPTA, V.K. 2007.** Advances in water treatment by adsorption technology. *Nature Protocols*, 1(6), p. 2661-2667.
- [2] **AL-HARBI, Nuha., ABD-ELRAHMAN, Nabil K. 2025.** Physical methods for preparation of nanomaterials, their characterization and applications: a review. *Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences*, 11, p. 356-377.
- [3] **DĄBROWSKI, Andrzej. 2001.** Adsorption — from theory to practice. *Advances in Colloid and Interface Science*, 93, p. 135-224.
- [4] **ABOUBACAR BARMOU, Hassane. 2023.** *Adsorption des cations métalliques sur un déchet agricole.* Mémoire de Master. Université 8 Mai 1945 Guelma. 67 p.
- [5] **GHARBI, Hanane Kheira., GUENTRAH, Khadidja. 2021.** *Isothermes d'adsorption d'un polluant de l'industrie textile.* Mémoire de Master Académique. Université Abdel Hamid Ibn Badis Mostaganem. 47 p.
- [6] **HEMIDA, Meryem Nesrine. 2022.** *Étude de l'adsorption du cadmium sur un charbon actif issu d'algue marine.* Mémoire de Master. Université 8 Mai 1945 Guelma. 93 p.
- [7] **BENHAMOU, Abdellah. 2022.** *Procédés d'adsorption — ADSORPTION, partie 1.* Support de cours. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, Département de Génie Chimique. 65 p.
- [8] **GUPTA, V. K., SUHAS. 2009.** Application of low-cost adsorbents for dye removal — A review. *Journal of Environmental Management*, 90, p. 2313-2342.
- [9] **AHMED, Mohamed J., DHEDAN, Saif K. 2012.** Equilibrium isotherms and kinetics modeling of methylene blue adsorption on agricultural wastes-based activated carbons. *Fluid Phase Equilibria*, 317, p. 9-14.
- [10] **WEBER, Walter J., MORRIS, J. Carrell. 1963.** Kinetics of adsorption on carbon from solution. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, 89(SA2), p. 31-59.
- [11] **MALL, Indra Deo., SRIVASTAVA, Vimal Chandra., AGARWAL, Nitin Kumar. 2006.** Removal of Orange-G and Methyl Violet dyes by adsorption onto bagasse fly ash: kinetic study and equilibrium isotherm analyses. *Dyes and Pigments*, 69(3), p. 210-223.
- [12] **NASUHA, N., HAMEED, B. H. 2011.** Adsorption of methylene blue from aqueous solution onto NaOH-modified rejected tea. *Chemical Engineering Journal*, 166(2), p. 783-786.
- [13] **FORGACS, Esther., CSERHÁTI, Tibor., OROS, Gyula. 2004.** Removal of synthetic dyes from wastewaters: a review. *Environment International*, 30, p. 953-971.
- [14] **RANGABHASHIYAM, S., ANU, N., SELVARAJU, N. 2013.** Sequestration of dye from textile industry wastewater using agricultural waste products as adsorbents. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1, p. 629-641.
- [15] **ZHANG, Z., MOGHADDAM, L., O'HARA, I. M., DOHERTY, W. O. S. 2011.** Congo Red adsorption by ball-milled sugarcane bagasse. *Chemical Engineering Journal*, 178, p. 122-128.

Références bibliographiques

- [16] MA, Jianfeng., YU, Fei., ZHOU, Li., YANG, Li., LIAO, Xiaojun., ZHANG, Yuhua., LI, Miao., WANG, Shuguang., ZHANG, Zhen. 2012. Enhanced adsorptive removal of methyl orange and methylene blue from aqueous solution by alkali-activated multiwalled carbon nanotubes. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 4(11), p. 5749-5760.
- [17] HO, Y.S., McKAY, G. 1999. Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*, 34, p. 451-465.
- [18] EL-GEUNDI, Mohamed S. 1997. Adsorbents for industrial pollution control. *Adsorption Science & Technology*, 15, p. 777-787.
- [19] RUTHVEN, Douglas M. 1984. *Principles of Adsorption and Adsorption Processes*. New York : Wiley. 433 p.
- [20] YANG, Ralph T. 2003. *Adsorbents: Fundamentals and Applications*. Hoboken : Wiley. 410 p.
- [21] CHERFOUF, Saliha. 2012. *Adsorption des colorants textiles sur charbon actif et zéolithe ZSM-5 : Cas du Bleu cibacette, du Brun solophenyle et du Rouge citylon*. Mémoire de Master. Université Saad Dahleb de Blida. 100 p.
- [22] LANGMUIR, Irving. 1916. The constitution and fundamental properties of solids and liquids. Part I. Solids. *Journal of the American Chemical Society*, 38(11), p. 2221-2295.
- [23] BENAMRAOUI, Faouzia. 2014. *Élimination des colorants cationiques par des charbons actifs synthétisés à partir des résidus de l'agriculture*. Mémoire de Magister. Université Ferhat Abbas Sétif-1. 103 p.
- [24] FREUNDLICH, Herbert. 1906. Über die Adsorption in Lösungen. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 57, p. 385-470.
- [25] TEMKIN, M. J., PYZHEV, V. 1940. Recent modifications to Langmuir isotherms. *Acta Physicochimica URSS*, 12, p. 327-356.
- [26] LAGERGREN, Sven. 1898. Zur Theorie der sogenannten Adsorption gelöster Stoffe. *Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar*, 24(4), p. 1-39.
- [27] GUESMIA, Cherifa Yasmine. 2017. *Étude de la cinétique de l'adsorption du vert de malachite sur un adsorbant à base de grains de citrouille*. Mémoire de Master. Université Badji Mokhtar Annaba. 61 p.
- [28] GHADIRI, Mohammad., HALLAJZADEH, Jamal., AKHGHARI, Zahra., NIKKHAH, Elhameh., OMAR OTHMN, Hazha. 2023. Green synthesis and antibacterial effects of silver nanoparticles on novel activated carbon. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 42(10), p. 3198-3207.
- [29] WESTCOTT, Sarah L., OLDENBURG, Steven J., LEE, T. Randall., HALAS, Naomi J. 1998. Formation and adsorption of clusters of gold nanoparticles onto functionalized silica nanoparticle surfaces. *Langmuir*, 14(19), p. 5396-5401.
- [30] POISSON, Régis. 2015. Le charbon actif. *L'actualité chimique*, 396, p. 63-64
- [31] BECHKI, Mohammed Khaled. 2018. *Préparation et caractérisation du charbon actif à partir des noyaux du palmier dattier et des coquilles des noix*. Thèse de Doctorat. Université Kasdi Merbah Ouargla. 134 p.
- [32] GIRGIS, B. S., EL-HENDAWY, A. A. 2002. Porosity development in activated carbons obtained from date pits under chemical activation with phosphoric acid. *Microporous and Mesoporous Materials*, 52(2), p. 105-117.

Références bibliographiques

- [33] RAI, H. S., BHATTACHARYYA, M. S., SINGH, J., BANSAL, T. K., VATS, P., BANERJEE, U. C. 2005. Removal of dyes from the effluent of textile and dyestuff manufacturing industry: a review of emerging techniques with reference to biological treatment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 35, p. 219-238.
- [34] AYGÜN, Ayşe., YENISOY-KARAKAŞ, Serpil., DUMAN, Işık. 2003. Production of granular activated carbon from fruit stones and nutshells and evaluation of their physical, chemical and adsorption properties. *Microporous and Mesoporous Materials*, 66, p. 189-195

Annexe

1. Effet du temps de contact

Tableau a : Effet du temps de contact sur l'adsorption du vert de malachite par CAC

TIME	ABS	Ceq	Q	TIME	Taux CAC
0	0	0	0	0	0
30	1,214	78,4237726	210,788114	30	84,3152455
60	0,775	50,0645995	224,9677	60	89,9870801
90	0,318	20,5426357	239,728682	90	95,8914729
120	0,139	8,97932817	245,510336	120	98,2041344
180	0,081	5,23255814	247,383721	180	98,9534884

Tableau b : Effet du temps de contact sur l'adsorption du vert de malachite par CAM

TIME	ABS	Ceq	Q	TIME	Taux CAM
0	0	0	0	0	0
30	0,194	12,5322997	243,73385	30	97,4935401
60	0,068	4,39276486	247,803618	60	99,121447
90	0,055	3,55297158	248,223514	90	99,2894057
120	0,036	2,3255814	248,837209	120	99,5348837
180	0,01	0,64599483	249,677003	180	99,870801

2. Effet de la dose de l'adsorbant

Tableau c : Effet de la dose de l'adsorbant sur l'adsorption du vert de malachite par CAC

ABS	Ceq	q1	masse	dose	taux % CAC
0	0	0	0	0	0
1,693	109,367	195,317	0,050	2,000	78,127
0,760	49,096	112,726	0,100	4,000	90,181
0,663	4,283	82,620	0,150	6,000	99,143
0,113	0,730	62,409	0,200	8,000	99,854

Tableau d : Effet de la dose de l'adsorbant sur l'adsorption du vert de malachite CAM

ABS	Ceq	q1	masse	dose	taux % CAM
0	0	0	0	0	0
0,729	47,093	226,453	0,050	2,000	90,581
0,077	0,497	124,876	0,100	4,000	99,901
0,037	0,239	83,293	0,150	6,000	99,952
0,030	0,194	62,476	0,200	8,000	99,961

3. Effet du Temperature

Tableau e : Effet du Temperature sur l'adsorption du vert de malachite par CAC

ABS	CEQ	T	T(K)	Kd	1/T	Ln(Kd)	X C
0,64	4,11	25,00	298,15	30,17	3,35	3,41	123,97
0,52	3,38	30,00	303,15	36,75	3,30	3,60	124,16
0,31	2,02	40,00	313,15	61,77	3,19	4,12	124,50
0,20	1,30	45,00	318,15	96,02	3,14	4,56	124,68

Tableau f : Effet du temperature sur l'adsorption du vert de malachite par CAM

ABS	CEQ	T	T(K)	Kd	1000/T	Ln(Kd)	X M
0,13	0,87	25,00	298,15	144,15	3,35	4,97	124,78
0,15	0,96	30,00	303,15	129,62	3,30	4,86	124,76
0,16	1,03	40,00	313,15	120,69	3,19	4,79	124,74
0,17	1,12	45,00	318,15	110,96	3,14	4,71	124,72

Tableau g : parametres effet du temperature sur l'adsorption du vert de malachite par CAM

Paramètres	CAC	CAM
T (K)	298 ; 303 ; 313 ; 318	298 ; 303 ; 313 ; 318
ΔH (kJ·mol ⁻¹)	44,610	-9,391
ΔS (kJ·mol ⁻¹ ·K ⁻¹)	0,177	0,010
ΔG (kJ·mol ⁻¹)	-8,284 ; -9,171 ; -10,940 ; -11,800	-12,281 ; -12,329 ; -12,426 ; -12,475
R ²	0,9758	0,9599

4. Effet du PH

Tableau h : Effet du PH sur l'adsorption du vert de malachite par CAC

ABS	Ceq	q1	PH	taux % CAC
0,812	5,245	123,689	2,0	99,0
0,780	5,039	123,740	3,0	99,0
0,830	5,362	123,660	3,9	98,9
0,795	5,136	123,716	4,0	99,0
0,040	0,258	124,935	5,0	99,9
0,940	6,072	123,482	6,0	98,8
0,821	5,304	123,674	7,0	98,9
0,746	4,819	123,795	9,0	99,0

Tableau i : Effet du PH sur l'adsorption du vert de malachite par CAM

ABS	Ceq	q1	PH	taux % CAM
0,082	0,530	124,868	2,0	99,9
0,028	0,181	124,955	3,0	100,0
0,083	0,536	124,866	3,9	99,9
0,015	0,097	124,976	4,0	100,0
0,040	0,258	124,935	5,0	99,9
0,084	0,543	124,864	6,0	99,9
0,210	1,357	124,661	7,0	99,7
0,046	0,297	124,926	9,0	99,9

5. Étude des isothermes d'adsorption

Tableau j : Étude des isothermes d'adsorption par CAC

TIME	ABS	Ceq	Q	TIME2	Taux CAC	t/q	racine(t)t	LOG(Qe-Qt)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	2,10
10,00	0,90	58,14	110,47	10,00	88,37	0,09	3,16	1,16
15,00	0,63	40,37	114,91	15,00	91,93	0,13	3,87	0,99
20,00	0,47	30,62	117,34	20,00	93,88	0,17	4,47	0,87
30,00	0,16	10,34	122,42	30,00	97,93	0,25	5,48	0,37
45,00	0,84	5,43	123,64	45,00	98,91	0,36	6,71	0,05
60,00	0,90	5,81	123,55	60,00	98,84	0,49	7,75	0,09
90,00	0,86	5,57	123,61	90,00	98,89	0,73	9,49	0,07
120,00	0,14	0,90	124,78	120,00	99,82	0,96	10,95	#NOMBRE!
180,00	0,08	0,52	124,87	180,00	99,90	1,44	13,42	#NOMBRE!

Tableau k : Étude des isothermes d'adsorption par CAM

TIME	ABS	Ceq	Q	TIME2	Taux CAM	t/q	racine(t)	LOG(Qe-Qt)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,10
10,00	0,21	13,37	121,66	10,00	97,33	0,08	3,16	0,48
15,00	0,24	15,57	121,11	15,00	96,89	0,12	3,87	0,55
20,00	0,23	15,05	121,24	20,00	96,99	0,16	4,47	0,54
30,00	0,18	11,50	122,13	30,00	97,70	0,25	5,48	0,41
45,00	0,15	9,56	122,61	45,00	98,09	0,37	6,71	0,32
60,00	0,14	9,30	122,67	60,00	98,14	0,49	7,75	0,30
90,00	0,01	0,84	124,79	90,00	99,83	0,72	9,49	#NOMBRE!
120,00	0,04	2,33	124,42	120,00	99,53	0,96	10,95	-0,59
180,00	0,02	1,29	124,68	180,00	99,74	1,44	13,42	

Tableau l : parametres Étude des isothermes d'adsorption

Modèle	Paramètre	CAC	CAM
Langmuir	R^2	0.9889	0.9926
	$q_{\max}$	0.00531	200
	K_L	-26.06	0.735
Freundlich	R^2	0.6721	0.7769
	K_F	63.79	110.94
	n	4.52	6.49
Temkin	R^2	0.8211	0.8989
	A_T	7.57	519.84
	b_T	94.07	128.78

6. Étude cinétique de l'adsorption

Tableau m : Étude cinétique de l'adsorption par CAC

Cinti	ABS	Ceq C	Qe CAC	Taux C	ce/qe C	log(ce) C	log(qe) C
200,0	0,0	4,3	48,9	97,9	0,1	0,6	1,7
400,0	0,7	4,7	98,8	98,8	0,0	0,7	2,0
450,0	0,9	5,6	111,1	98,7	0,1	0,8	2,0
500,0	0,9	5,6	123,6	98,9	0,0	0,8	2,1
600,0	0,3	18,6	145,3	96,9	0,1	1,3	2,2
650,0	0,8	53,6	149,1	91,8	0,4	1,7	2,2
700,0	0,6	80,6	154,8	88,5	0,5	1,9	2,2
750,0	0,6	82,8	166,8	89,0	0,5	1,9	2,2
800,0	0,7	91,0	177,3	88,6	0,5	2,0	2,2
850,0	0,9	116,3	183,4	86,3	0,6	2,1	2,3
900,0	1,2	148,6	187,9	83,5	0,8	2,2	2,3

Tableau n : Étude cinétique de l'adsorption par CAM

Cinti	ABS	Ceq M	Qe CAM	Taux M	ce/qe M	log(ce) M	log(qe) M
200,0	0,0	0,1	50,0	99,9	0,0	-0,9	1,7
400,0	0,1	0,3	99,9	99,9	0,0	-0,5	2,0
450,0	0,1	0,4	112,4	99,9	0,0	-0,4	2,1
500,0	0,1	0,6	124,9	99,9	0,0	-0,2	2,1
600,0	0,2	1,2	149,7	99,8	0,0	0,1	2,2
650,0	0,2	12,3	159,4	98,1	0,1	1,1	2,2
700,0	0,4	25,1	168,7	96,4	0,1	1,4	2,2
750,0	0,4	25,2	181,2	96,6	0,1	1,4	2,3
800,0	0,4	49,0	187,8	93,9	0,3	1,7	2,3
850,0	0,4	51,7	199,6	93,9	0,3	1,7	2,3
900,0	0,5	63,2	209,2	93,0	0,3	1,8	2,3

Tableau o : parametres Étude cinétique de l'adsorption

Modèle cinétique	Paramètres	CAC	CAM
Pseudo premier ordre	R ²	0.7211	0.7528
	k ₁ (min ⁻¹)	0.0142	0.2405
	log(q _e)	1.0628	29.732
Pseudo deuxième ordre	R ²	1.000	1.000
	(k ₂ (g·mg ⁻¹ ·min ⁻¹))	0.006737	0.0128
	(q _e) (mg/g)	125	125
Diffusion intra-particulaire (DIP)	R ²	0.6689	0.8704
	k _{id}	0.253	0.2467
	C	121.44	120.83