



République Algérienne Démocratique Populaire

Ministère de L'enseignement Supérieur

et de La Recherche Scientifique

Université Kasdi Merbah – Ouargla

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie des Procédés

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie des Procédés de l'Environnement

Présenté par :

KHELIFA BASMA NAIMI AMINA

Thème

Valorisation des déchets du palmier dattier à l'état brut comme biosorbants pour l'élimination du bleu de méthylène en colonne à lit fixe

Soutenu publiquement le :11/06/2026

Devant le jury composé de :

Mr : CHENNOUF Nasreddine

Pr : Université KM Ouargla

Président

Mr : CHERRAYE Ridha

MCA : Université KM Ouargla

Examineur

Mr : SEKIRIFA Mohamed Lamine

Pr : Université KM Ouargla

Encadreur

Année universitaire : 2025/2026

Remerciements

Louange à Dieu, le Très-Haut, le Tout-Puissant, qui nous a aidées et nous a accordé la patience et la volonté pour mener à bien ce travail. Louange à Lui qui a éclairé notre chemin vers le savoir et nous a permis d'achever notre parcours académique.

Nous, les étudiantes « *Khalifa Basma* » et « *Naimi Amina* », adressons nos sincères remerciements et notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

Nous exprimons tout particulièrement notre vive reconnaissance à notre encadrant, Monsieur « *SEKIRIFA Mohamed Lamine* », pour son accompagnement, ses précieux conseils et son soutien constant tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nous tenons également à adresser nos remerciements les plus sincères à l'enseignante « *Rabhi Lina Nada* » pour son soutien, ses orientations et sa contribution enrichissante à ce travail.

Nos remerciements vont aussi à toute l'équipe du *Laboratoire de Biogéochimie des Milieux Sahariens*, pour leur accueil, leur disponibilité et les moyens mis à notre disposition afin de mener à bien la partie expérimentale.

Nos remerciements s'adressent également aux membres du jury, le Dr CHERRAYE Ridha et le Professeur CHENNOUF Nasreddine, pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Enfin, nous exprimons notre gratitude à Madame « *Ben Zine Ibtissam* » pour son aide précieuse et sa grande gentillesse à notre égard.

اهداء

بسم الله الرحمان الرحيم

الحمد لله الذي أنار لنا درب العلم ومنحنا الصبر والعزيمة لنصل إلى ختام هذا المشوار من
قال أنا لها نالها وأنا لها ان أبت رغما عنها أتيت بها أهدي هذا النجاح لنفسى، "خليفة بسمة"،
فخرأ بما أنجزت

إلى السند الذي لا يميل، والقذوة التي أستمد منها قوتي، إلى من شيد لي جسور العبور نحو
النجاح إلى فخري واعتزازي والذي العزيز "خليفة محمد"

إلى منبع الحنان ودعواتها التي كانت تحرسني في كل خطوة، إلى والدتي الغالية "جريدي
يمينة"، إليك يهدى هذا الغرس لتجني ثمار فخري.

إلى عائلتي الكريمة، حصني المنيع ومصدر إلهامي، وإلى عمتي الغالية "خليفة وردة"،
شكراً لفيض مشاعرك وصدق ودك

إلى من تشاركت معهم الطفولة والذكريات، إلى سندي وعضدي في هذه الحياة، إخوتي
وأخواتي الأعزاء، أهديكم ثمرة جهدي تقديراً لوجودكم الدائم بجانبى ودعمكم الذي لم ينقطع

(بثينة خديجة اسيا منال ايناس هبة محمد زياد صلاح عقبة مريم صفية)

إلى رفيقة الدرب وصديقتي الوفية "حمدات أفنان"

وإلى كافة أصدقائي الذين كانوا لي نعم الإخوة والرفاق

إليكم جميعاً.. أهدي ثمرة هذا التخرج

اهداء

بسم الله الرحمن الرحيم

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، والذي وفقني وأعانني على إتمام هذا العمل.
وانا، نعيمي أمينة، أهدي ثمرة هذا النجاح أولاً إلى الله سبحانه وتعالى، الذي وفقني وأعانني
ومنحني القوة والصبر لإتمام هذا العمل.
إلى نفسي التي صبرت واجتهدت وثابرت، وسعت بكل عزيمة للتوفيق بين العمل والدراسة
وإنجاز هذه المذكرة، متجاوزة كل الصعوبات والتحديات حتى وصلت إلى هذه اللحظة التي
أفتخر بها.

إلى أبي العزيز، الذي كان سندي وقوتي ومصدر قوتي، والذي لم يبخل عليّ يوماً بدعمه
وتشجيعه، أهديك هذا الإنجاز عرفاناً بجميلك ووفاء لعطائك.
إلى أُمي الغالية، منبع الحنان والدعاء، التي كانت كلماتها ودعواتها ترافقني في كل خطوة
من هذا المشوار، أهديك ثمرة جهدي ومحبة لا تفيها الكلمات حقها.
إلى عائلتي الكريمة، وإلى كل شخص ساعدني ولو بكلمة طيبة أو دعاء صادق أو دعم
معنوي كان له أثر في مواصلة هذا الطريق.
وإلى جميع زملائي وإطارات العمل الذين رافقوني خلال مسيرتي، أتقدم بخالص الشكر
والامتنان على ما قدموه من تشجيع ومساندة.
إليكم جميعاً أهدي ثمرة هذا التخرج، تقديرًا وعرفانًا لما قدمتموه لي من دعم ومؤازرة.

Résumé

Résumé (Français) :

Cette étude évalue la valorisation des résidus du palmier dattier (feuilles, rachis et mélange) comme biosorbants naturels pour l'élimination du bleu de méthylène en colonne à lit fixe. Les essais réalisés avec une solution de 100 mg/L ont montré une très forte capacité d'adsorption. Les courbes de percée indiquent que le rapport C_f/C_0 est resté faible durant toute l'expérience, sans atteindre la percée ni la saturation du lit. Les rendements d'élimination ont dépassé 98 % après la mise en régime et se sont maintenus entre 99 et 100 % jusqu'à 585 h. Les feuilles de palmier ont présenté les meilleures performances initiales, tandis que les écarts entre les matériaux sont devenus faibles à long terme. Les résultats confirment le potentiel des résidus de palmier dattier comme matériaux efficaces, économiques et écologiques pour le traitement des eaux contaminées par les colorants.

Abstract (English)

This work investigates date palm residues (leaves, rachis and their mixture) as natural biosorbents for methylene blue removal in fixed-bed columns. Experiments conducted with a 100 mg/L dye solution demonstrated excellent adsorption performance. Breakthrough curves showed very low C_f/C_0 values throughout the operation period, with no breakthrough or bed saturation observed. Removal efficiencies exceeded 98% after start-up and remained between 99% and 100% for up to 585 h. Date palm leaves exhibited the best initial performance, while long-term differences among biosorbents became negligible. The findings highlight date palm residues as low-cost, renewable and environmentally friendly materials for dye-contaminated wastewater treatment.

الملخص (العربية)

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم مخلفات نخيل التمر (الجريد والعراجين ومزيجهما) واستعمالها كمواد امتزاز حيوية لإزالة صبغة أزرق الميثيلين في أعمدة السرير الثابت. أظهرت النتائج قدرة امتزاز عالية لجميع المواد، حيث بقيت نسبة C_f/C_0 منخفضة طوال التجربة دون الوصول إلى نقطة الاختراق أو تشبع السرير الممتز. كما تجاوزت كفاءة الإزالة 98 % بعد مرحلة الاستقرار واستقرت بين 99 و 100 % لمدة تشغيل بلغت 585 ساعة. حقق الجريد أفضل أداء في البداية، بينما أصبحت الفروق بين المواد محدودة على المدى الطويل. وتؤكد النتائج أن مخلفات نخيل التمر تمثل مواد امتزاز حيوية فعالة ومنخفضة التكلفة وصديقة للبيئة لمعالجة المياه الملوثة بالأصبغ.

Sommaire

Sommaire

Titre	Page
Remerciements	II
Dédicaces	III/IV
Résumé	VI
Liste des tableaux	X
Liste des figures	XI
Liste des abréviations	XII
Introduction générale	01
I. Partie bibliographique	
1.Généralités sur les déchets de palmier dattier et les phénomènes d'adsorption	04
2.Introduction	04
3.Le palmier dattier en Algérie	05
4.Principaux sous-produits des palmiers dattiers	06
4.1 Palmes et feuilles (jride)	05
4.2 Noyaux de dattes	05
4.3 Rebutis de dattes	05
4.4 Stipe (Tronc)	05
4.5Fibres (Lif)	15
5.Quantification des déchets du palmier dattier et évaluation de leurs impacts environnementaux .	06
II. Généralisés sur l'adsorption	07
1. Introduction	07
2. Définition de l'adsorption	07
3. Type d'adsorption	08
3.1Adsorption physique	08
3.2Adsorption chimique	08

Sommaire

4. Mécanisme d'adsorption	08
5. Principaux facteurs influençant sur l'adsorption	08
6. Modes d'adsorption	09
6.1 Adsorption en mode statique (batch)	09
6.2 Adsorption en mode continu (dynamique)	09
7. Modélisation de l'adsorption en système continu	10
7.1 Modèle de Bobart-Adams (Bobart et Adams., 1920)	10
7.2 Modèle de Bed Denth Service Time (BDST) (Hutchins., 1973)	11
7.3 Modèle de Thomas (Thomas. H. C., 1944)	11
7.4 Modèle de Yoon-Nelson (Yoon et Nelson., 1984)	12
7.5 Modèle de Walbarska	13
8. Conclusion	14
II. Partie expérimentale	
1.Introduction	16
2.Toxicité des colorants des rejets industriels	16
3.Matériels et appareillage	16
3.1 Matériels utilisés	16
3.2 Appareillage	17
3.3 Les produits utilisés	17
3.4 Préparation Solution mère de BM	18
3.5 Préparation des biosorbants	18
4.Résultats et discussion	19
5.Conclusion	25
Conclusion générale	27
Bibliographie et annexes	/

Liste des tableaux

N° des tableaux	Titre des tableaux	Page
01	Principales caractéristiques physico-chimiques du bleu de méthylène	18

Liste des figures

N° des figures	Titre des figures	Page
01	Quelques aspects de gestion des résidus de palmier dattier et leurs effets :	07
02	Description de courbe de percée pour un lit fixe.	10
03	Spectrophotomètre UV-Visible	17
04	Courbe l'étalonnage	19
05	Courbe de percée de l'adsorption du Blue de méthylène sur le biosorbant à base de palmes de palmier dattier (C0=100ppm). Colonne 1 : Les feuilles (Jrid).	20
06	Courbe de percée de l'adsorption du Blue de méthylène sur le biosorbant à base de régimes de palmier dattier (C0=100ppm). Colonne 2 : Régimes (Arjoun)	21
07	Courbe de percée de l'adsorption du Blue de méthylène sur le biosorbant issu d'un mélange (palmes-régimes) (C0=100ppm). Colonne 3 : Mélange (Régimes (Arjoun) et Les feuilles (Jrid)	22
08	Le rendement en fonction du temps pour les trois colonnes	24

Liste des abréviations

BM :	Bleu de Méthylène
BET	Brunauer, Emmett et Teller
C0 :	Concentration initiale du BM (mg.L-1)
Ct :	Concentration de sortie de BM (mg. L-1)
Cb :	Concentration de percée (mg.L-1)
PH :	Potentiel d'hydrogène
BDST :	Bed Depth Service Time
K _{BA} :	la constante cinétique du modèle en (L.mg ⁻¹ .min ⁻¹)
N ₀ :	la concentration de saturation du modèle en (mg. L ⁻¹)
F :	la vitesse linéaire en (cm.min ⁻¹)
Z :	la hauteur du lit adsorbant en (cm)
t :	le temps d'écoulement (min).
tb :	Le temps de percé (min),
N0 ' :	La capacité d'adsorption de ce modèle (mg. L ⁻¹)
Ka :	la constante cinétique (L.mg ⁻¹ .min ⁻¹)
k _{th} :	Constante cinétique de Thomas (ml mg ⁻¹ min ⁻¹).
q _{th} :	Capacité théorique maximale du soluté adsorbé (mg g ⁻¹).
M :	Quantité de l'adsorbant dans la colonne (g).
U :	Débit de filtration en (mL min ⁻¹).
βa:	Le coefficient cinétique de transfert de masse externe (min ⁻¹).

Introduction générale

Introduction générale

La pollution des ressources hydriques par les effluents industriels constitue aujourd'hui l'un des principaux défis environnementaux à l'échelle mondiale. Parmi les contaminants les plus préoccupants figurent les colorants synthétiques, largement utilisés dans les industries textile, papetière, pharmaceutique et cosmétique.

Environ 10 à 15 % des colorants produits sont rejetés dans les effluents industriels lors des différentes étapes de fabrication et de teinture [1].

Le bleu de méthylène est un colorant cationique fréquemment utilisé dans les industries textiles et comme indicateur chimique. Sa présence dans les eaux usées peut réduire la pénétration de la lumière dans les milieux aquatiques et perturber les processus biologiques naturels [2].

Parmi les différentes techniques de traitement des eaux contaminées, l'adsorption est considérée comme l'une des plus efficaces grâce à sa simplicité de mise en œuvre, son faible coût d'exploitation et son rendement élevé dans l'élimination des polluants organiques dissous [3].

Face au coût relativement élevé du charbon actif commercial, de nombreux travaux se sont orientés vers la recherche de biosorbants issus de déchets agricoles abondants et renouvelables [4]. Ces matériaux présentent l'avantage d'être peu coûteux, biodégradables et disponibles en grandes quantités.

Dans notre région saharienne Algériennes, le palmier dattier constitue une ressource agricole stratégique générant annuellement d'importantes quantités de résidus lignocellulosiques, notamment les palmes et les rachis des régimes. Ces sous-produits, souvent éliminés par brûlage ou abandonnés dans les palmeraies, représentent une source potentielle de matériaux adsorbants à faible coût [5].

Les palmes et les rachis du palmier dattier sont principalement constitués de cellulose, d'hémicellulose et de lignine. La présence de groupements fonctionnels hydroxyles, carbonyles et carboxyles favorise l'interaction avec les molécules de colorants présentes dans les solutions aqueuses [4].

Bien que de nombreuses études aient été réalisées en réacteur discontinu (batch), les procédés d'adsorption en colonne à lit fixe sont davantage adaptés aux applications industrielles en raison de leur fonctionnement continu et de leur facilité de mise à l'échelle. L'analyse des courbes de percée permet d'évaluer les performances dynamiques du matériau adsorbant et de prédire le comportement du système à grande échelle [6].

Le présent mémoire est structuré en deux parties principales. La première partie est consacrée à une étude bibliographique portant sur les sous-produits du palmier dattier, en particulier les palmes et les rachis des régimes, abondamment disponibles dans la région de Ouargla. Cette partie présente également les principes fondamentaux de l'adsorption, les

facteurs influençant ce phénomène ainsi que les procédés d'adsorption en mode dynamique sur colonne à lit fixe.

La seconde partie est consacrée à l'étude expérimentale. Elle consiste à évaluer les performances de trois biosorbants bruts issus des déchets du palmier dattier pour l'élimination du bleu de méthylène en colonne à lit fixe. Le suivi de l'évolution de la concentration du colorant à la sortie des colonnes en fonction du temps a permis d'établir les courbes de percée et d'analyser le comportement dynamique des différents matériaux adsorbants. Les résultats obtenus ont ensuite été comparés afin de déterminer le biosorbant le plus performant et d'évaluer le potentiel de valorisation de ces déchets agricoles dans le traitement des eaux contaminées. Enfin, ce travail s'achève par une conclusion générale récapitulant les principaux résultats obtenus ainsi que les perspectives de recherche envisageables.

I. Partie bibliographique

1. Généralités sur les déchets de palmier dattier et les phénomènes d'adsorption

2. Introduction :

La pollution hydrique constitue aujourd'hui l'un des principaux problèmes environnementaux à l'échelle mondiale. L'accroissement des activités industrielles, agricoles et urbaines entraîne le rejet de grandes quantités de polluants dans les milieux aquatiques, affectant ainsi la qualité des eaux de surface et souterraines. Parmi ces contaminants, les colorants synthétiques occupent une place importante en raison de leur utilisation intensive dans les industries textiles, papetières, cosmétiques et pharmaceutiques. Leur forte stabilité chimique et leur résistance à la biodégradation favorisent leur persistance dans l'environnement et représentent un risque pour les écosystèmes aquatiques ainsi que pour la santé humaine [1,2].

De nombreuses techniques de traitement des eaux usées ont été développées, telles que la coagulation-floculation, l'oxydation avancée, les procédés membranaires et l'adsorption. Parmi ces méthodes, l'adsorption est reconnue comme l'une des plus efficaces grâce à sa simplicité de mise en œuvre, son faible coût d'exploitation et son rendement élevé dans l'élimination des polluants organiques dissous [3,4].

La valorisation des sous-produits (déchets agricoles) s'inscrit dans une démarche de développement durable et d'économie circulaire visant à réduire les impacts environnementaux tout en créant de nouvelles ressources à valeur ajoutée.

Dans notre région saharienne Algériennes, le palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) génère chaque année d'importantes quantités de résidus lignocellulosiques, notamment les palmes et les rachis des régimes, qui sont souvent abandonnés ou éliminés par brûlage. Ces pratiques peuvent entraîner des nuisances environnementales alors que ces matériaux présentent un potentiel considérable de valorisation [7,8].

Grâce à leur richesse en cellulose, hémicellulose et lignine, les déchets du palmier dattier possèdent de nombreux groupements fonctionnels susceptibles d'interagir avec les molécules polluantes présentes dans les eaux usées. Ces caractéristiques en font des biosorbants naturels prometteurs pour le traitement des eaux contaminées [4,5]. L'utilisation de matériaux biosorbants à l'état brut présente également l'avantage de réduire les coûts liés aux traitements de préparation et d'activation, tout en favorisant une gestion durable des résidus agricoles [1].

3. Le palmier dattier en Algérie :

Le palmier dattier est une plante d'intérêt écologique, économique et social majeur pour de nombreux pays des zones arides qui comptent parmi les plus pauvres du globe. En effet, en créant au milieu du désert un microclimat favorable au développement de cultures sous-jacentes, le palmier dattier constitue l'axe principal de l'agriculture dans les régions désertiques et représente la principale ressource vivrière et financière des populations oasiennes.

Dans le Sahara algérien, le palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) est le pilier des écosystèmes oasiens où il permet de limiter les dégâts d'ensablement, joue un rôle protecteur contre le rayonnement solaire intense pour les cultures sous-jacentes (arbres fruitiers, cultures maraîchères et céréales). Par sa présence dans ces zones désertiques, les diverses formes de vies animales et végétales, indispensables pour le maintien et la survie des populations, sont possibles.

Il a de plus un rôle socioéconomique majeur pour les populations de ces régions pour lesquelles il fournit d'une part un fruit, la datté dont les qualités alimentaires sont indéniables et qui constitue une source de revenus très appréciables pour plus de 100 000 familles du Sud Algérien avec 9 % des exportations agricoles, d'autre part une multitude de sous-produits (culinaire, artisanal et menuiserie...) [9].

L'Algérie est un pays phoenicicole classé au sixième rang mondial et au premier rang dans le Maghreb pour ses grandes étendues de culture avec 160 000 ha et plus de 2 millions de jardins et sa production annuelle moyenne de dattes de 500 000 tonnes [9].

4. Principaux sous-produits des palmiers dattiers :

Le palmier dattier produit d'importantes quantités de biomasse en plus des dattes. Ses principaux sous-produits sont valorisés dans l'artisanat, l'agriculture et l'industrie [10,11] :

4.1 Palmes et feuilles (Jrid) : Utilisées pour la couverture des habitations traditionnelles (toits), la confection de clôtures, de paniers et de nattes. Les folioles (les petites feuilles) servent à fabriquer de la sparterie.

4.2 Noyaux de dattes : Riches en fibres et en antioxydants. Après broyage et torréfaction, ils sont utilisés comme substitut de café, intégrés dans l'alimentation animale, ou transformés en charbon actif et cosmétiques.

4.3 Rebuts de dattes : Les dattes invendables ou abîmées constituent un aliment énergétique de choix pour le bétail (ovins, caprins, dromadaires).

4.4 Pédicelles et régimes : Tiges et pédoncules floraux servent de combustibles ou sont broyés pour l'alimentation animale (fourrage grossier).

4.5 Stipe (Tronc) : Le bois du palmier est utilisé dans la construction rurale (poutres, piliers) et comme matériau isolant.

4.6 Fibres (Lif) : Les fibres entourant la base des palmes sont transformées en cordes, brosses, balais et sacs.

Ces résidus sont au cœur de l'économie circulaire des oasis et font l'objet de nombreuses recherches pour des applications modernes (production de nanocristaux de cellulose). [1]

Cette étude porte sur deux sous-produits du palmier dattier : les feuilles (Jrid) et les régimes (Arjoun).

5.Quantification des déchets du palmier dattier et évaluation de leurs impacts environnementaux :

L'accumulation des déchets issus du palmier dattier constitue aujourd'hui un problème environnemental majeur dans les régions oasiennes. Chaque année, les opérations d'égagage, de taille et de récolte génèrent d'importantes quantités de résidus lignocellulosiques, principalement composés de palmes, de rachis, de spathes et de fibres. En l'absence d'une gestion appropriée, ces déchets sont souvent abandonnés dans les parcelles agricoles ou à proximité des oasis [12]

Dans de nombreuses exploitations, les résidus végétaux sont laissés sur place pendant de longues périodes, ce qui favorise leur accumulation et leur dégradation lente sous l'effet des conditions climatiques. Cette situation peut entraîner la prolifération d'insectes nuisibles, de rongeurs et de microorganismes pathogènes susceptibles d'affecter la santé des palmiers et la qualité des productions agricoles [12,13]

Par ailleurs, la pratique courante du brûlage à ciel ouvert des déchets de palmier dattier représente une source importante de pollution atmosphérique. Cette combustion libère du dioxyde de carbone (CO₂), du monoxyde de carbone (CO), des particules fines ainsi que d'autres composés polluants qui contribuent à la dégradation de la qualité de l'air et à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre [14,15]

L'accumulation et le brûlage incontrôlé de ces résidus peuvent également affecter les propriétés physicochimiques des sols, réduire leur fertilité et accroître les risques d'incendies, particulièrement durant les périodes de fortes chaleurs caractéristiques des zones arides et semi-arides [16].

Face à ces enjeux environnementaux et économiques, la valorisation des déchets du palmier dattier apparaît comme une solution durable permettant de réduire les impacts négatifs sur l'environnement tout en créant de nouvelles opportunités de développement local. Ces résidus peuvent être transformés en compost, biochar, matériaux composites, biosorbants ou encore en source d'énergie renouvelable, s'inscrivant ainsi dans les principes de l'économie circulaire et du développement durable [12,17].

Le potentiel de déchets de palmier dattier en Algérie est estimé à environ 125 000 tonnes par an. Un seul palmier produit annuellement près de 40 kg de sous-produits. Malheureusement, plus de 60 % de ces résidus sont brûlés ou abandonnés, représentant une importante biomasse sèche

La figure 1 représente quelques aspects de gestion des résidus de palmier dattier et leurs effets.

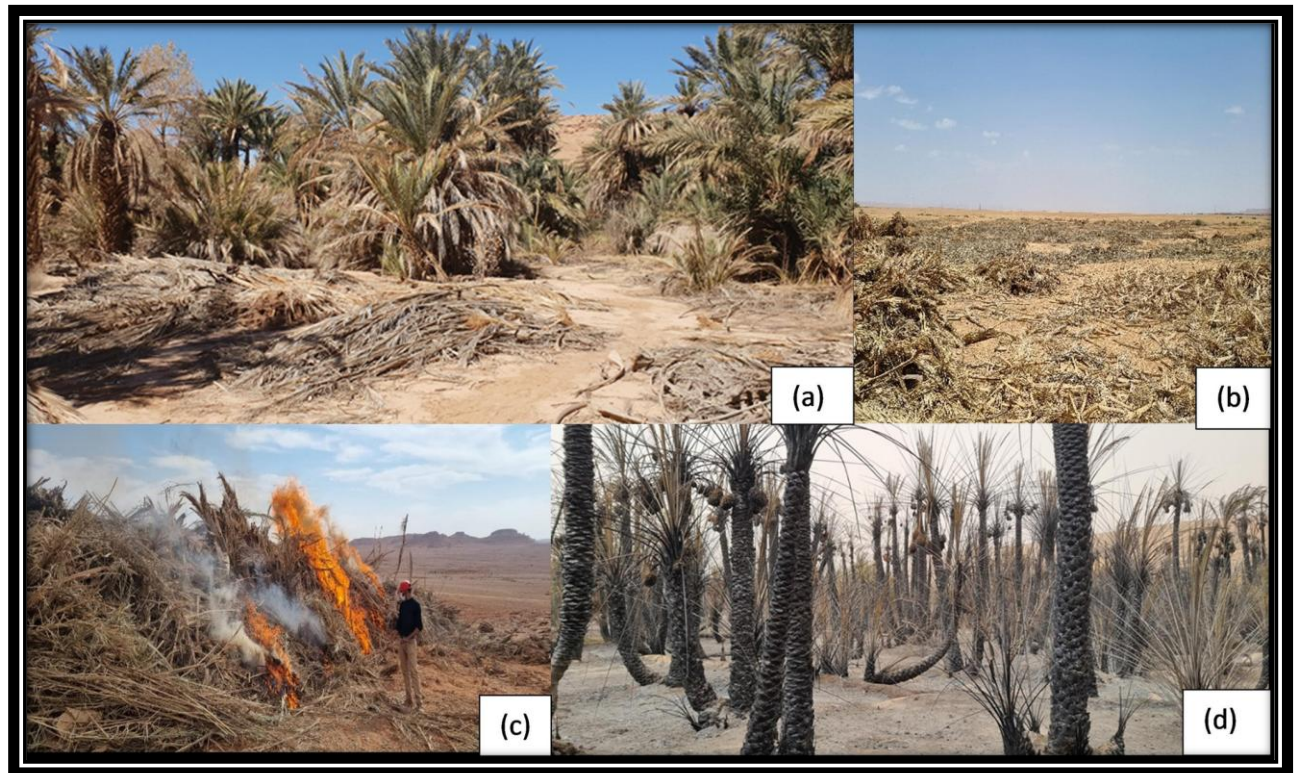


Figure 1. Quelques aspects de gestion des résidus de palmier dattier et leurs effets :

- (a) résidus de palmier abandonnés sur pied et au sol ;
- (b) résidus déposés aux abords d'une ferme ;
- (c) incinération des résidus ;
- (d) dégâts sur palmiers dattiers après un incendie de palmeraie.

II. Généralisés sur les phénomènes d'adsorption :

1. Introduction :

Ce chapitre présente les bases théoriques de l'adsorption, en abordant sa définition, ses différents types, ainsi que les mécanismes impliqués. Il met également en évidence les principaux facteurs influençant ce phénomène et les modes d'application en systèmes statique et continu, afin de mieux comprendre son utilisation dans le traitement des effluents.

2. Définition de l'adsorption :

L'adsorption phénomène physique de séparation [18], est un processus au cours duquel des molécules d'un fluide gaz ou liquide (adsorbat) viennent se fixer sur la surface d'un solide (adsorbant) [19]. Par la surface du solide, on sous-entend les surfaces externes et internes engendrées par le réseau de pores et cavités à l'intérieur de l'adsorbant. Le mot adsorption indique qu'il s'agit d'un phénomène de

surface et ne doit pas être confondu avec le mot absorption où le fluide pénètre dans la masse du solide [20].

Les interactions adsorbant-adsorbat peuvent être de nature électrostatique, et donc les interactions sont faibles et réversibles : on parle alors de physisorption par opposition à la chimisorption, phénomène généralement irréversible où des liaisons covalentes entre adsorbat et adsorbant entre en jeu [21].

3.Type d'adsorption :

Selon les forces qui régissent les interactions adsorbant-adsorbat, deux types d'adsorption différents sont admis : adsorption physique (physisorption) et adsorption chimique (chimisorption) [22].

3.1.Adsorption physique : La physisorption résulte de l'attraction adsorbant-adsorbat, assurées par des forces électrostatiques type dipôles, liaison hydrogène ou Van der Waals [23] afin de maintenir l'électro neutralité. Les énergies de liaisons mises en jeu sont relativement faibles [24]. Les espèces ainsi adsorbées gardent les molécules d'eau qui leur sont associées. Plusieurs couches d'atomes ou de molécules peuvent se déposer de cette manière (adsorption en multicouches) [22,25]. L'adsorption physique est un phénomène réversible favorisé par un abaissement de température [26].

3.2.Adsorption chimique : La chimisorption résulte de l'attraction adsorbant-adsorbat, assurées par des liaisons ioniques ou covalentes. Ces forces attractives provoquent un transfert ou une mise en commun d'électrons et en conséquence, la destruction de l'individualité des molécules et la formation d'un composé chimique à la surface de l'adsorbant. On parle de complexation de surface lorsqu'un ion métallique réagit avec un groupement anionique qui fonctionne comme un ligand inorganique tels que OH^- , Cl^- , SO_4^- , CO_3^{2-} ; ainsi ces sites de surface forment des liaisons chimiques avec les ions en solution [25]. L'adsorption chimique est un phénomène irréversible favorisé par une augmentation de température et engendre une couche monomoléculaire (Seule la première couche est liée chimiquement à la surface adsorbante, les autres couches sont retenues par adsorption physique) [27]. La chimisorption est ainsi caractérisée par des énergies d'interactions élevées [22].

4.Mécanisme d'adsorption :

La fixation d'un polluant sur un adsorbant comprend une étape d'adsorption et trois étapes de transfert de matières (diffusion).

- ❖ Diffusion de l'adsorbât, de la phase liquide externe, vers la phase située au voisinage de la surface de l'adsorbant.
- ❖ Diffusion extra-granulaire de la matière : transfert du soluté à travers le film liquide vers la surface des grains.
- ❖ Transfert intra-granulaire de la matière : transfert de la matière dans la structure poreuse de la surface extérieure des graines vers les sites actifs.

- ❖ Réaction d'adsorption au contact des sites actifs. Une fois adsorbée, la molécule est considérée comme immobile [28].

5.Principaux facteurs influençant sur l'adsorption :

L'équilibre d'adsorption entre un adsorbant et un adsorbat, dépend de nombreux facteurs dont les principaux sont décrits ci-dessous :

- ❖ Surface spécifique : la surface spécifique est proportionnelle avec l'adsorption [29].
- ❖ Nature de l'adsorbat : Moins une substance est soluble dans le solvant, mieux elle est adsorbée d'après la règle de LUNEDLIUS [30].
- ❖ Nature de l'adsorbant : Tout solide est supposé comme adsorbant potentiel [30].
- ❖ Potentiel d'hydrogène (pH) : La variation de pH influence la charge de la surface de l'adsorbant, le degré d'ionisation et la spéciation de l'adsorbat [31].
- ❖ Polarité : Un soluté polaire aura plus d'affinité pour l'adsorbant [32,33].
- ❖ Température : La température a une influence sur la cinétique d'adsorption [34].

6.Modes d'adsorption

6.1.Adsorption en mode statique (batch) : La méthode statique consiste à mettre en contact un volume fixe de solution à épurer avec une masse d'adsorbant donnée, dans des conditions préalablement établies (concentration, temps d'agitation, pH, température, etc.).

L'ensemble solution-adsorbant est alors agité pendant un certain temps, puis séparé par centrifugation, sédimentation ou simple filtration. La comparaison du surnageant et de la solution initiale par dosage analytique permet de déterminer l'efficacité de l'adsorbant utilisé. Les conditions d'essai doivent être maintenues constantes.

6.2.Adsorption en mode continu (dynamique) : L'adsorption dynamique en colonne (à lit fixe) est une méthode largement utilisée en milieu industriel du fait des volumes d'eau à traiter. La solution à traiter traverse le matériau adsorbant placé à l'intérieur d'un réacteur (lit filtrant) [35]. Une bonne compréhension des comportements dynamiques des adsorbants est capitale pour la conception et l'optimisation des procédés d'adsorption. Ces comportements dépendent de manière très complexe des interactions entre le fluide et les adsorbants. Par conséquent, il est très difficile de prévoir les comportements de l'adsorbant sans un minimum d'expériences à petite échelle et dans les mêmes conditions opératoires (température, composition du mélange, granulométrie, débit, etc.). L'établissement de la courbe de percée fournit alors des informations nécessaires à l'extrapolation au stade industriel [36].

Cette technique consiste à faire circuler une solution de concentration connue à travers un réacteur et de suivre cette concentration en sortie de ce dernier. L'équilibre est atteint lorsque la concentration en sortie est proche ou égale à la concentration en entrée.

La méthode est très simple, efficace et fiable pour la pratique et permet d'établir des corrélations pour les systèmes d'adsorption [37].

I. Partie bibliographique

Durant le processus d'adsorption ce n'est qu'une portion du lit dont la profondeur est variable qui participe au phénomène de transfert, là où pratiquement se déroule 98% de l'échange du soluté entre les deux phases mobile et fixe. Cette portion du lit nommée Zone de Transfert de Masse (ZTM) se déplace à travers le lit à une vitesse constante jusqu'à sa saturation [38].

En traçant $C_t/C_0 = f(t)$, on obtient une courbe de sites actifs de la colonne entre (t_b et t_e), cette courbe est appelée courbe d'épuisement ou de saturation son descriptif est illustré dans la figure 2 [39].

Lorsque la concentration C_t s'approche de 90% de C_0 l'adsorbant est considéré comme étant essentiellement épuisé [40,41].

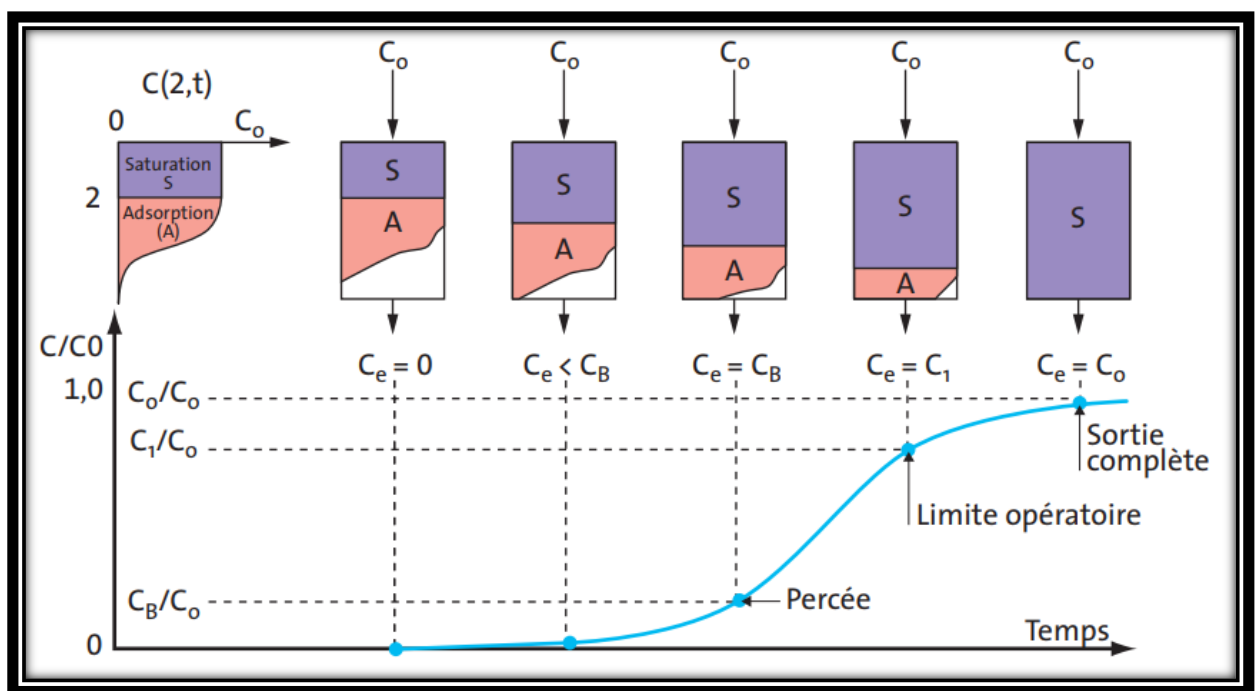


Figure 2 : Description de courbe de percée pour un lit fixe.

7. Modélisation de l'adsorption en système continu :

Il existe plusieurs modèles mathématiques pour la prédiction et la validation des données expérimentales, Cinque modèles les plus cités et plus appliqués, tels que le modèle de Thomas, Yoon-Nelson, Bohart-Adams, Wolborska et BDST sont alors développés dans ce qui suit.

7.1. Modèle de Bohart-Adams (Bohart et Adams., 1920) : L'étude de l'adsorption a débuté historiquement par celle des gaz sur des solides que ce soit par BOHART et ADAMS (1920), LANGMUIR (1915), ou FREUNDLICH (1906). Le modèle de Bohart-Adams est basé sur la théorie de la réaction de surface, il suppose que l'équilibre n'est pas instantané.

I. Partie bibliographique

Ils ont établi l'équation fondamentale, qui décrit le rapport C_t/C_0 en fonction de temps dans un système continu. Ils ont développé un modèle d'adsorption et aussi établi des équations en supposant que l'on a une courbe de fuite d'adsorption symétrique, c'est à dire que l'équilibre est réalisé sur chaque grain ou tranche dz d'adsorbant (Bohart et Adams., 1920). Ce modèle est employé pour la description de la partie initiale de la courbe de percée.

Son équation peut être décrite comme suit :

$$\frac{C_t}{C_0} = \exp(K_{BA}C_0t - K_{BA}N_0\frac{Z}{F}) \quad (1)$$

Avec :

K_{BA} est la constante cinétique du modèle en (L.mg⁻¹.min⁻¹) ;

N_0 est la concentration de saturation du modèle en (mg. L⁻¹) ;

C_t est la concentration de sortie du soluté en (mg. L⁻¹) ;

C_0 est la concentration initiale du soluté en solution en (mg. L⁻¹) ;

F est la vitesse linéaire en (cm.min⁻¹) ;

Z est la hauteur du lit adsorbant en (cm).

t est le temps d'écoulement (min).

7.2.Modèle de Bed Depth Service Time (BDST) (Hutchins., 1973) : Initialement développé par Bohart–Adams. Il a été utilisé pour prédire la capacité de lit en termes des concentrations opératoires. Hutchins, (1973) établit une équation basée sur la relation linéaire entre la hauteur de lit (Z) et le temps de service (t). L'équation est donnée par :

$$t_b = \frac{N'_0}{C_0F}Z - \left(\frac{1}{K_aC_0}\right)\ln\left(\frac{C_0}{C_b} - 1\right) \quad (2)$$

Où :

t_b : Le temps de percé (min),

N'_0 : La capacité d'adsorption de ce modèle (mg. L⁻¹),

Z : La hauteur du lit adsorbant en (cm).

C_0 : La concentration initiale du soluté en solution en (mg. L⁻¹),

I. Partie bibliographique

F : La vitesse linéaire en (cm.min⁻¹),

K_a et C_b sont la constante cinétique (L.mg⁻¹.min⁻¹) et la concentration de percée (mg. L⁻¹).

Ce modèle simplifié ne tient pas compte de la résistance de transfert de masse intra-articulaire et de film externe et considère que l'adsorbat est adsorbé sur la surface d'adsorbant directement.

7.3.Modèle de Thomas (Thomas. H. C., 1944) : Appliqué au progrès de la biosorption là où les limitations de diffusion externe et interne sont absentes [42]. L'hypothèse de base de ce modèle est l'existence d'un état d'équilibre adsorption/désorption entre l'adsorbat liquide et l'adsorbant [43]. Il est utilisé pour calculer la constante de vitesse d'adsorption à partir des études en mode continu. Le modèle a la forme suivante :

$$\frac{C_t}{C_0} = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{K_{th}mq_{th}}{U} - C_0K_{th}t\right)} \quad (3)$$

Le coefficient cinétique K_{th} et la capacité d'absorption q_{th} peuvent être déterminés à partir d'un graphique de C_t/C₀=f(t) pour un débit donné en utilisant une analyse de régression non linéaire.

Avec ;

k_{th} : Constante cinétique de Thomas (ml mg⁻¹ min⁻¹).

q_{th} : Capacité théorique maximale du soluté adsorbé (mg g⁻¹).

m : Quantité de l'adsorbant dans la colonne (g).

U : Débit de filtration en (mL min⁻¹).

C₀ : Concentration initiale d'adsorbat (mg L⁻¹).

C_t : Concentration d'adsorbant à l'instant t (mg L⁻¹).

t : Temps (min).

7.4.Modèle de Yoon-Nelson (Yoon et Nelson., 1984) : Ce modèle est mathématiquement équivalent au modèle de Thomas. Yoon et Nelson ont développé un modèle relativement simple pour décrire le perçage d'un composé gazeux sur un adsorbant. Le modèle est basé sur l'hypothèse que la variation de la probabilité d'adsorption de l'adsorbat est proportionnelle à la probabilité de l'adsorption de l'adsorbat sur l'adsorbant et à la probabilité du perçage de l'adsorbat [44].

L'équation de ce modèle est exprimée par :

$$\frac{C_t}{C_0 - C_t} = \exp(K_{YN}t - \tau K_{YN}) \quad (4)$$

Avec :

C_t est la concentration de sortie du soluté en (mg. L⁻¹) ;

C_0 est la concentration initiale du soluté en solution en (mg. L⁻¹) ;

τ : Temps requis pour maintenir 50% de la percée, calculé à partir du modèle de Yoon-Nelson (min).

t est le temps d'écoulement (min).

K_{YN} est la constante de vitesse du modèle (min⁻¹)

7.5.Modèle de Wolborska : Wolborska a proposé un modèle basé sur les équations générales du transfert de masse pour le mécanisme de diffusion dans la plage de la courbe de percée à faible concentration [45]. Il a été appliqué à des données expérimentales pour la description de la partie initiale de la courbe de percée qui peut être définie comme suit [45] :

$$\frac{C_t}{C_0} = \exp\left(\frac{\beta_a C_0}{N_0} t - \frac{\beta_a Z}{U}\right) \quad (5)$$

Avec ;

β_a : Le coefficient cinétique de transfert de masse externe (min⁻¹).

N_0 : La concentration de saturation du réacteur à lit fixe (mg L⁻¹).

U : La vitesse superficielle du fluide (mm min⁻¹).

Z : La hauteur du lit fixe (mm).

8.Conclusion :

Cette revue bibliographique montre que le procédé l'adsorption est une technique de traitement des effluents en raison du coût, de la simplicité de conception et de la facilité d'emploi. Le charbon actif est l'adsorbant le plus largement employé mais son utilisation est limitée en raison de son coût élevé. De ce fait, les recherches sont orientées vers l'utilisation d'adsorbants peu coûteux (comme les sous-produits des palmiers dattiers) pour éliminer les colorants présents dans les eaux.

II. Partie expérimentale

1.Introduction :

Le bleu de méthylène est le colorant le plus couramment utilisé dans la teinture du coton, du bois et de la soie. Il peut provoquer des brûlures oculaires responsables de blessures permanentes aux yeux de l'homme et des animaux. Son inhalation peut donner lieu à des difficultés respiratoires et son ingestion par la bouche produit une sensation de brûlure, provoque des nausées, des vomissements, transpiration et sueurs froides abondantes. Comme tous les polluants nocifs, les effluents colorés nécessitent un traitement approprié avant de les déverser dans la nature si l'on veut minimiser les risques de nuisances sur la santé humaine, la faune et la flore.

Les recherches sont alors orientées vers l'exploitation de matériaux naturels, de sous-produits et de déchets agricoles et certains déchets industriels en raison de leur abondance et de leurs faibles coûts. Afin de tester le rôle de dépollution des sous-produits des palmiers dattiers, nous avons testé un colorant cationique modèle ; le bleu de méthylène (BM).

Cette étude expérimentale concerne l'influence du temps sur la capacité d'adsorption dans un lit fixe, la concentration initiale de la solution BM est supposée invariable. Les résultats de ces essais ont été exploités dans la représentation des courbes de percées. L'adsorbat (BM) a été testé par la moyenne des UV-visible.

2.Toxicité des colorants des rejets industriels :

Les rejets d'effluents chargés en colorants des industries textiles, dans les rivières, peuvent nuire grandement aux espèces animales, végétales ainsi qu'aux divers microorganismes vivant dans ces eaux. Cette toxicité, est liée à la diminution de l'oxygène dissout dans ces milieux. Par ailleurs, leur très faible biodégradabilité, due à leur poids moléculaire élevé et à leurs structures complexes, confère à ces composés un caractère toxique pouvant être élevé ou faible (toxicité aiguë et toxicité chronique). De ce fait, ils peuvent persister longtemps dans ce milieu, engendrant ainsi des perturbations importantes dans les différents mécanismes naturels existant dans la flore (pouvoir d'autoépuration des cours d'eau, inhibition de la croissance des végétaux aquatique, etc.....) ainsi dans la faune (destruction d'une catégorie de poissons, de microorganisme, etc....) [46].

3.Matériels et appareillage :

3.1.Matériels utilisés : Les dispositifs expérimentaux sont constitués de :

Bécher ; Eprouvette graduée ; Fiole jaugée ; Pipette graduée ; Verre de montre ; Entonnoir ; Spatule ; colonne en verre.

3.2.Appareillage : Nous utilisons un spectrophotomètre UV visible pour l'analyse de la concentration à la sortie des colonnes. La solution colorée traversée par un faisceau de lumière laisse passer une fraction de lumière incidente, la quantité de lumière absorbée est proportionnelle à la concentration du composé coloré recherché comme le montre la loi de Beer-Lambert :

$$D_0 = \log \frac{I}{I_0} = \varepsilon \cdot l \cdot C \quad (6)$$

D_0 : Densité optique.

I et I_0 : Intensité du faisceau de lumière monochromatique de longueur d'onde λ à l'entrée et à la sortie de la cellule de référence.

l : épaisseur de la cellule de référence (cm).

C : concentration de l'élément recherché (mg/l ou mol/l).

ε : coefficient d'extinction molaire (l/mg cm ou l/mole cm).



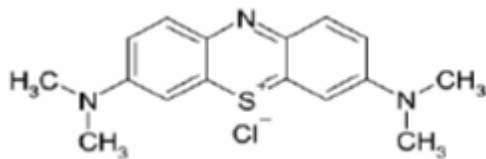
Figure 03 : Spectrophotomètre UV-Visible

3.3.Les produits utilisés :

- Les sous-produits de palmiers dattiers brute : Palmes et rachis des régimes ;
- Le bleu de méthylène (BM, colorant cationique), pris comme polluant modèle est utilisé sans aucune purification préalable. Les solutions sont préparées en dissolvant les quantités du colorant dans de l'eau distillée. Les caractéristiques principales du bleu de méthylène sont représentées dans le tableau 1.

II. Partie expérimentale

Tableau 1 : Principales caractéristiques physico-chimiques du bleu de méthylène.

Formule brute	$C_{16}H_{18}ClN_3S$ 
Appellation chimique	Bis-(diméthylamino) - 3,7 phenazathionium chlorure
Masse molaire	319.86g/mol
Température de fusion	180°C
pH	5.9
pKa	3.8
Solubilité	50 g/L à l'eau à 20 °C 10 g/L à l'éthanol à 20 °C
λ_{Max} (nm)	664

3.4.Préparation Solution mère de BM : La solution mère du bleu de méthylène est préparée à raison de 0,1052 g dans un litre de l'eau distillée (pH=5,87 ; T=25°C). Une agitation continue a été réalisée jusqu'à dissolution complète, afin d'établir la courbe d'étalonnage (l'absorbance en fonction de la concentration en bleu de méthylène).

La concentration du bleu de méthylène à la sortie des colonnes est déterminée à partir de l'absorbance sur le spectrophotomètre UV Visible à $\lambda=664$ nm.

3.5.Préparation des biosorbants : Les échantillons de palmes (frondes) et les rachis de palmier dattier ont été lavée à l'eau distillée en éliminant la poussière et les particules fines. Puis Séchés à l'abri afin d'éliminer l'humidité et de permettre un séchage complet suivi par Broyage et Tamisage à fin d'obtenir une fraction supérieure à 2 mm.

70 grammes de « déchets de palmier broyés » adsorbants ont été placés dans chaque colonne. La première colonne contient des Feuilles de palmier dattier, la seconde contient rachis des régimes et la troisième colonne contient un mélange égal (massiques) des deux types.

Le diamètre intérieur de chaque colonne est de 30 mm, la hauteur est de 50 cm. Le volume total de biosorbant est 353,5 cm³. Le prélèvement des échantillons a été faites en fonction du temps.

4. Résultats et discussion :

- La courbe d'étalonnage (figure 3 ci-dessous) et permet de déterminer les concentrations des échantillons inconnus.

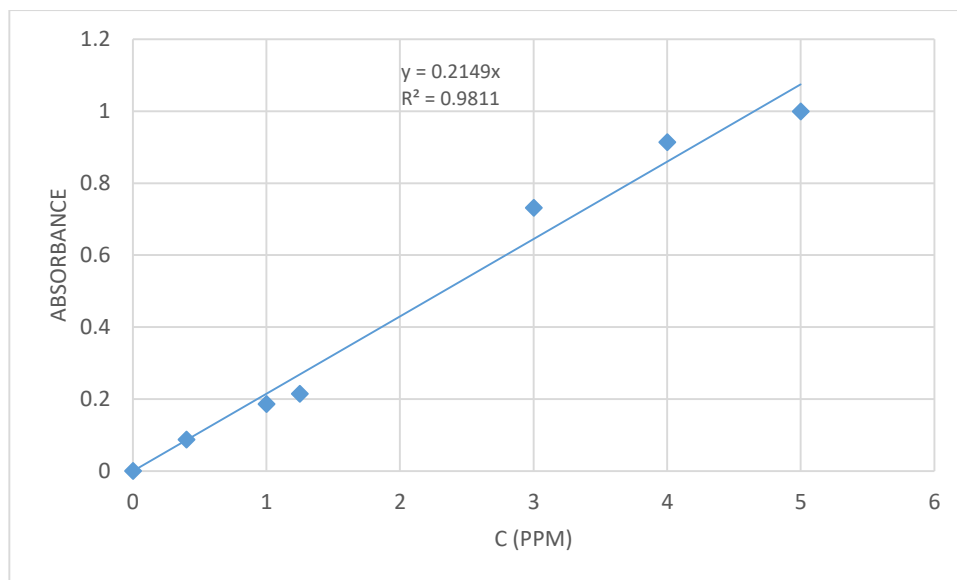
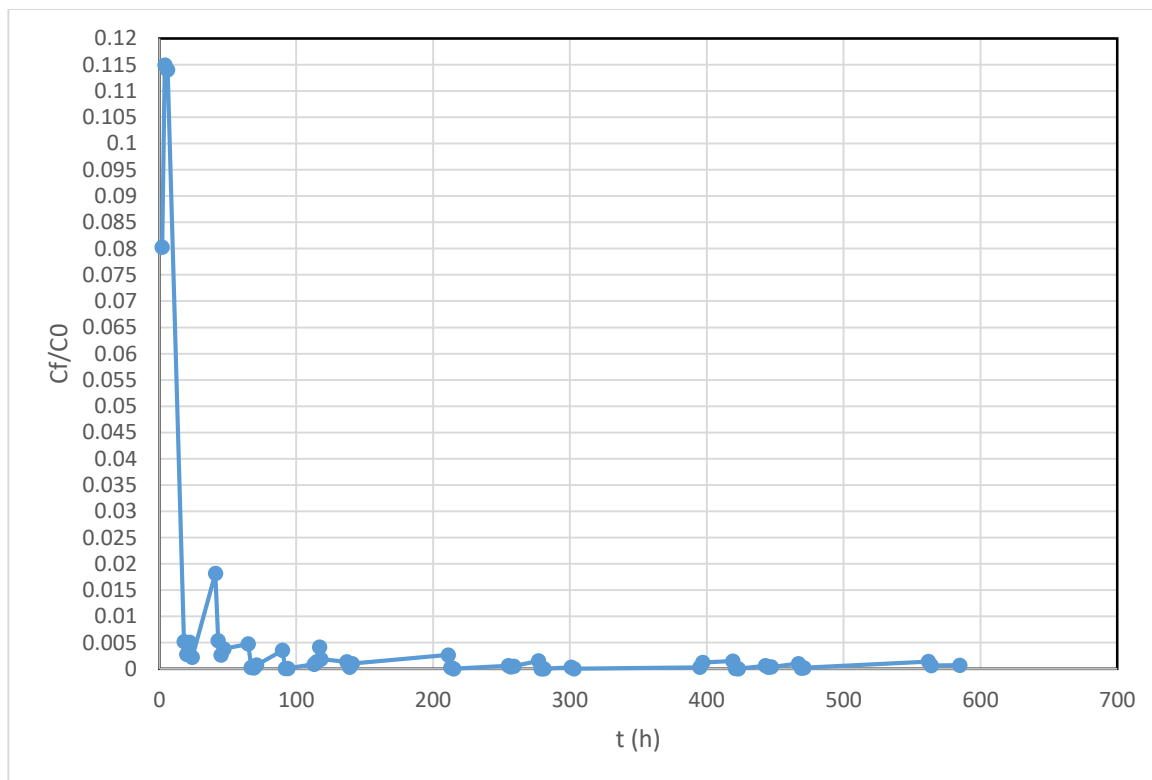


Figure 4 : Courbe l'étalonnage

- Le suivi des résultats d'analyse des concentrations à la sortie des colonnes en fonction du temps sont représentées sur les figures ci-dessous.



II. Partie expérimentale

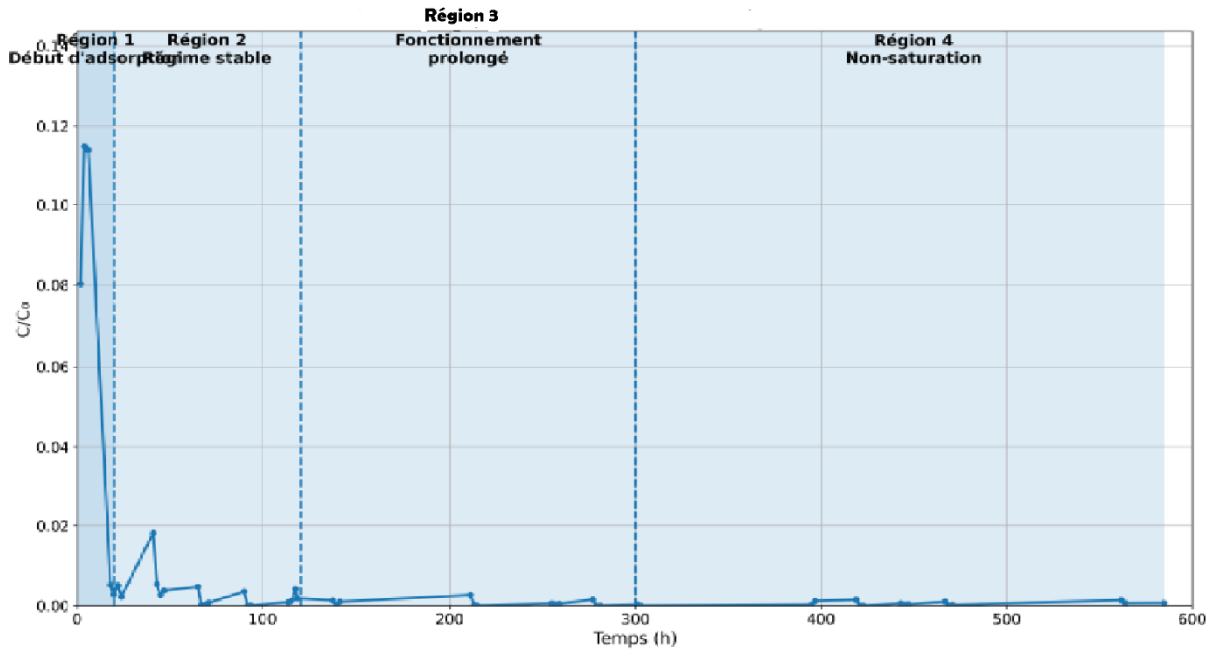
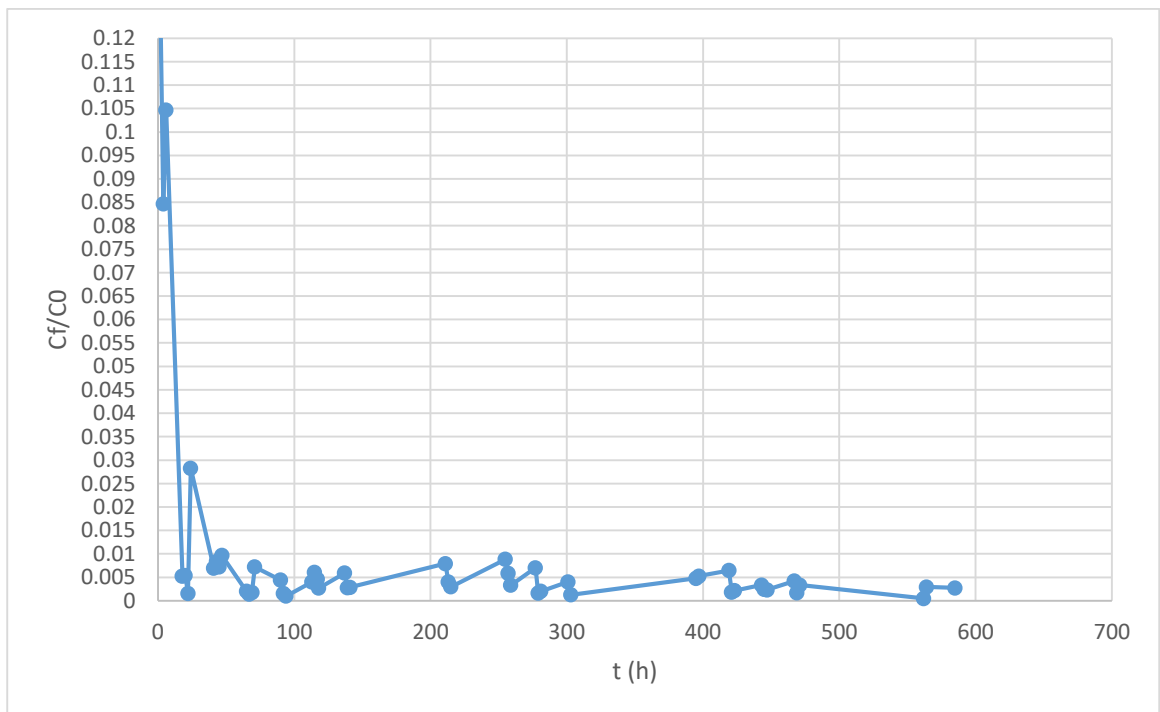


Figure 5 : Courbe de percée de l'adsorption du Blue de méthylène sur le biosorbant à base de palmes de palmier dattier ($C_0=100\text{ppm}$). **Colonne 1 :** Les feuilles (Jrid).

Pour la colonne 1 : Les données montrent une forte diminution de (C_t/C_0) après les premières heures, puis des valeurs extrêmement faibles pendant toute la durée de l'essai (jusqu'à 585 h), indiquant une excellente capacité d'adsorption.



II. Partie expérimentale

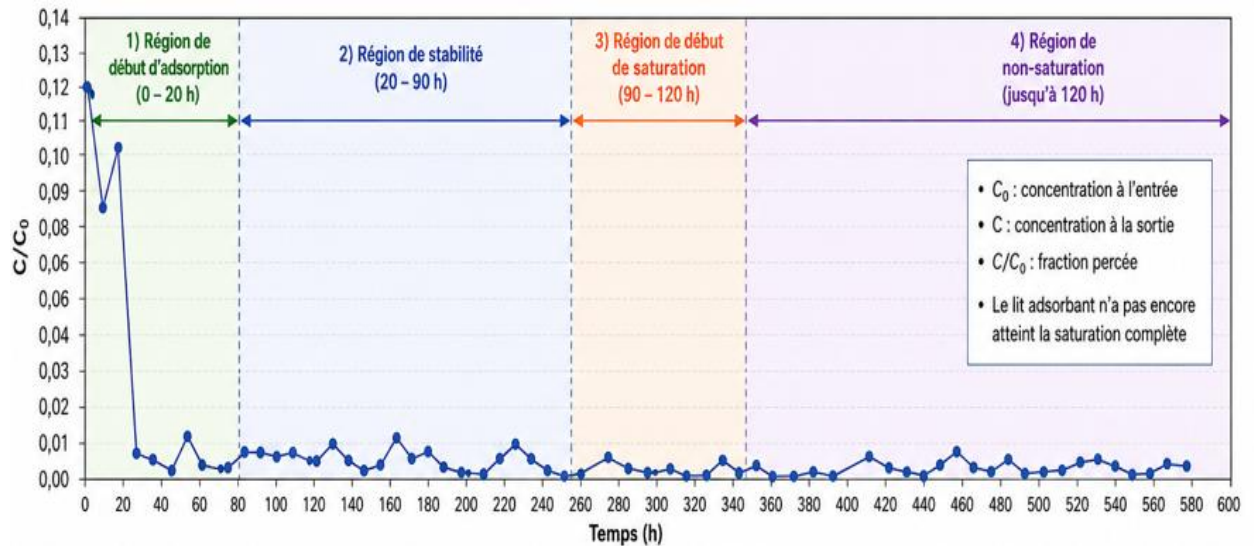
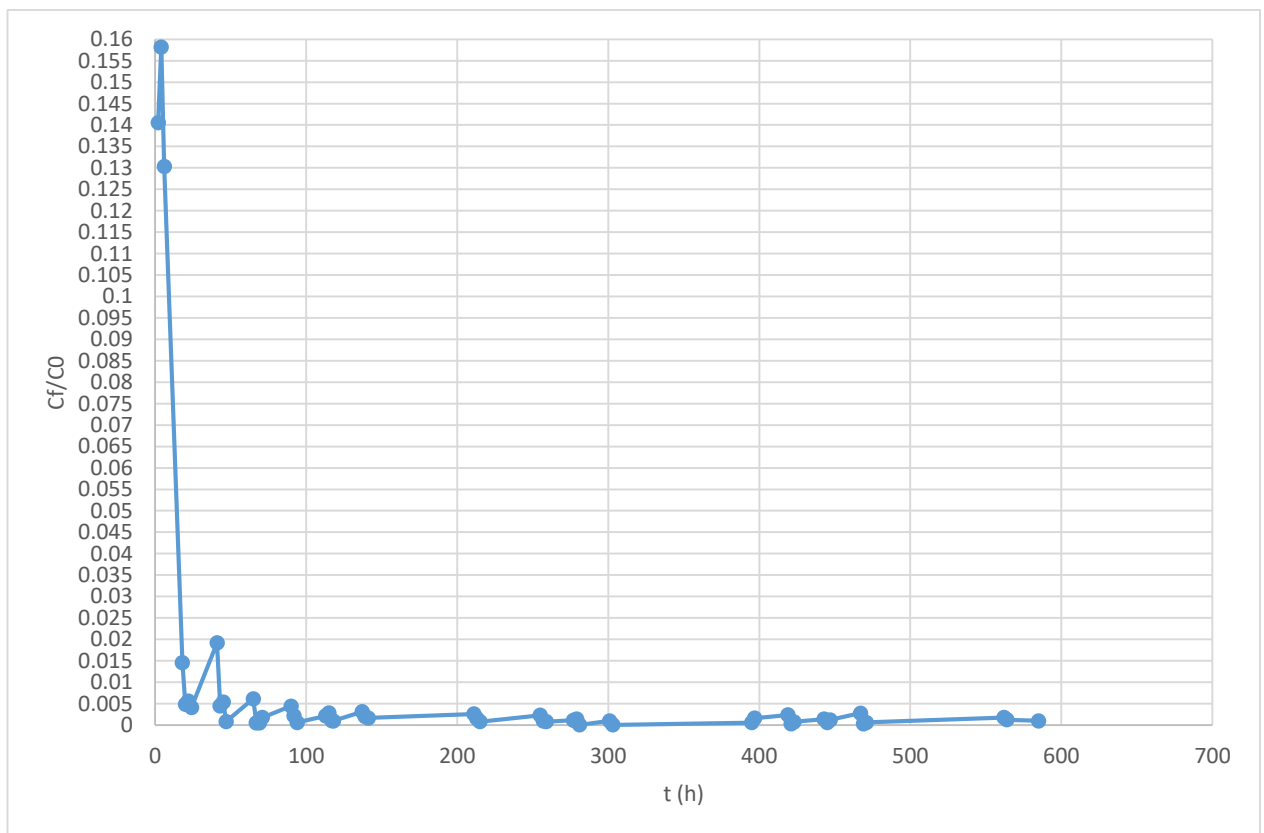


Figure 6 : Courbe de percée de l'adsorption du Blue de méthylène sur le biosorbant à base de régimes de palmier dattier ($C_0=100\text{ppm}$). Colonne 2 : Régimes (Arjoun)

Pour la colonne 2 : Les valeurs de C_f/C_0 restent très faibles ($<0,013$ dans la plupart du temps et $<0,03$) pendant toute la durée de l'expériences, indiquant une forte capacité d'adsorption du matériau. Aucune percée significative ni saturation de la colonne 2 observée jusqu'à 585 heure ; ce qui témoigne de la bonne performance du système d'adsorption.



II. Partie expérimentale

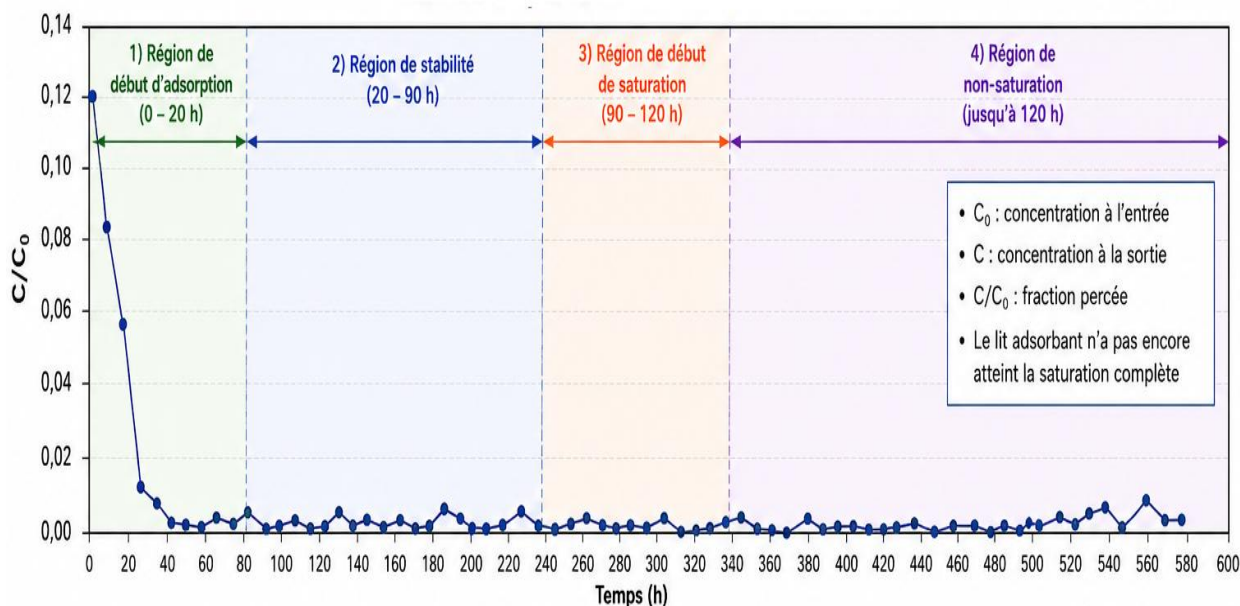


Figure 7 : Courbe de percée de l'adsorption du Blue de méthylène sur le biosorbant issu d'un mélange (palmes-régimes) ($C_0=100\text{ppm}$). Colonne 3 : Mélange (Régimes (Arjoun) et Les feuilles (Jrid)).

Pour la colonne 3 : Les données montrent un comportement très similaire aux colonnes 1 et 2, avec une efficacité d'adsorption encore plus marquée après la phase initiale.

La courbe de percée de la colonne 3 présente une diminution rapide du rapport (C_f/C_0) durant les premières heures de fonctionnement, suivie d'une phase stable où les concentrations résiduelles restent très faibles. Les valeurs de (C_f/C_0) restent inférieures au seuil de percée classique ($(C_f/C_0 = 0,05)$) pendant toute la durée de l'expérience. Aucun signe de saturation du lit adsorbant n'est observé jusqu'à 585 min, ce qui témoigne d'une excellente capacité de rétention du matériau adsorbant et d'une efficacité élevée du procédé en régime continu.

Conclusion comparative : Les trois colonnes présentent une excellente efficacité d'adsorption. Malgré une valeur initiale de (C_f/C_0) légèrement plus élevée pour la colonne 3, les trois systèmes atteignent rapidement un régime stable caractérisé par des concentrations résiduelles très faibles. Aucune percée significative ni saturation n'a été observée durant les 585 min d'expérimentation, ce qui indique que la capacité maximale des lits adsorbants n'a pas encore été atteinte dans les conditions opératoires étudiées.

Cela indique que :

1. L'adsorbant présente une très forte capacité de rétention du polluant.
2. Le front de transfert de matière n'a pas encore atteint la sortie de la colonne.
3. Le temps de percée n'a pas été atteint durant l'expérience.
4. Le lit adsorbant est encore loin de la saturation.

- Le taux d'élimination du colorant, noté R et exprimé en pourcentage (%), il est défini par :

$$R(\%) = \frac{c_0 - c_s}{c_0} \quad (7)$$

Où :

c_0 : Concentration initiale du colorant (mg/l).

c_s : Concentration du colorant à l'instant t à la sortie (mg/l).

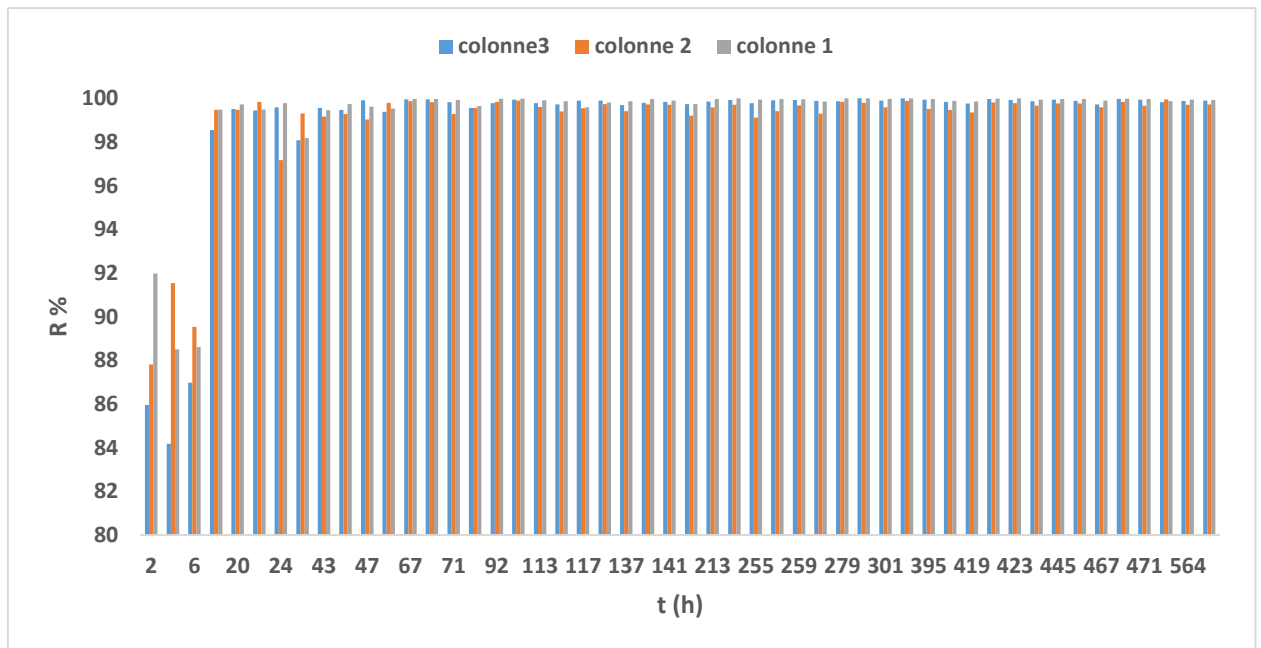


Figure 8 : Le rendement en fonction du temps pour les trois colonnes

D'après cette figure on remarque que :

Les trois colonnes adsorbantes présentent une très forte capacité d'élimination du bleu de méthylène. Après une courte phase de mise en régime (0–20 h), le rendement d'élimination dépasse 98 % et se maintient autour de 99–100 % pendant toute la durée de l'essai (585 h). L'absence de diminution notable du rendement confirme qu'aucune saturation du lit adsorbant ni percée

II. Partie expérimentale

significative n'a été atteinte dans les conditions opératoires étudiées. La colonne 1 présente les meilleures performances initiales, mais les différences entre les trois colonnes deviennent négligeables à long terme.

La stabilité remarquée indique que :

- Le front d'adsorption n'a pas atteint la sortie des colonnes ;
- Les adsorbants possèdent encore une capacité importante de rétention ;
- Aucune percée significative n'est observée durant toute l'expérience.
- Les faibles fluctuations observées sont probablement liées aux incertitudes analytiques ou aux variations expérimentales normales.

5. Conclusion :

D'après les résultats obtenus on remarque que :

- Les courbes de percée montrent que le rapport (C_t/C_0) diminue rapidement après les premières heures de fonctionnement puis reste très faible pendant toute la durée de l'expérience, ce qui traduit une adsorption efficace du bleu de méthylène par les trois matériaux étudiés.
- Aucune des colonnes n'a atteint le seuil classique de percée ($(C_t/C_0 = 0,05)$) ni présenté de signe de saturation jusqu'à 585 h, indiquant que la capacité maximale des lits adsorbants n'a pas été atteinte dans les conditions opératoires appliquées.
- L'étude du rendement d'élimination confirme ces observations. Après une courte phase de mise en régime, les rendements dépassent 98 % et se maintiennent généralement entre 99 et 100 % pour les trois colonnes durant toute l'expérience. La colonne contenant les feuilles de palmier dattier présente les meilleures performances initiales, tandis que les différences entre les trois systèmes deviennent très faibles à long terme.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail a porté sur la valorisation des résidus du palmier dattier comme biosorbants naturels pour l'élimination du bleu de méthylène en régime continu sur colonnes à lit fixe. Trois matériaux ont été étudiés : les feuilles de palmier dattier (Jrid), les rachis des régimes (Arjoun) et un mélange des deux biosorbants.

L'étude bibliographique a montré que les déchets lignocellulosiques du palmier dattier constituent une ressource abondante dans les régions sahariennes et présentent des propriétés physicochimiques favorables à l'adsorption des polluants organiques. Leur valorisation s'inscrit dans une démarche de développement durable et d'économie circulaire visant à réduire l'impact environnemental des déchets agricoles.

La partie expérimentale a permis de mettre en évidence l'efficacité des trois biosorbants pour l'élimination du bleu de méthylène à partir de solutions aqueuses.

Les courbes de percée obtenues montrent que :

- Le rapport C_t/C_0 reste très faible durant toute la durée de fonctionnement des colonnes, sans atteindre le seuil classique de percée ($C_t/C_0 = 0,05$) ni la saturation du lit adsorbant.
- Les rendements d'élimination ont dépassé 98 % après la phase initiale de mise en régime et se sont maintenus entre 99 et 100 % jusqu'à 585 h de fonctionnement. Ces résultats témoignent d'une forte capacité de rétention du colorant et d'une excellente stabilité des biosorbants étudiés.
- La comparaison des trois colonnes a révélé que les feuilles de palmier dattier présentent les meilleures performances initiales. Toutefois, les différences observées entre les trois matériaux deviennent négligeables à long terme, les trois systèmes assurant une élimination quasi totale du bleu de méthylène.

En conclusion, les résidus du palmier dattier constituent des biosorbants efficaces, économiques, renouvelables et respectueux de l'environnement pour le traitement des eaux contaminées par les colorants. Cette étude confirme leur potentiel d'application dans les procédés de dépollution des effluents industriels et ouvre des perspectives intéressantes pour la valorisation des déchets agricoles dans le domaine du traitement des eaux.

En Perspectives : Afin d'approfondir les résultats obtenus, plusieurs perspectives de recherche peuvent être envisagées :

- Étudier l'influence des paramètres opératoires tels que le débit, la hauteur du lit adsorbant, la granulométrie du biosorbant et la concentration initiale du colorant ;
- Déterminer les paramètres cinétiques et modéliser les courbes de percée à l'aide des modèles de Thomas, Yoon-Nelson et Bohart-Adams ;
- Réaliser une caractérisation physicochimique approfondie des biosorbants (FTIR, MEB, BET, DRX) afin d'identifier les mécanismes d'adsorption impliqués ;
- Étudier la régénération et la réutilisation des biosorbants afin d'évaluer leur durabilité et leur viabilité économique ;
- Tester l'efficacité des matériaux sur d'autres polluants tels que les métaux lourds, les pesticides et les colorants industriels réels ;

Conclusion générale

- Appliquer les biosorbants à des effluents industriels réels afin de valider leurs performances dans des conditions d'exploitation plus complexes ;
- Développer des biosorbants modifiés ou activés afin d'améliorer davantage leur capacité d'adsorption et leur sélectivité.

Ces perspectives permettront d'optimiser l'utilisation des résidus du palmier dattier et de renforcer leur potentiel comme matériaux biosorbants dans les technologies de traitement des eaux usées.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

1. Crini, G. (2006). Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: A review. *Bioresource Technology*, 97, 1061–1085.
2. Foo, K.Y., & Hameed, B.H. (2010). *Insights into the modeling of adsorption isotherm systems*. *Chemical Engineering Journal*, 156, 2–10.
3. Ho, Y.S., & McKay, G. (1999). *Pseudo-second order model for sorption processes*. *Process Biochemistry*, 34, 451–465.
4. Demirbas, A. (2008). *Heavy metal adsorption onto agro-based waste materials: A review*. *Journal of Hazardous Materials*, 157, 220–229.
5. Belala, Z., Jeguirim, M., Belhachemi, M., Addoun, F., & Trouvé, G. (2011). *Biosorption of basic dye from aqueous solutions by date pits*. *Desalination*, 271, 80–87.
6. Han, R., Ding, D., Xu, Y., Zou, W., Wang, Y., Li, Y., & Zou, L. (2009). *Use of rice husk for the adsorption of Congo red from aqueous solution in column mode*. *Bioresource Technology*, 99, 2938–2946.
7. Tirichine A. . Belguedj M. . Benkhalifa A. . Guerradi M. . Bousdira K. . Bayoud B. . Labgaâ L. *Recherche Agronomique ; Volume 11, Numéro 20, Pages 17-23. 2007-12-20.*
8. Sedra, M. H. (2003). *Le Palmier Dattier, Base de la Mise en Valeur des Oasis au Maghreb*.
9. Nadia Bouguedoura, Abderrahmane Benkhalifa et Malika Bennaceur ; *Biotechnologies du palmier dattier ; p. 15-22 ; ISBN :9782709922760 ; (2007).*
10. AKSA Abderrahmane, A. Khardi et al. : *Cah. Agric.* 2024, 33, 3.
11. A. Chehma et HF. Longo ; *Valorisation des Sous-Produits du Palmier Dattier en Vue de leur Utilisation en Alimentation du Bétail ; Rev. Energ. Ren. : Production et Valorisation – Biomasse, (2001) 59-64.*
12. FAO (2024). *Date Palm Cultivation and Sustainable Management of Date Palm By-products*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
13. Chao, C.T., & Krueger, R.R. (2007). The Date Palm (*Phoenix dactylifera* L.): Overview of Biology, Uses and Cultivation. *HortScience*, 42(5), 1077–1082.
14. IPCC (2023). *Sixth Assessment Report – Climate Change 2023: Synthesis Report*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
15. UNEP (2024). *Global Environment Outlook: Sustainable Management of Agricultural Residues*. United Nations Environment Programme.
16. Bensadoun, A., Benmoussa, H., & Amara, D. (2021). *Valorisation des résidus lignocellulosiques du palmier dattier en zones arides : état de l’art et perspectives*. *Revue des Énergies Renouvelables*, 24(3), 451-463.

Références bibliographiques

17. Boumediene, M., Hadj Sadok, A., & Khellaf, A. (2022). Agricultural Waste Valorization in Algeria: Circular Economy Opportunities for Date Palm Residues. *Journal of Cleaner Production*, 350, 131432.
18. M. Nič, IUPAC Compendium of Chemical Terminology 2nd Edition (1997), IUPAC Compend. Chem. Terminol. Gold B. 2 (1997) 1997–1997. doi:10.1351/goldbook. F02510.
19. G. Crini, Wastewater Treatment by Sorption. In: *Sorption Processes and Pollution*, Ed.: Press (2010) chapitre 2, 39-73.
20. R.J. Rouquerol F., Luciani L., Llewellyn P., Denoyel R., *Texture des matériaux pulvérulents ou poreux, Analyses de surface et de matériaux.*, Techniques de l'ingénieur, 2003.
21. M. Stéphanie, *Traitement des gaz dangereux captés sur les lieux de travail (institut national de recherche et de sécurité inrs)*, 2015.
22. M. Boulhout, *Etude de l'adsorption de composés organiques sur des matériaux poreux de type Metal Organic Framework (MOF)*, Université Aix-Marseille, 2012.
23. J. Choi, B. Pant, C. Lee, M. Park, S.J. Park, H.Y. Kim, Preparation and characterization of eggshell membrane/PVA hydrogel via electron beam irradiation technique, *Ind. Eng. Chem.* 47 (2017) 41–45.
24. B. Sansey, *Développement de la bio-adsorption pour décontaminer des effluents de rejets industriels : abattement chimique et gain environnemental*, Besançon, 2011.
25. N. Boualla, Étude expérimentale sur l' élimination des nitrates par adsorption sur des argiles activées et non activées de la sebkha d' Oran Résumé, *Afrique Sci. Rev. Int. Des Sci. Technol.* 07 (2011) 56–73.
26. A. Dąbrowski, Adsorption - From theory to practice, *Adv. Colloid Interface Sci.* 93 (2001) 135–224. doi:10.1016/S0001-8686(00)00082-8.
27. M.F. Sun L., *Adsorption- Aspects théoriques, Procédés de traitement des eaux potables, industrielles et urbaines.*, Techniques de l'ingénieur, 2003.
28. Z. Zulfadhly, M.D. Mashitah, S. Bhatia, Heavy metals removal in fixed-bed column by the macro fungus *Pycnoporus sanguineus*, *Environ. Pollut.* 112 (2001) 463–470. doi:10.1016/S0269-7491(00)00136-6.
29. S. Sadaf, H.N. Bhatti, Batch and fixed bed column studies for the removal of Indosol Yellow BG dye by peanut husk, *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 45 (2014) 541–553. doi:10.1016/j.jtice.2013.05.004.
30. F. Edeline, *L'épuration physico-chimique de l'eau*. 4^{ème} édition, CEBDOC Tec et Doc. Paris, 1998.

Références bibliographiques

31. R. Chakravarty, G. Prasad, D.C. Raupainwar, Views 6 CrossRef citations 0 Altmetric Original Articles Static Removal of Copper (II) from Aqueous Solutions by Hematite, *Environ. Technol.* 19–1998 (n.d.) 315–322.
32. D. Savova, N. Petrov, M.F. Yardim, E. Ekinici, T. Budinova, M. Razvigorova, V. Minkova, The influence of the texture and surface properties of carbon adsorbents obtained from biomass products on the adsorption of manganese ions from aqueous solution, *Carbon N. Y.* 41 (2003) 1897–1903. doi:10.1016/S0008-6223(03)00179-9.
33. B.M. Babic, S.K. Milonjic, M.J. Polovina, S. Cupic, B. V Kaludjerovic, Adsorption of zinc, cadmium and mercury ions from aqueous solutions on an activated carbon cloth, *Carbon N. Y.* 40 (2002) 1109–1115. doi:10.1016/S0008-6223(01)00256-1.
34. W.J. Masschelein, *Processus unitaires du traitement de l'eau potable*. Édition CEBEDOC, 1996.
35. L.-M. Sun, F. Meunier, Sun L-M., Meunier F. Adsorption. Aspects théoriques. , J 2730, Vol.2, (2016)., *Tech. L'ingénieur*. 2 (2016).
36. B. Jean-Claud, *Traitements physico-chimiques de la pollution soluble*, *Tech. l'ingenieur*. 1 (2000).
37. S.A. Wasay, S. Barrington, S. Tokunaga, Organic acids for the in-situ remediation of soils polluted by heavy metals: Soil flushing in columns, *Water. Air. Soil Pollut.* 127 (2001) 301–314. doi:10.1023/A:1005251915165.
38. S. Tandy, K. Bossart, R. Mueller, J. Ritschel, L. Hauser, R. Schulin, B. Nowack, Extraction of heavy metals from soils using biodegradable chelating agents., *Environ. Sci. Technol.* 38 (2004) 937–944. doi:10.1021/es0348750.
39. M. Stéphanie, *Traitement des gaz dangereux captés sur les lieux*, 2015.
40. Faust, S.D.& Aly, O.M. 1987, *Adsorption Processes for Water Treatment*. Butterworth Publishers, Boston.
41. Suksabye, P., Thiravetyan, P.& Nakbanpote, W. 2008 Column study of chromium (VI) adsorption from electroplating industry by coconut coir pith. *J.Hazard.Mater.* 160,56–62.
42. H.C. Thomas, Heterogeneous ion exchange in a flowing system, *J. Am. Chem. Soc.* 66 (1944) 1664–1666. doi:10.1021/ja01238a017.
43. O. Allahdin, *Elimination (par adsorption sur la brique activée) de polluants métalliques dans les eaux de la République Centrafricaine et les pays en voie de développement. Aspects texturaux, physico-chimiques (électro) cinétiques et thermodynamiques.*, Université de l'Ile 1, 2014.
44. Kandaswamy. S. B, SriKrishna. P. T. R. Fixed-bed column studies on biosorption of crystal violet from aqueous solution by *Citrullus lanatus* rind And *Cyperus rotundus*. *Applied Water Science*3, 673–687, 2013.

Références bibliographiques

45. A. Wolborska, Adsorption on activated carbon of p-nitrophenol from aqueous solution, Water Res. 23 (1989) 85–91. doi:10.1016/0043-1354(89)90066-3.
46. R.G. Zepp and D.M. Cline, Environment. Sci. Tech, 11 (1997) 359-366.

.

Liste des Annexes



Image 1 : Le déchet de palmier dattier broyé

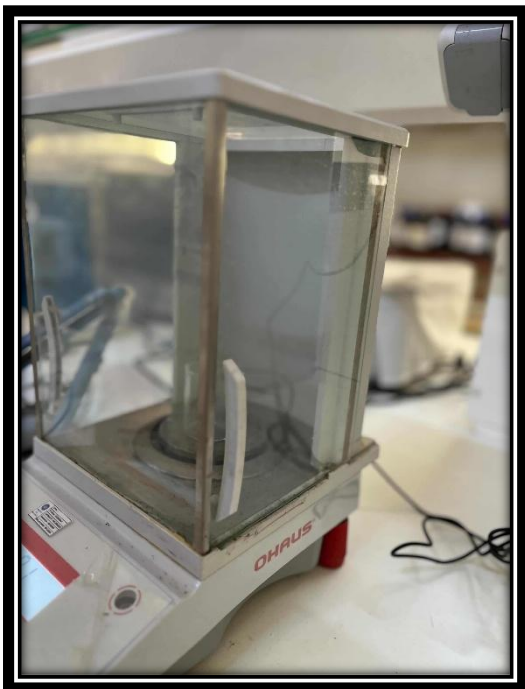


Image 2 : une balance analytique

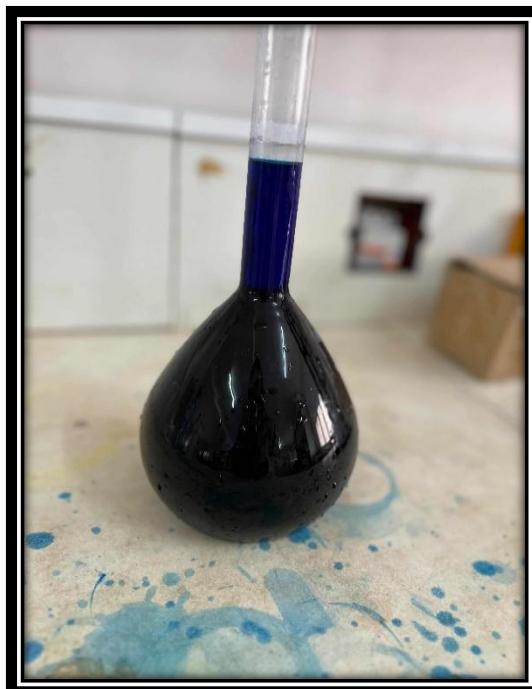


Image 3 : la solution mère de BM



Image 4 : le système dynamique utilisé

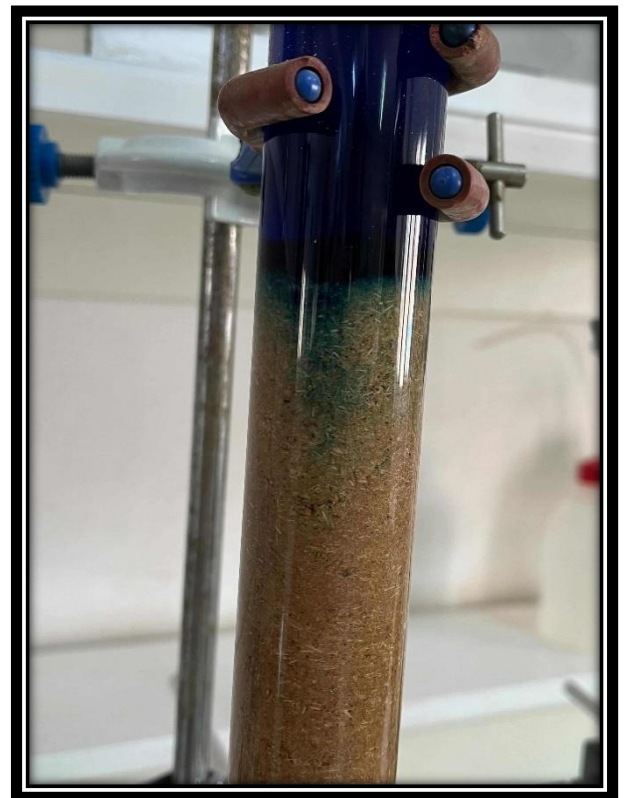


Image 5 : la dégradation du Blue de méthylène dans la colonne

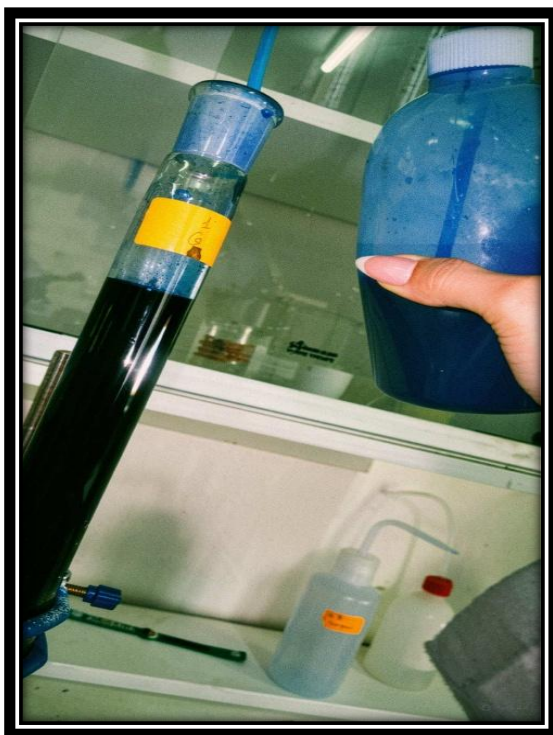


Image 6 : L'injection de Blue de méthylène dans la colonne par pissette





Image 7 : les échantillons.